



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



Oswaldo Augusto de Abreu Queiroz

## **AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA DOS PROGRAMAS DE PRODUÇÃO ÀS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO VIA SIMULAÇÃO**

Ouro Preto - MG

2021

OSWALDO AUGUSTO DE ABREU QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA DOS PROGRAMAS DE PRODUÇÃO ÀS  
OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO VIA SIMULAÇÃO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

**Área de concentração:** Lavra de Minas

**Orientador:** Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

**Coorientador:** Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo  
Ortiz

Ouro Preto - MG

2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

Q384a Queiroz, Oswaldo Augusto de Abreu.

Avaliação da aderência dos programas de produção às operações de perfuração via simulação. [manuscrito] / Oswaldo Augusto de Abreu Queiroz. - 2021.

164 f.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

1. Planejamento de lavra. 2. Minas e mineração - Perfuração de rochas. 3. Métodos de simulação. 4. Arena (Programa de computador). I. Cabral, Ivo Eyer. II. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.015:622.243

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Oswaldo Augusto de Abreu Queiroz

Avaliação da aderência dos programas de produção às operações de perfuração via simulação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Aprovada em 30 de junho de 2021

### Membros da banca

Dr. Ivo Eyer Cabral - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Adilson Curi - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Edmo da Cunha Rodvalho - Universidade Federal de Alfenas

Ivo Eyer Cabral, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 30/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Ivo Eyer Cabral, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/09/2021, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0227477** e o código CRC **A389BEE4**.

*Dedico este trabalho a Deus. A Ele a glória!*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus.

Agradeço à toda minha família a ajuda, paciência e suporte durante toda minha caminhada acadêmica, sobretudo, meu pai Luiz, minha mãe Lidiania e minha irmã Renata. Aos meus amigos, sobretudo, os da igreja pelas orações.

Aos meus professores pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus orientadores Ivo e Carlos por me aceitarem e orientarem com seus ricos conhecimentos.

Ao Ivo, em especial, agradeço a sua paciência, parceria e amizade em todas as etapas durante a construção deste trabalho.

Ao Vilson pelo fornecimento do banco de dados e a disponibilidade.

Aos membros da banca Edmo e Adilson pelas sugestões que enriqueceram ainda mais este trabalho.

Aos colegas e estudantes do DEMIN pela parceria e troca de conhecimentos.

À UFOP e DEMIN por toda estrutura.

À toda coordenação do PPGEM pela paciência e resolução dos impasses aos quais estive envolvido.

À todos os funcionários e colaboradores do DEMIN pela gentileza e serviços prestados.

À FAPEMIG pela bolsa que me manteve financeiramente.

## RESUMO

As estratégias comerciais traçadas pelas empresas mineradoras têm por objetivo entregar seus produtos em um tempo cada vez mais curto. Para tanto, o planejamento operacional e a sua execução devem ser cada vez mais eficazes. Para o atendimento de metas de quantidade e qualidade do minério, o planejamento de mina é responsável pela definição de quando e de quais áreas devem ser lavradas. Comumente o minério a ser lavrado deve ser perfurado e desmontado, para depois ser carregado e transportado. Dentro de um contexto cada dia mais desafiador, as operações de perfuração de rochas para desmonte têm um papel fundamental, visto que a fragmentação apropriada da rocha é um ponto chave no processo da extração de minérios. Parâmetros técnicos envolvidos no plano de perfuração e desmonte para proporcionar uma massa desejada com uma granulometria adequada são tão importantes quanto a previsão do tempo de execução para que a área desmontada esteja liberada para ser carregada no tempo previsto. Sabe-se que a produção da mina é dependente da média de horas usadas das perfuratrizes as quais, por consequência, também são dependentes dos parâmetros de disponibilidade física (DF) e utilização (UT) desses equipamentos. Essa previsão normalmente é feita através de uma taxa de penetração e valores médios de DF e utilização UT da frota de equipamentos. Neste trabalho foi desenvolvido no *software* Arena um modelo de simulação a eventos discretos para simular o tempo de execução de um plano de perfuração onde as variabilidades de DF e UT de cada perfuratriz ou da frota são levadas em consideração. O modelo foi aplicado em um estudo de caso de um plano de perfuração em uma mineração de minério de ferro. A previsão do tempo de execução do plano de perfuração fornecida pelo modelo foi comparada com a prática comum de previsão da empresa que utiliza os parâmetros médios da DF e UT da frota do mês anterior ao da execução do plano. Embora os dados utilizados se refiram a um período de somente três meses de um ano, foi constatado em ambos os casos que a escolha dos dados e do intervalo de tempo a que estão associados é de fundamental importância para uma boa previsão. A decisão de considerar dados separados de cada perfuratriz, de um grupo ou de toda a frota de perfuratrizes é outro fator importante.

**Palavras-chave:** Perfuração, simulação, disponibilidade física, utilização, *software* ARENA.

## **ABSTRACT**

*The commercial strategies outlined by mining companies aim to deliver the products of these companies in an increasingly shorter time. Therefore, operational planning and its execution must be increasingly effective. In order to meet targets for ore quantity and quality, mine planning is responsible for defining when and which areas should be mined. Commonly, the ore to be mined must be drilled and blasted, and then loaded and transported. Within an increasingly challenging context, rock drilling operations for blasting have a fundamental role, as the proper fragmentation of the rock is a key point in the mineral extraction process. Technical parameters involved in the drilling and blasting plan to provide a desired mass with an adequate granulometry are as important as the forecast of the execution time so that the blasted area is free to be loaded in the foreseen time. It is known that the mine's production is dependent on the average hours used by the drill rigs which, consequently, are also dependent on the parameters of physical availability (AV) and utilization (UT) of these equipments. This forecast is usually made through a penetration rate and average values of AV and UT of the equipment fleet. In this work, a discrete event simulation model was developed in Arena software to simulate the execution time of a drilling plan where the variability of AV and UT of each drill or fleet is taken into account. The model was applied to a case study of a drilling plan in an iron ore mine. The forecast of the execution time of the drilling plan provided by the model was compared with the company's common forecasting practice, which uses the average parameters of AV and fleet UT of the last month to the execution of the plan. Although the data used refer to a period of only three months of a year, it was found in both cases that the choice of data and the time interval to which they are associated is of fundamental importance for a good forecast. The decision to consider separate data for each drill rig of a group or of the entire drill rig fleet is another important factor.*

**Keywords:** *Drilling, simulation, physical availability, utilization, ARENA software.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Distribuição total de horas de um equipamento ou frota. ....	23
Figura 3.2 - Vista frontal do bit Sharp & Hughes (1916). ....	31
Figura 3.3 - Bit tricônico como mostrado em patente 1.983.316 nos E.U.A. ....	31
Figura 3.4 - Esboço do movimento do pistão em uma câmara cilíndrica. ....	33
Figura 3.5 - Esboço das perfuratrizes TH e DTH. ....	34
Figura 3.6 - Efeito da taxa de penetração com a variação do avanço no método TH. ....	37
Figura 3.7 - Esboço do método martelo de topo ( <i>Top hammer</i> - TH) ....	38
Figura 3.8- Esboço do método de perfuração martelo de fundo ( <i>Down the hole</i> - DTH). ....	39
Figura 3.9 - Figura esquemática de perfuração rotativa por esmagamento. ....	41
Figura 3.10 - Propriedades das rochas que influenciam na perfurabilidade. ....	43
Figura 3.11 - Gráfico tensão-deformação demonstrando o pico de resistência. ....	44
Figura 3.12 - Desenho esquemático do teste UCS. ....	45
Figura 3.13 - Esboço de uma fina seção de grãos (obtida de uma fotografia) de um arenito. .	48
Figura 3.14 - Gráfico do coeficiente de textura por tipo de rocha. ....	49
Figura 3.15 - Relação entre $E_v$ e CRS. ....	54
Figura 3.16 - Esboço do Teste de Fragilidade (S20 ). ....	55
Figura 3.17 - Esquema do Teste de perfuração <i>Siever's J value</i> . ....	55
Figura 3.18 - Ábaco para avaliação do DRI. ....	56
Figura 3.19 - Área sob $f(x)$ no intervalo $[a,b]$ de uma distribuição de probabilidade. ....	73
Figura 3.20 - Teste de hipótese unilateral baseado no valor do teste estatístico $t$ . ....	78
Figura 3.21 - Teste de hipótese unilateral baseado no $p$ -value. ....	78
Figura 3.22 - Fluxograma para tomada de decisão entre o uso da distribuição $t$ ou $z$ . ....	85
Figura 4.1 - Metodologia utilizada. ....	90
Figura 4.2 - Cálculo da previsão do término do carregamento realizado pela escavadeira CAT 7295 EM 3308. ....	101
Figura 4.3 - Principais valores dos cálculos dos metros a serem perfurados do plano de perfuração para desmontar 150.000 t. ....	102
Figura 4.4 -Planilha base para o cálculo das horas previstas para perfurar o plano. ....	104
Figura 4.5 - Planilha com o cálculo dos principais valores da execução do desmonte e as datas de término da perfuração e do desmonte. ....	105
Figura 4.6 - Algoritmo do modelo considerando a perfuração em 24 horas. ....	107
Figura 4.7 - Leitura dos dados iniciais. ....	108

Figura 4.8 - Leitura da identificação das perfuratrizes que serão usadas.....	108
Figura 4.9 - Modelo de planilha com dados que são repassados ao modelo.....	109
Figura 4.10 - Bloco de controle de término da simulação.....	111
Figura 4.11 - Parte do bloco em que entram as perfuratrizes e definem como calcular a produtividade efetiva. ....	114
Figura 4.12 - Parte do fluxo em que a entidade executa os furos em 24 horas. ....	115
Figura 5.1 - Gráfico de Pareto referente a frota de perfuratrizes para os meses de abril, maio e junho de 2018. ....	120
Figura 5.2 - Gráfico referente a massa perdida em toneladas associada a % de cada causa de PO. ....	124
Figura 5.3 - Curvas da distribuição da DF de maio e informações dos testes.....	137
Figura 5.4 - Curvas da distribuição do rendimento de abril junto com maio e informações dos testes. ....	138
Figura 5.5 - Distribuição empírica para a DF de abril para um número de classes igual a 7, bem como a sua expressão. ....	139
Figura 5.6 - Distribuição empírica calculada ponto a ponto para a DF de abril.....	139
Figura 5.7 - Nuvem de correlação entre os valores de DF e UT da frota referentes ao mês de abril.....	146
Figura 5.8 - Nuvem de correlação entre os valores de DF e UT da frota referentes ao mês de maio. ....	146
Figura 5.9 - Variação dos rendimentos nos meses de abril e maio. ....	149
Figura 5.10 - Comparação do rendimento previsto com executado para diferentes datas de início do plano de perfuração. ....	150
Figura 5.11 - Comparação entre o tempo de execução previsto e executado para diferentes datas de início do plano de perfuração em maio.....	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Fração energética dos mecanismos de perfuração.....	40
Tabela 3.2 - Escala de dureza de Mohs.....	47
Tabela 3.3 - Correlação entre dureza e resistência à compressão.....	47
Tabela 3.4 - Fatores de conversão para diâmetros diferentes.....	52
Tabela 3.5 - Classificação do DRI por categoria.....	56
Tabela 3.6 - Tempos médios para troca de hastes.....	60
Tabela 3.7 - Tempo médios de manobras.....	60
Tabela 3.8 - Critérios usuais para classicicação do p-value.....	79
Tabela 4.1 - Horários de trabalho da mina dividida em turnos.....	91
Tabela 4.2 - Horas de perdas operacionais separadas por causas e a devida razão de cada com o total das 47 perdas.....	95
Tabela 4.3 - Horas de perdas operacionais e a devida % em relação ao total de perdas dividida 14 causas.....	98
Tabela 4.4 - Número identificador das perfuratrizes, nome das perfuratrizes e o número identificador das perfuratrizes alocadas.....	112
Tabela 4.5 - Definição dos valores dos atributos DF, UT, rendimento e produtividade efetiva.....	113
Tabela 5.1 - Tabela da causa de PO da frota de perfuratrizes com horas perdidas, o % de cada tipo PO e % acumulado de cada tipo PO.....	119
Tabela 5.2 - Fonte de dados para análise de Pareto resumida da frota de perfuratrizes.....	121
Tabela 5.3 - Dados referentes a realização do plano de perfuração no prazo pretendido.....	122
Tabela 5.4 - Dados referentes a parte não concluída do plano de perfuração na data prevista.....	123
Tabela 5.5 - Dados referentes ao plano executado concluído em atraso.....	123
Tabela 5.6 - Dados referentes a % de PO de cada causa e a respectiva massa perdida em toneladas.....	123
Tabela 5.7 - Comparação dos coeficientes de correlação entre as PO (h) e as DF(%)......	126
Tabela 5.8 - Influência da perfuratriz sobre as PO.....	128
Tabela 5.9 - Influência do mês sobre as PO.....	129
Tabela 5.10 - PO para troca de bit, troca de martelo, troca de haste e desgaste de ferramentas.....	130

Tabela 5.11 - Rendimentos de cada perfuratriz referentes aos meses de abril, maio e junho e dos meses compilados. ....	131
Tabela 5.12 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente ao mês de abril.....	132
Tabela 5.13 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente ao mês de maio. ....	132
Tabela 5.14 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente ao mês de junho. ....	132
Tabela 5.15 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente aos 3 meses compilados. ....	133
Tabela 5.16 - Valores das DF(%) e UT(%) e dos rendimentos diários para os meses de abril e maio de 2018 e suas médias, desvio padrão, mínimo, máximo e coeficiente de variação. ....	135
Tabela 5.17 - Alguns parâmetros dos resultados das tentativas de ajustes realizada no <i>Input Analyzer</i> . ....	136
Tabela 5.18 - Expressões das distribuições empíricas que serão utilizadas no modelo de simulação. ....	140
Tabela 5.19 - Resultado da simulação para DF e UT amostrados e produtividade efetiva iguais para todas as perfuratrizes. ....	142
Tabela 5.20 - Descrição diária de um plano de perfuração executado por três perfuratrizes utilizando os valores de DF e UT da frota realizado no mês de maio. ....	144
Tabela 5.21 - Resultado da simulação para DF e UT amostrados e produtividade efetiva iguais para todas as perfuratrizes. ....	145
Tabela 5.22 - Resultado da simulação referentes ao rendimento amostrado e produtividade efetiva iguais para as perfuratrizes. ....	147
Tabela 5.23 - Resultado da simulação referentes ao rendimento amostrado e produtividade efetiva diferentes para as perfuratrizes. ....	148
Tabela 5.24 - Resultados do tempo de execução do plano e os rendimentos médios para diferentes datas de início. ....	150
Tabela 5.25 - Resultado da simulação da frota referentes ao rendimento amostrado de uma distribuição empírica para o período de 4 de abril a 3 de maio com as produtividades diárias diferentes. ....	152
Tabela 5.26 - Previsões para o tempo de execução do plano utilizando-se as médias móveis dos rendimentos dos 30 dias anteriores ao início do plano. ....	152
Tabela 5.27 - Resultado da simulação considerando os dados de rendimento amostrado sobre os meses de abril e maio de 2018. ....	154

Tabela 5.28 - Resultado da simulação considerando a distribuição ajustada aos dados dos rendimentos da frota referentes somente maio de 2018.....	154
Tabela 5.29 - Resultado da simulação nas condições do cenário 4 com 300 furos ao invés de 431.....	155

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>A</b>	Afastamento
<b>AAP</b>	Anglo American Platina
<b>APOL</b>	Área do polígono
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>C</b>	Número de ciclos por hora eficiente
<b>CAD</b>	Tempo de carregamento de explosivos, amarração e desmonte
<b>CAI</b>	<i>Cerchar abrasive index</i>
<b>CRS</b>	<i>Coefficient of rock strength</i>
<b>D</b>	Densidade
<b>DF</b>	Disponibilidade física
<b>DAI</b>	<i>Dinamic impact abrasive index</i>
<b>DRI</b>	<i>Drilling rate index</i>
<b>DTH</b>	<i>Down the hole</i>
<b>E</b>	Espaçamento
<b>ETS</b>	Escola técnica superior de engenheiro de minas de Madri
<b>E<sub>v</sub></b>	Energia de impacto por volume de rocha
<b>FIFO</b>	<i>First in first out</i>
<b>H<sub>0</sub></b>	Hipótese nula
<b>H<sub>1</sub></b>	Hipótese alternativa
<b>H<sub>b</sub></b>	Altura do banco
<b>HC</b>	Horas calendário
<b>HD</b>	Horas disponíveis para operar
<b>HE</b>	Horas eficientes
<b>H<sub>f</sub></b>	Profundidade do furo
<b>HPCI</b>	Horas previstas para o carregamento iniciar
<b>HPP</b>	Horas previstas para executar um plano de perfuração
<b>HT</b>	Horas totais
<b>IC</b>	Intervalo de confiança
<b>I<sub>p</sub></b>	<i>Drillability index</i>
<b>ISRM</b>	<i>International society for rock mechanics</i>

<b>ISRM</b>	<i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i>
<b>KML</b>	<i>Kanjole Minerals Limited</i>
<b>KPMG</b>	Klynvelt Peat Marwick Goerdeler
<b>KS</b>	Teste de aderência de Kolmogorov Smirnov
<b>M<sub>DIA</sub></b>	Massa carregada por dia
<b>M<sub>SFURO</sub></b>	Massa por furo
<b>M<sub>SPLANO</sub></b>	Massa da área a ser lavrada
<b>MTBF</b>	<i>Mean time between failures</i>
<b>M<sub>TPLANO</sub></b>	Metros totais do plano de perfuração
<b>MTTR</b>	<i>Mean time to repair</i>
<b>N1</b>	Disponibilidade operacional
<b>N1*</b>	Disponibilidade mecânica
<b>N2</b>	Utilização
<b>N3</b>	<i>Working efficiency</i>
<b>N4</b>	<i>Job efficiency</i>
<b>N<sub>DIAS</sub></b>	Número de dias previstos para área ser liberada para o carregamento
<b>NF</b>	Número de furos
<b>N<sub>FREAL-DIA</sub></b>	Número de furos realizados por dia
<b>NPUSO</b>	Número de perfuratrizes em uso
<b>OE</b>	<i>Operational efficiency</i>
<b>OEE</b>	<i>Overall effectiveness equipment</i>
<b>P</b>	Capacidade de produção
<b>P<sub>0</sub></b>	Produção por ciclo
<b>PDE</b>	Produtividade
<b>P<sub>DEMÍN</sub></b>	Produtividade mínima necessária
<b>PM</b>	Horas perdidas por manutenção
<b>PO</b>	Perdas operacionais
<b>RMO</b>	Rendimento de mão de obra
<b>R<sub>Pi</sub></b>	<i>Rock penetrability index</i>
<b>S</b>	Subfuração
<b>T</b>	Tempo de ciclo em minutos
<b>TC</b>	<i>Texture coefficient</i>
<b>T<sub>f</sub></b>	Tempo gasto para executar um furo de profundidade H <sub>f</sub>
<b>TH</b>	<i>Top hammer</i>

<b>TNOW</b>	Tempo corrente de simulação
<b>TP</b>	Taxa de penetração média
<b>UCS</b>	<i>Uniaxial Compressive Strength</i>
<b>UT</b>	Utilização
<b>VP</b>	Velocidade de penetração
<b>VP<sub>m</sub></b>	Velocidade de penetração média considerando perdas de energia



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA DO ESTUDO</b> .....	18
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	21
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	21
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	21
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
<b>3.1</b>	<b>Planejamento operacional de lavra</b> .....	22
3.1.1	Índices operacionais (índices de confiabilidade) .....	22
3.1.2	Estimativa das horas eficientes e capacidade de produção .....	27
3.1.2	Rendimento ( $\eta$ ) .....	28
<b>3.2</b>	<b>Perfuração das rochas</b> .....	29
3.2.1	História da perfuração .....	30
3.2.2	Métodos de perfuração das rochas .....	32
3.2.3	Mecanismos da perfuração percussiva .....	42
3.2.4	Propriedades das rochas que afetam a perfurabilidade .....	42
3.2.5	Diâmetro do furo (ou do Bit) .....	50
3.2.6	Indicadores de vida útil das brocas .....	50
3.2.7	Determinação da velocidade de penetração para o método percussivo .....	51
3.2.8	Velocidade de penetração, velocidade de penetração média e taxa de penetração média .....	58
3.2.9	Seleção do bit .....	60
<b>3.3</b>	<b>Simulação</b> .....	<b>61</b>
3.3.1	A origem da simulação .....	61
3.3.2	Conceitos fundamentais de simulação .....	62
3.3.3	Simulação a eventos discretos .....	65
3.3.4	As formas da estruturação de programas em simulação .....	65
3.3.5	Vantagens e desvantagens da simulação .....	66
3.3.6	A simulação na indústria minerária .....	68
3.3.7	Modelagem e simulação de sistemas .....	71
3.3.8	Distribuição de probabilidades teóricas .....	72
3.3.9	Geradores de números aleatórios (GNA) .....	73
3.3.10	Testes de aderência .....	76
3.3.11	Análise do p-value para ajuste das distribuições .....	80
3.3.12	Análise dos resultados da simulação (Intervalo de confiança - IC) .....	82
3.3.13	O Ambiente Arena .....	85

<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	89
<b>4.1</b>	<b>Levantamento de dados</b> .....	90
<b>4.2</b>	<b>Problema da previsão do tempo de execução do plano de perfuração</b> .....	98
<b>4.3</b>	<b>Desenvolvimento do modelo</b> .....	105
4.3.1	Algoritmo do modelo .....	105
4.3.2	Descrição do modelo .....	107
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	117
<b>5.1</b>	<b>Análise das causas de perdas</b> .....	117
5.1.1	Análise das causas de perdas por gráfico de Pareto .....	118
5.1.2	Interferência de uma causa de perda operacional na entrega de massas .....	121
5.1.3	Influência da DF no número de horas de PO devido a uma dada causa.....	124
5.1.4	Análise da influência de uma perfuratriz ou de um mês no número de horas de PO devido a uma dada causa .....	127
5.1.5	Influência dos meses e das perfuratrizes nos rendimentos .....	131
<b>5.2</b>	<b>Ajustes das distribuições</b> .....	134
<b>5.3</b>	<b>Resultados da simulação</b> .....	140
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	156
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	159

## 1 INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Na atualidade da mineração, a baixa aderência entre o planejado e o executado dos programas de produção, orçamentos e disponibilidade da frota de equipamentos, na maioria das vezes, se deve à presença da incerteza operacional. Isso é constatado nas “operações unitárias”, tarefas fundamentais da operação de uma mina: fragmentação (perfuração e desmonte), carregamento e transporte. Grandes e consistentes desvios, sejam positivos ou negativos afetam a vida útil e as economias da mina (Kaba *et al*, 2016).

Essa variabilidade nos programas de produção aumenta o risco e a incerteza nas tomadas de decisões para remoção, substituição ou aquisição de equipamentos, principalmente, em projetos complexos em que é necessário, em determinadas situações, compor produção e qualidade. Isso é comum em minas subterrâneas e à céu aberto que, muitas vezes, é necessário lavrar várias frentes simultâneas para atingir as especificações requeridas do minério.

A operação de perfuração por pertencer ao ciclo mineiro da operação de mina merece atenção. Problemas ocasionados durante a operação da perfuração, tais como desvio de furos e mau posicionamento desses, podem ser transferidos para o resultado do desmonte, passando pelo carregamento até chegar ao transporte. Uma má fragmentação no desmonte pode gerar danos tais como matacões, que danificam os equipamentos de carga e diminuem a eficiência do carregamento conseqüentemente da produção. Como a operação de mina é uma sequência dentro de um ciclo, que se inicia na perfuração e termina no transporte, a entrega do minério dentro do prazo programado é comprometida, quando da ocorrência de problemas na perfuração.

Os principais impasses da perfuração muitas vezes são identificados na forma de atrasos da entrega do minério. Sabe-se que os atrasos da produtividade das perfuratrizes têm duas origens, perdas por motivos mecânicos e operacionais. As perdas mecânicas e operacionais são computadas nos parâmetros de disponibilidade física (DF) e utilização (UT) respectivamente. As causas de atrasos devido as paradas operacionais são muitas e há a necessidade de fazer a sua correta identificação e o seu monitoramento durante a operação.

A competição entre empresas e difíceis condições econômicas das mineradoras dentre outros fatores levam a precisão de métodos consolidados e criativos afim de melhorar a eficiência dos equipamentos. E a eficiência dos equipamentos de mina geralmente é medida por parâmetros tais quais DF e UT. Esses parâmetros tem grande efeito na performance geral nos equipamentos de mina tais quais perfuratrizes, escavadeiras e caminhões basculantes (Kansake, 2015).

Em termos da seleção de equipamentos muito se investiu em pesquisas, porém poucas pesquisas se debruçaram na eficiência de equipamentos e tampouco na eficiência das perfuratrizes (Kansake, 2015).

Segundo Agyei (2019), o *overall effectiveness equipment* (OEE) é um indicador muito usado na mineração e também na indústria de manufaturas. Embora seu uso seja raro para as perfuratrizes na mineração, também foi analisado em nove perfuratrizes pelo autor com o intuito de mensurar a magnitude das perdas de produção da mina e, por fim, determinar através desse o número de perfuratrizes necessárias para perfurar os metros anuais projetados de uma mina a céu aberto em Gana. Esse indicador auxilia no planejamento de mina e os parâmetros disponibilidades e utilizações das perfuratrizes fora medidas como parte do cálculo do OEE.

Dentro de um contexto cada vez mais desafiador, a perfuração de rochas para desmonte tem um papel vital, visto que ela é responsável para liberar material para o carregamento atuar. Por exemplo, a falta de frentes disponíveis geradas pela perfuração e desmonte representa potencial atraso (gargalo) nos resultados de produção (toneladas ou metros cúbicos de minério ou estéril), pois, não podendo contar com todas as frentes de lavra necessárias, não é possível atingir as metas de produção e compor qualidade.

Além disso, ao atrasar a entrega de uma massa desmontada, equipamentos e pessoas das próximas etapas (desmonte e carga) também ficam ociosos, aguardando a liberação de uma próxima área de avanço, acarretando, portanto, no aumento da capacidade ociosa (ineficiência produtiva – diminuição da produtividade) global da mina. Quanto mais gargalos ocorrem, mais a mina se torna “estrangulada”, ou seja, sem espaços para avançar novas frentes de lavra.

O estudo de Kansake (2015), por exemplo, mostrou que a produção da mina Kanjole Minerals Limited (KML) está intimamente relacionada ao uso efetivo de perfuratrizes. Foi obtido uma forte relação através do coeficiente de determinação ( $R^2 = 98,03\%$ ) entre a produção mensal da mina e as médias mensais de horas usadas pelas perfuratrizes. Isso confirma que a produção mensal da mina é dependente de parâmetros como disponibilidade e utilização das perfuratrizes (Kansake, 2015).

O estabelecimento do equilíbrio entre a demanda de produção e a ocupação das perfuratrizes e da mão de obra significa diminuir a capacidade ociosa, ou seja, aumentar a produtividade. Com o objetivo de prever os problemas de gargalos da mina antes mesmo de sua ocorrência, a empresa realiza uma previsão do tempo de realização de um plano de perfuração utilizando os parâmetros médios de taxa de penetração (TP), fator que depende das propriedades da rocha, do modelo da máquina e método de perfuração, DF e UT. Para sustentar

essa previsão a empresa calcula também o tempo gasto de um equipamento de carga utilizando uma taxa de produção média, uma DF média e uma UT média. A meta objetivada para o tempo de realização de um plano de perfuração é o tempo despendido pelo carregamento de uma determinada massa que também que foi anteriormente perfurada (sabe-se que cada metro perfurado corresponde a uma quantidade de massa desmontada).

Porém, ao assumir que os parâmetros de DF e UT sejam constantes ao longo dos dias de execução do plano, obtém-se uma previsão que pode estar longe da realidade, já que esses dois parâmetros variam diariamente. O estudo presente propõe um modelo de simulação que realiza essa previsão levando-se em conta a variabilidade desses parâmetros.

Na mina em estudo, muitas metas não foram atingidas, em razão de inúmeros atrasos na entrega de áreas perfuradas. O planejamento de curto prazo, apontou para a necessidade de um estudo mais detalhado. Assim, com o objetivo de elaborar novas alternativas para o cumprimento dos programas e analisando os inúmeros problemas que a perfuração pode gerar no ciclo produtivo, o presente trabalho se propõe a descrever e avaliar melhor o impacto que a perfuração pode gerar no cumprimento dos planos de produção de uma mina de ferro. Para essa tarefa, será criado um modelo de simulação no *software* @ARENA que reproduza a operação de perfuração utilizando os parâmetros de DF e UT como variáveis aleatórias para o cálculo da produtividade.

Um modelo deste tipo poderia ser usado também na avaliação da necessidade de aumento (investimento) ou diminuição dos equipamentos de perfuração e/ou de carga para se adequar aos planos operacionais ou na possibilidade de implementação de mudanças de parâmetros, como aumento ou diminuição da massa planejada do plano de perfuração e desmonte, a fim de atingir as metas de aderência para a mina em estudo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo de simulação a eventos discretos que leva em conta a variabilidade dos índices disponibilidade física e utilização dos equipamentos de perfuração na previsão do tempo execução de um plano de perfuração. Dessa forma espera-se obter uma previsão melhor, mais próxima da realidade ao se comparar com uma previsão baseada em valores médios aplicada em um estudo de caso.

### 2.2 Objetivos específicos

As seguintes metas ou objetivos específicos são listadas para se atingir o objetivo principal:

- definição do contexto no qual está inserido o estudo de caso;
- análise estatística dos dados disponíveis;
- construção do modelo de simulação usando o *software* ®ARENA;
- utilização do modelo de simulação em diferentes cenários para previsão do tempo de execução de um plano de perfuração;
- previsão do tempo de execução do plano de perfuração através da prática corrente que utiliza valores constantes de DF e UT.
- comparação e análise dos resultados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Planejamento operacional de lavra

Para que o cálculo das horas ou minutos úteis possam ser realizados utiliza-se da aplicação de alguns fatores tais como disponibilidade, disponibilidade física, utilização, *working efficiency*, *job efficiency* entre outros. Expressões como horas calendário, horas anuais, horas totais (HT), *working hours*, horas anuais, horas por turno, horas operacionais, horas eficientes (HE) devem ser usadas em meio a esses fatores. Infelizmente não há uma consistência com a maioria desses termos usados e os seus respectivos valores calculados na indústria da mineração hoje. A maioria desses termos e seus respectivos valores calculados não se convergem entre si na indústria de mineração, eles variam muito entre as empresas de mineração ou fornecedores de equipamentos (Hustrulid, 2013).

É de costume nas empresas a ocorrência de reuniões com as equipes de planejamento e operação da mina. Essas reuniões ocorrem no término da semana ou do mês e tem o objetivo de discutir os parâmetros médios de taxas de produção, disponibilidades e utilização dos equipamentos afim de prever suas produtividades da próxima semana ou mês (Kaba, 2016).

##### 3.1.1 Índices operacionais (*índices de confiabilidade*)

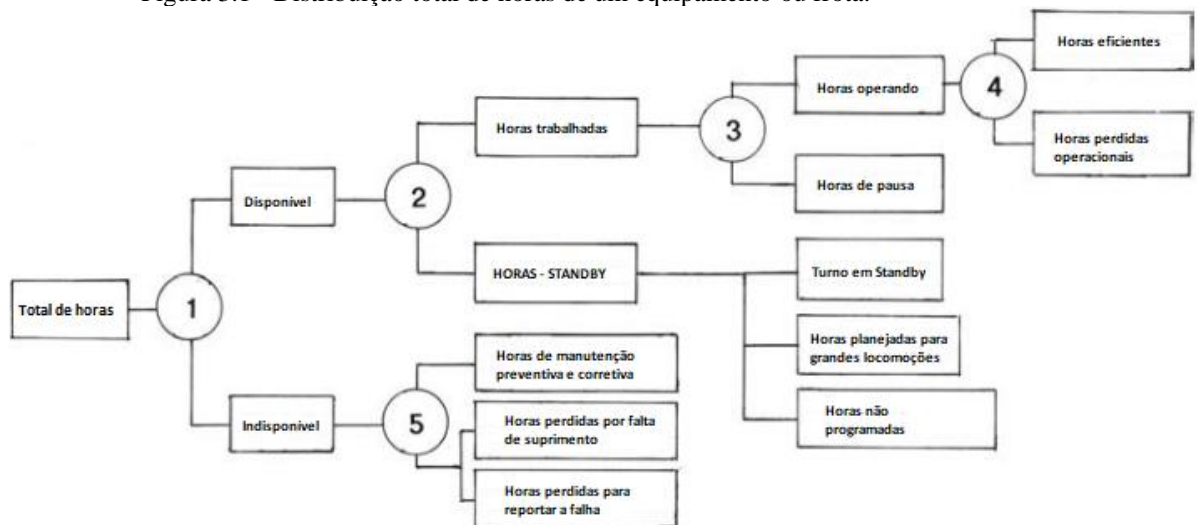
A razão do fluxo produtivo que sai de um nó a partir de um fluxo total de horas (horas produtivas e não produtivas) pode ser considerado uma “taxa de eficiência” ou “nó de eficiência”. O fluxo de horas produtivas proveniente de um total de horas (produtivas e não produtivas) pode ser determinado pela multiplicação do fluxo total por uma taxa de eficiência (Hustrulid, 2013). Para um determinado fluxo em um dado nó a fim de calcular as horas produtivas multiplica-se sempre a taxa de eficiência pelas horas “diluídas”.

A determinação da quantidade de equipamentos necessária para gerar a tonelagem desejada deve ser o critério básico para assegurar a produção planejada, prevenindo-se casos de quebra e/ou manutenção das máquinas que operam em minas a céu aberto. A mina precisa de equipamentos reserva (em estado de *standby*) para substituir as máquinas com impedimentos mecânicos e/ou que necessitam de uma determinada manutenção planejada. É preciso conhecer os inúmeros fatores que influenciam a disponibilidade e utilização dos equipamentos da mina, quando se objetiva programar e dimensionar adequadamente a frota global dos equipamentos da mina (Hustrulid, 2013). Danos da máquina, gerenciamento de cabo, troca de turno, presença

de operador, atraso por detonação foram apontados pela empresa de consultoria Klynveld Peat Marwick Goerdeler (KPMG) em conjunto com análises da empresa Anglo American Platina (AAP) dentre muitos (Fourie, 2016). A necessidade de obter melhores parâmetros de confiabilidade se torna mais importante com o crescimento da demanda por equipamentos de maior porte e mais dispendiosos (Hall e Daneshmend, 2003).

A representação da distribuição do total de horas por equipamento em uma operação de mina é apresentada na Figura 3.1, a partir de uma série de nós numerados de 1 a 5. Do ponto de vista da produção, esse fluxograma distingue as horas produtivas das horas não produtivas de um equipamento nas ramificações especificadas (Hustrulid, 2013). O nó 5 representa a eficiência da manutenção e não será abordado aqui.

Figura 3.1 - Distribuição total de horas de um equipamento ou frota.



Fonte: adaptada de Hustrulid (2013).

### 3.1.1.1 Disponibilidade física (DF)

Existem muitas maneiras de medir a qualidade de um equipamento. Um dos métodos mais comuns na indústria para medir a qualidade do funcionamento de um equipamento é o cálculo da ‘disponibilidade’ desse equipamento (Kullh, 2013). As mineradoras e/ou fornecedores de equipamentos de mina geralmente não convergem para o mesmo significado, quando se referem ao termo ‘disponibilidade’ (Hustrulid, 2013). Segundo o mesmo autor, há três modos de calcular as disponibilidades:

- Disponibilidade Operacional (ou Disponibilidade Física);
- Disponibilidade Mecânica;



- Disponibilidade Inerente.

O termo ‘disponibilidade’ especificado pelo nó 1 da figura 1 é comumente usado para abreviar a expressão “disponibilidade operacional”, que pode também ser substituída por “disponibilidade física” ou simplesmente pela abreviatura “DF” (Hustrulid, 2013). A fração do tempo do calendário operacional em que a máquina está mecanicamente pronta para trabalhar é a “disponibilidade” (Sweigard, 1992). Hustrulid (2013) define a ‘disponibilidade’ através da equação 3.1:

$$\text{Disponibilidade Operacional} = \frac{\text{Horas Disponíveis}}{\text{Horas totais}} \quad (3.1)$$

Na falta de dados suficientes para a determinação de parâmetros que necessitam de mais informações, em certas operações, recomenda-se o cálculo da ‘Disponibilidade’ (Kullh, 2013).

A relação das horas trabalhadas com a soma horas trabalhadas + horas não-disponíveis é denotada por Hustrulid (2013) como “Disponibilidade Mecânica”, que é descrita pela expressão 3.2:

$$\text{Disponibilidade Mecânica} = \frac{\text{Horas trabalhadas}}{\text{Horas trabalhadas} + \text{Horas não disponíveis}} \quad (3.2)$$

Embora a disponibilidade operacional seja a mais conveniente nos cálculos de programação de equipamento, a disponibilidade mecânica é a mais significativa. A disponibilidade mecânica não contabiliza as horas *stand by* contidas nas Horas disponíveis (Hustrulid, 2013).

A disponibilidade operacional e mecânica são as mesmas quando o valor das horas *stand by* é igual a zero. O acréscimo das horas *stand by* em um equipamento causa o aumento do valor da disponibilidade operacional e quando comparado com o cálculo da disponibilidade mecânica esse acréscimo não altera o cálculo da última, ou seja, a disponibilidade operacional é sempre maior que a disponibilidade mecânica (Hustrulid, 2013).

O autor recomenda que a disponibilidade mecânica seja adotada quando a disponibilidade operacional for a partir de 5% maior que a primeira (30% das horas *stand by*) e completa que a verdadeira disponibilidade mecânica fornece resultados mais conservadores (Hustrulid, 2013).

Hustrulid (2013) apresenta outro termo para definir a disponibilidade: a “Disponibilidade Inerente”, que é o tempo médio entre as falhas (*Mean time between failures* – MTBF) dividido pela soma do MTBF mais o tempo médio para reparos (*Mean time to repair* – MTTR). E o autor fornece a definição de Disponibilidade Inerente da máquina pela equação 3.3:

$$\text{Disponibilidade Inerente} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.3)$$

Segundo Hustrulid (2013), para a contabilização do MTTR, considera apenas o tempo de manutenção corretiva e exclui as horas administrativas e as horas por falta de suprimentos de manutenção.

Hall e Daneshmend (2003) atribuem à equação rotulada por Hustrulid (2013) como Disponibilidade Inerente o conceito de disponibilidade mecânica, como pode ser observado através da expressão 3.4:

$$\text{Disponibilidade mecânica} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.4)$$

### 3.1.1.2 Utilização (UT)

Alguns autores, nesse cenário, utilizam definições específicas. Anon (1976), citado por Sweigard (1992), apresenta o termo ‘Utilização’ para definir a porção do tempo disponível mecanicamente em que a máquina está de fato trabalhando. Segundo Hustrulid (2013), a porcentagem do tempo disponível em que a máquina esteja realmente sendo usada é determinada pelo parâmetro ‘Utilização’. Hustrulid (2013) assim descreve Utilização, representada pelo nó 2 da Figura 3.1, a razão das horas trabalhadas pelas horas disponíveis:

$$\text{Utilização} = \frac{\text{Horas trabalhadas}}{\text{Horas disponíveis}} \quad (3.5)$$

Hustrulid (2013) atribui às horas trabalhadas o tempo em que o operador está na máquina, em condições de trabalho. Dentro das horas trabalhadas, o autor inclui as horas perdidas operacionais, tais como: tempo por curtos deslocamentos, condições do tempo,

abastecimento e lubrificação. O autor também subdivide as horas disponíveis em horas trabalhadas + horas *stand by*.

A demasia de operadores ou a escassez de equipamentos podem levar a valores extremamente altos da utilização. Caso seja o primeiro, o custo da mão-de-obra global por tonelada seria maior. No segundo, a quebra de equipamento causaria insuficiência da produção (Hustrulid, 2013).

### 3.1.1.3 Working efficiency

O almoço e o tempo de viagem podem ser inseridos de várias formas como horas improdutivas dentro das horas trabalhadas. Uma delas é colocá-las no atraso operacional das horas de operação, porém esses tipos de atrasos não são da mesma categoria. O almoço e o tempo de viagem não se encaixam nas horas operacionais, pois são constantes em todos os turnos e, portanto, chamadas de horas de pausa (Hustrulid, 2013). Ao alocar essas horas fora das horas operacionais, o autor sugere o índice “*Working Efficiency*” descrito pela expressão 3.6.

$$\text{Working Efficiency} = \frac{\text{Horas operadas}}{\text{Horas trabalhadas}} \quad (3.6)$$

### 3.1.1.4 Job efficiency

Segundo Hustrulid (2013), o nó (4), sobre as horas operacionais, o fator *job efficiency*, é usado para representar as perdas produtivas das horas operacionais que ocorrem em um dia normal de trabalho. O autor considera tempos de pequenos deslocamentos da máquina, abastecimento, ajuste de equipamento, manutenção de estrada dentre outros como alguns atrasos que podem ser contabilizados nesse fator. Para definir esse fator o autor utiliza a expressão 3.7.

$$\text{Job efficiency} = \frac{\text{Horas eficientes}}{\text{Horas operadas}} \quad (3.7)$$

As horas eficientes (HE) é o final do fluxo de horas do diagrama da Figura 3.1, termo bastante importante para o cálculo das taxas de estimativas de produção (Hustrulid, 2013).

### 3.1.2 Estimativa das horas eficientes e capacidade de produção

O fluxo de horas originário das horas totais (HT) até chegar as horas eficientes (HE) é afetado por quatro nós (fatores de transferência) tendo em mente a Figura 3.1. O fluxo é dividido em apenas uma fração a cada nó que se passa ao longo do caminho. Para estimar o tempo de produção (em horas ou minutos despendidos em uma determinada operação) e a produção resultante (seja em metros perfurados ou toneladas carregadas) atenta-se para o caminho superior (Hustrulid, 2013).

Segundo (Hustrulid, 2013) os fatores de transferência de fluxo são:

- N1 = Disponibilidade operacional
- N1\* = Disponibilidade mecânica
- N2 = Utilização
- N3 = *Working efficiency*
- N4 = *Job efficiency*

A relação entre as HT e as HE pode ser dada pela multiplicação dos fatores de eficiência com as horas totais através da expressão 3.8.

$$HE = N_1 \times N_2 \times N_3 \times N_4 \times HT \quad (3.8)$$

Isolando HT pode-se determinar o número de horas totais necessárias para obter um dado número de horas eficientes através da expressão 3.9.

$$HT = \frac{HE}{N_1 \times N_2 \times N_3 \times N_4} \quad (3.9)$$

Segundo o mesmo autor o resultado dos fatores de eficiência multiplicados entre si resulta a um determinado valor que é chamado de *operational efficiency* (OE) com na expressão 3.10.

$$OE = N_1 \times N_2 \times N_3 \times N_4 \quad (3.10)$$

Segundo Catalani (2007) e Hustrulid (2013) dentre outros autores tratam a operação de perfuração como uma operação caracterizada por ciclos que se repetem. Catalani (2007) definiu o ciclo da perfuração dividido em cinco etapas:

1. alinhamento da broca e emboque do furo

2. tempo de perfuração
3. manuseio e colocação das hastes
4. retirada das hastes
5. Deslocamento da perfuratriz entre um furo concluído e um novo furo.

As etapas um, três, quatro e cinco geralmente tem o tempo fixo enquanto a etapa dois (tempo de perfuração) pode variar.

O cálculo da capacidade de produção (P) de uma certa perfuratriz também depende do seu tempo de ciclo em minutos (T) e da produção por ciclo ( $P_0$ ). O valor de  $P_0$  coincide com o comprimento do furo ( $H_f$ ), ou seja, é dado em metros. Esses termos também podem ser usados para o cálculo de produção dos equipamentos de carregamento e transporte. O número de ciclos por hora eficiente (C) é calculado pela expressão 3.11 (Hustrulid, 2013).

$$C = \frac{60}{T} \quad (3.11)$$

sendo assim, o cálculo de P torna-se como se observa na expressão 3.12.

$$P = \frac{HE \times 60 \times P_0}{T} \quad (3.12)$$

ou

$$P = OE \times HT \times C \times P_0$$

Vale lembrar que o produto de C por  $P_0$  resulta na taxa de penetração média (TP) que é dado em metros por hora. Portanto, a produção (P) em metros perfurados por um dado equipamento de perfuração pode ser definido pela expressão 3.13.

$$P = HE \times TP \quad (3.13)$$

### 3.1.2 Rendimento ( $\eta$ )

O rendimento( $\eta$ ) de uma operação de um dado equipamento é definido pela expressão 3.14 (Silva, 2019):

$$\eta = DF \times UT \quad (3.14)$$

onde

DF = disponibilidade física, a porcentagem de tempo que o equipamento fica disponível para a produção.

UT = fator de utilização, é a parcela das horas disponíveis que o equipamento está efetivamente operando.

O rendimento ( $\eta$ ), descrito acima, corresponde ao produto de DF por UT que é utilizado na metodologia desta dissertação. Esse fator também é correspondente ao fator OE (*operational efficiency*) que corresponde a multiplicação dos quatro fatores de eficiência ( $N_1 \times N_2 \times N_3 \times N_4$ ) de Hustrulid (2013).

Segundo Silva (2019) fatores como nível de treinamento, motivação e experiência do operador, condições de trabalho dentre outros podem ser incluídos como fator do rendimento de mão de obra (RMO). Esse fator também pode ser adicionado ao cálculo da P de um equipamento, mas não foi considerado neste trabalho.

É importante identificar os fatores que limitam o desempenho de atingir valores mais altos de eficiência e entender como o processo ocorre (Kullh, 2013). Existem muitas maneiras de se medir o funcionamento de um determinado equipamento, uma frota ou até mesmo um processo (Kullh, 2013). O OEE, uma das maneiras mais conhecidas é um método que pode ajudar nessa medição dando um melhor entendimento de quão bom um processo se desenvolve e por identificar quais são os fatores limitantes (Kullh, 2013).

O êxito da operação pode ficar comprometido devido à baixa eficiência do equipamento (disponibilidade, utilização, qualidade e produtividade) na mineração mecanizada (Fourie, 2016).

Uma ideia fundamental que é usada desde o início dos anos 70 para aumentar a disponibilidade das máquinas é envolver os operadores em atividades de manutenção e fazer com que a equipe de manutenção não faça todo o trabalho de manutenção.

### **3.2 Perfuração das rochas**

A perfuração de rochas dentro do ciclo mineiro é a primeira operação unitária que se realiza e tem como finalidade abrir furos (penetrações cilíndricas), com distribuição e geometria adequada, dentro do maciço rochoso, para alojar as cargas explosivas e acessórios iniciadores

necessários para realização do desmonte de rochas. A perfuração é planejada para que a execução do desmonte de rochas propicie uma fragmentação adequada e tenha baixos níveis de vibrações e projeções (Álvarez *et al*, 2011; Hustrulid, 2013).

### 3.2.1 História da perfuração

Sabe-se que, há um milhão e setecentos mil anos (idade da pedra), o homem já tinha desenvolvido ferramentas, como martelos e *choppers* (instrumento de corte), provenientes das rochas, através da utilização de picaretas feitas de chifre de animais. Nossos ancestrais já sabiam de diversas relações entre o tamanho do cabo e peso do percutor para que um martelo pudesse, ou quebrar pedras duríssimas, ou talhar uma colher de madeira. No período chamado Neolítico (8.000 a.c.), surgiram a agricultura, a domesticação de animais e a cerâmica. Desenvolveu-se, assim, a fabricação de ferramentas específicas para esses trabalhos.

Entretanto, na história das ferramentas, o fato mais importante acontece há mil e duzentos anos, com o domínio da técnica de fusão e tratamento do ferro, mesmo que rudimentar. A Idade do Ferro marca, portanto, uma era arqueológica referente à utilização desse metal na fabricação de ferramentas e armas.

Na Idade Média (600-1500), surgem, na Europa, escavações usando martelos e cunhas. Nessa época, já havia o domínio dos sistemas de percussão (bater) e rotação (girar) que permitiam um melhor rendimento da operação de perfuração.

No ano de 1775, James Watt inventou a máquina a vapor, que iniciou a substituição das forças animal e humana na realização de trabalhos.

Com o desenvolvimento industrial, no século XIX, surge o sistema ou método mais clássico de perfuração existente até hoje: o rotopercussivo. Embora com os já existentes protótipos de Singer (1838) e Couch (1848) sendo baseados em um acionamento a vapor, foi com a posterior aplicação do ar comprimido como fonte de energia, que em 1861 na obra do túnel Mont Cenis, o método rotopercussivo evoluiu e passou a ser mais utilizado Jimeno (2006).

Em 1896 surge a primeira perfuratriz a martelo.

Em 1908, a companhia de ferramentas de Sharp e Hughes se formou para a construção da primeira broca rotativa, como se observa na Figura 3.2 (Hustrulid, 2013).

Figura 3.2 - Vista frontal do bit Sharp & Hughes (1916).



Fonte: Hustrulid (2013).

Em 1934, foi emitida a patente do *bit* tricônico rotativo por Scott e Garfield, como se vê na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Bit tricônico como mostrado em patente 1.983.316 nos E.U.A.

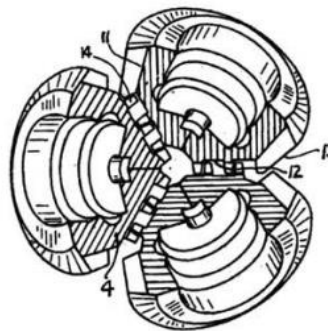


Fig. 3.

F. L. SCOTT AND  
L. E. GARFIELD INVENTORS  
BY *Jesse R. Stone*  
ATTORNEY

Fonte: Hustrulid (2013).

Em 1951, foi introduzido carbeto de tungstênio nos *bits* tricônicos, o que aumentou a capacidade de força e fraturamento na perfuração, em comparação aos *bits* feitos com dentes de aço.



A partir do desenvolvimento dos martelos hidráulicos no fim da década de 60 e início da década de 70 a perfuração de rochas deu um grande salto tecnológico (Silva, 2014).

### **3.2.2 Métodos de perfuração das rochas**

A técnica de perfuração e desmonte de rochas tanto em obras da mineração quanto em obras de túneis, esgotos, estradas, metro, etc., são empregadas quando as condições para escavações mecânicas não são adequadas (Su, 2016). Dentro dessa técnica aplicada a essas situações tem como principal fonte de energia para o sistema de perfuração quase que exclusivamente oriundo da energia mecânica embora existam outros sistemas de perfuração de rochas como térmico, hidráulico, químico entre outros. Do campo mecânico muitas máquinas foram desenvolvidas as quais podem ser subdivididas em perfuratrizes manuais e mecanizadas. As primeiras são operadas diretamente da mão do operador e são aplicadas em pequenas operações onde não se aplicam máquinas maiores. A segunda categoria a máquina é montada em uma estrutura em que o operador tem uma cabine onde pode controlar os parâmetros da perfuração. Os dois métodos de perfuração mecanizada mais conhecidos são os rotativos – percussivo e o rotativo (Alonso, 1988; Jimeno, 2006).

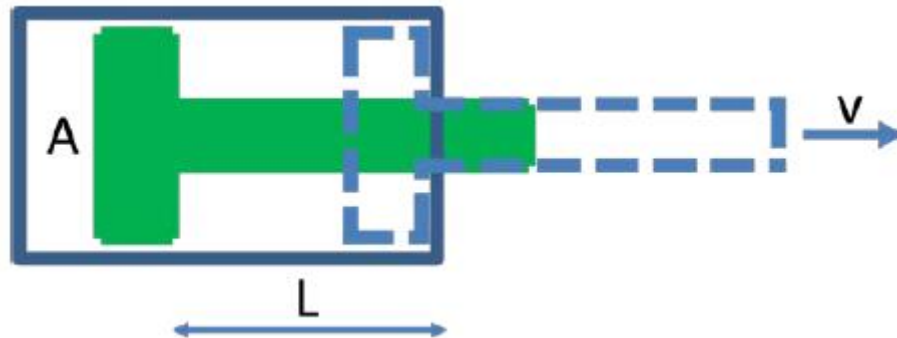
#### **3.2.2.1 Métodos Rotativo - Percussivo**

A perfuração percussiva que pode ser chamada também de rotopercussiva executa os furos tendo a energia de impacto como o principal mecanismo (Zhang, 2016; Cabrero, 2016). Esse mecanismo é representado pela potência de percussão e é obtida pelo produto entre a energia de impacto e a frequência de golpes. O martelo é o elemento que proporciona a percussão a executar movimentos alternativos de uma peça de choque (o pistão) que golpeia sucessivamente as ferramentas de perfuração (Alonso, 1988).

Dentro do martelo contém um pistão que se desloca para a esquerda e para a direita dentro de um cilindro (câmara) pela ação da pressão de um fluido (ar ou óleo) de pressão sobre uma determinada superfície do pistão. A pressão do fluido, a área da superfície e velocidade do pistão impactam diretamente na potência de percussão. O potencial de energia consumida pelo mecanismo de percussão varia de 80 a 85% da potência do equipamento (Alonso *et al*; Jimeno, 2006). A velocidade do pistão é diretamente proporcional ao deslocamento do pistão e a frequência de golpes exercida pelo pistão.

A Figura 3.4 esboça o pistão de uma superfície A se deslocando a uma distância L com uma velocidade V.

Figura 3.4 - Esboço do movimento do pistão em uma câmara cilíndrica.



Fonte: Alonso (2013).

O movimento de rotação que chega até o *bit* faz com que ele mude de posição e quebre a rocha em diferentes posições na área do furo fazendo melhorar a performance da perfuração (Zhang, 2016). A velocidade de rotação e a força de avanço (*pull down* ou *thrust load*) são operações que asseguram a interação *bit* – rocha, ajudam o avanço e a eliminação de detritos no fundo do furo (Cabrero, 2016; Gakhale, 2011). A rotação e o avanço servem apenas como operações auxiliares que atingem valores mínimos para espaçar os pontos de incidência dos impactos e assegurar o contato *bit* – rocha. Esses parâmetros influenciam pouco na velocidade de penetração (Zhang, 2016; Alonso, 1988).

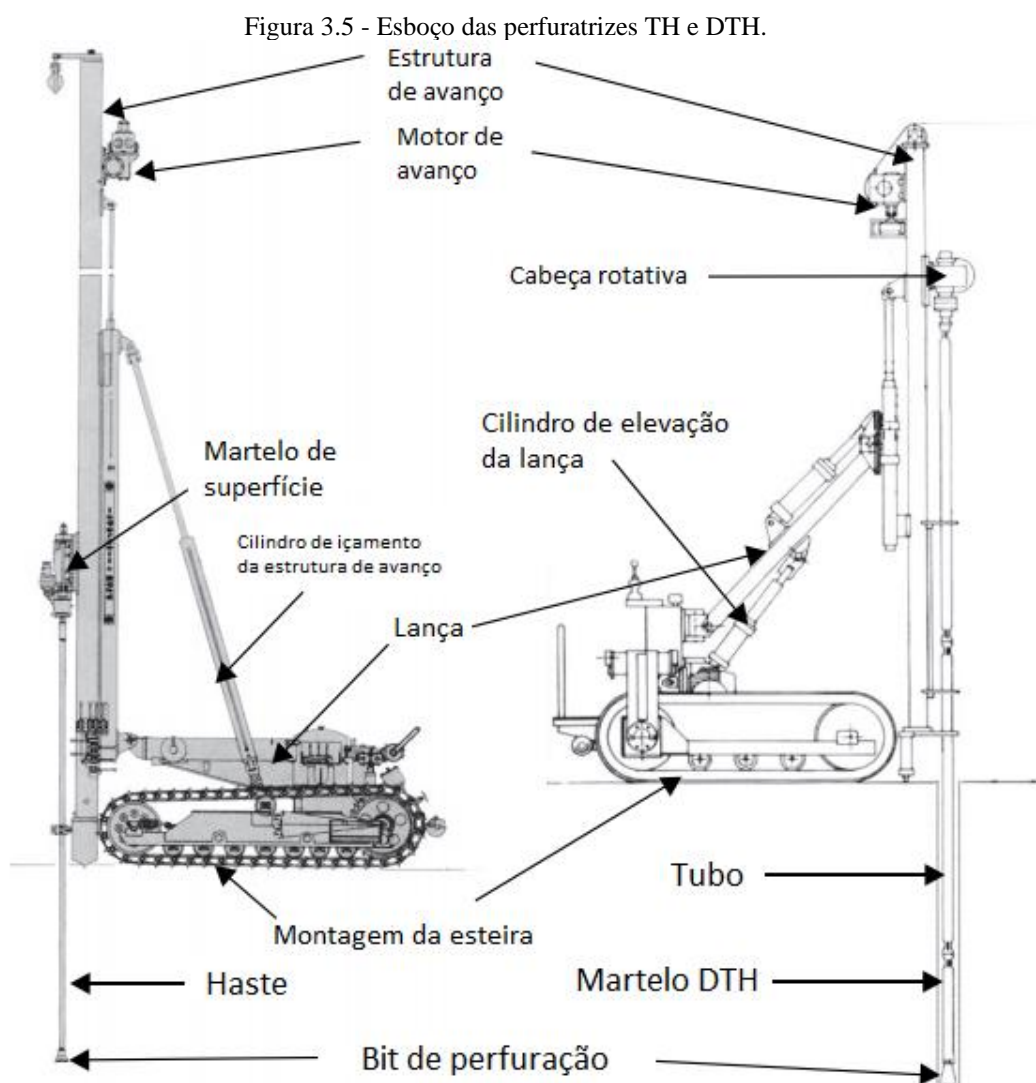
Essa modalidade de perfuração, desenvolvida para desmonte de bancada pode ser subdividida em duas: martelo de superfície (*Top hammer* - TH) e martelo de fundo (*Down the hole* - DTH).

No primeiro método a energia de impacto e a rotação são exercidas por um martelo localizado acima da superfície (do lado de fora do furo). Esses mecanismos são transmitidos pelo punho (*shank adaptor*) e a coluna de perfuração (hastes e acoplamentos) até o *bit*. Os martelos nesse método podem ser acionados por forças hidráulicas ou pneumáticas (Zhang, 2016; Hoseinie, 2014; Jimeno, 2006). No segundo método o mecanismo de percussão é exercido pelo martelo que fica localizado no fundo do furo (Zhang, 2016; Hoseinie, 2014). O mecanismo de rotação é gerado do lado de fora do furo. Nesses equipamentos as forças geradas no pistão têm natureza apenas pneumática enquanto a rotação pode ser oriunda de energias pneumáticas ou hidráulicas (Jimeno, 2006; Gokhale, 2011).

A potência de percussão em ambos os sistemas (TH e DTH) é diretamente proporcional a velocidade de perfuração (Alonso, 1988; Alonso *et al*, 2013). E a pressão exercida por um fluido (ar ou óleo) e a área sobre a cabeça do pistão por afetarem a energia de percussão também são variáveis fortemente impactantes na velocidade de perfuração (Cabrero, 2016; Gakhale, 2011).

Os golpes do pistão geram ondas de tensão compressivas que ao chegar no maciço rochoso ocasionam suas fraturas e a conseqüente formação de seus fragmentos de rocha. No caso do método TH essas ondas viajam por meio das hastes até chegar no *bit* e no caso das máquinas DTH elas agem diretamente sobre o *bit*. (Zhang, 2016; Gokhale, 2011).

A Figura 3.5 ilustra a localização do martelo para as perfuratrizes *Top hammer* e *Down the hole*.



Fonte: adaptada de Gokhale (2011).

As perfuratrizes pneumáticas apresentam certas vantagens: tecnologia tradicional e estabelecida, baixo custo de capital, simplicidade das peças mecânicas, fácil reparo e, em muitas minas, já existe um sistema de distribuição de ar comprimido (Hood e Roxborough, 1992; Hoseinie, 2014). Porém, a geração de um ambiente poluído ao operador (ruídos e fumaça) e a baixíssima eficiência (geralmente 5% da potência fornecida ao compressor chega até a rocha) são entraves dessas máquinas (Hood e Roxborough, 1992; Alonso, 1988).

As perfuratrizes de acionamento hidráulico conseguem superar bem esses pontos fracos das pneumáticas, pois elas conseguem uma eficiência energética de 25 a 30% e um nível de ruído de 8 a 10 decibéis inferior se comparado com as pneumáticas, e ainda não produzem fumaça (Hood e Roxborough, 1992). O fluido hidráulico utilizado no acionamento do sistema de percussão e rotação da broca de uma perfuratriz absorve o impacto e evita a deteriorização das peças acarretando em uma vida útil mais longa do equipamento (Catalani, 2007). O custo de capital mais alto e a tecnologia muito sofisticada podem ser considerados como desvantagens das hidráulicas (Hood e Roxborough, 1992).

O amplo alcance do tipo de rocha (macia a dura), a ampla faixa de diâmetros aplicados, versatilidade, fácil manutenção e um custo de aquisição não muito alto são alguns benefícios desse método (Jimeno, 2006).

### *3.2.3.1 Variáveis operacionais controláveis na perfuração percussiva*

Eficiência de perfuração ou perfurabilidade de rocha fundamenta-se em três grupos principais de parâmetros: parâmetros operacionais, parâmetros da perfuratriz e características da rocha (Reyes *et al*, 2015). Segundo Jimeno (2006) e Silva (2014) os principais parâmetros das perfuratrizes rotopercussivas, normalmente se baseiam em existem quatro sistemas: percussão, rotação, avanço (*thrust load* ou *pull down*) e limpeza.

#### *3.2.3.1.1 Percussão*

Consiste por impactos sucessivos das ondas de choque geradas através de golpes do pistão que podem agir sobre a coluna de perfuração como no caso da perfuratriz TH. Quando esses impactos ocorrem diretamente sobre o *bit* utiliza-se o método DTH (Jimeno, 2006).

Parte da onda de choque é transformada em trabalho e faz o bit penetrar na rocha enquanto outra parte é refletida através das hastes. Por depender de fatores como o tamanho e forma do pistão, características das hastes e/ou tubos, *design* do *bit* e do tipo de rocha é

trabalhoso avaliar a eficiência da transmissão dessas ondas. Além desses fatores, a energia de transmissão é perdida no rosqueamento e acoplamento das hastes em forma de calor e desgaste dessas ferramentas (Jimeno, 2006).

#### 3.2.3.1.2 Rotação

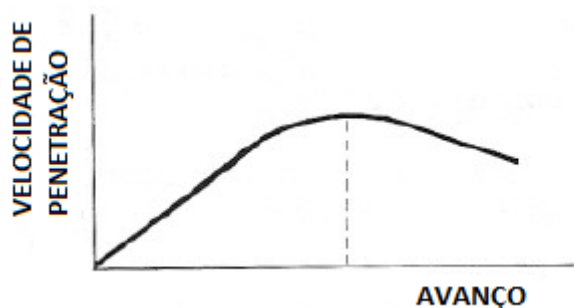
O movimento de rotação é o movimento responsável por girar o *bit* sobre seu próprio eixo e fazer com que a força aplicada sobre ele, o *pulldown*, atinja a superfície da rocha em diferentes posições no fundo do furo, através dos botões (Álvarez *et al*, 2011). Para que a resposta da força de indentação recebida pela rocha se complete, gasta-se um determinado tempo. Por isso o ajuste da velocidade de rotação no decorrer da perfuração se faz relevante (Hustrulid, 2013). De acordo com o autor, as rachaduras não se transmitem completamente na rocha quando se opera com altas velocidades de rotação (curto tempo de aplicação da força de indentação), antes que a carga seja removida.

#### 3.2.3.1.3 Avanço

Esse parâmetro é controlado pelo operador e é fornecido por um motor de avanço o qual deve ser adaptado por um tipo de rocha e um tipo de *bit*. (Jimeno, 2006).

O avanço quando não executado na medida certa pode gerar prejuízos para a perfuração. Baixas taxas de penetração, desgaste de (hastes e luvas), perda do rosqueamento e aquecimento do mesmo ocorrem quando se utiliza pouca carga de avanço. De outra forma ao utilizar um avanço excessivo a resistência a rotação é aumentada, a taxa de penetração é diminuída, aumenta-se o risco de perda de haste por enganchamento e o de ocorrência de desvio e aumenta-se o desgaste do *bit* (Zhang, 2016). A Figura 3.6 ilustra o comportamento da taxa de penetração com a variação do avanço no método TH (Jimeno, 2006).

Figura 3.6 - Efeito da taxa de penetração com a variação do avanço no método TH.



Fonte: Jimeno (2006).

O *pulldown* também é influenciado pelo ângulo do botão (*bit-tooth*). Esse fator é elevado com o aumento do ângulo do botão (*bit-tooth*) e mínimo quando o estado de lubrificação dos rolamentos está ótimo, durante a interação botão-rocha, e os botões dos *bits* estão lisos (Kahraman, 2000).

#### 3.2.3.1.4 Limpeza

Por meio desse fluido de limpeza, é feita a extração de detritos do fundo do furo, no espaço anelar existente entre as hastes e a parede do furo (Álvarez *et al*, 2011). Uma certa pressão de ar deve ser ajustada, e um volume de ar adequado deve chegar até o *bit* durante a perfuração, a fim de atingir uma alta taxa de penetração e/ou uma longa vida útil do *bit* (Hustrulid, 2013).

A pressão de ar insuficiente para levar os fragmentos de rocha até a superfície faz com que os detritos sejam quebrados em excesso e assim gerando maior desgaste do *bit*, diminuindo a taxa de penetração. Além desses problemas, uma limpeza inadequada aumenta o risco de enganchamento do furo (Jimeno, 2006).

O ar vindo do compressor passa pelo topo da coluna de perfuração e é transmitido por dentro das hastes até chegar ao *bit* (Hustrulid, 2013). A limpeza do furo pode ser feita por água e espuma além do ar. Em operações a céu aberto a limpeza, geralmente é feita com ar e utiliza-se coletores de pó. Em minas subterrâneas utiliza-se água como fluido de limpeza, porém a eficiência é diminuída em até 20%. A espuma é usada para carregar partículas maiores e ajuda a selar as paredes dos furos evitando o seu desmoronamento e, conseqüentemente, evita enganchamento de furos (Jimeno, 2006).

#### 3.2.3.1.1 Martelo de superfície (Top hammer - TH)

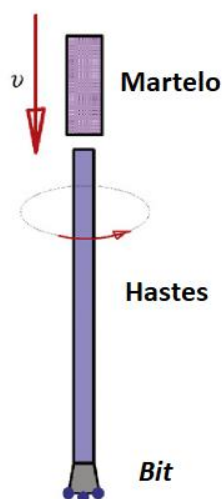
O esboço do método martelo de superfície (*Top Hammer – TH*) representando o martelo e sua velocidade de acionamento, as hastes e acomplamentos e os *bits* são representados na Figura 3.7.

Deve-se levar em consideração o comprimento do furo a ser feito na escolha do método de perfuração já que a transmissão de energia ocorrida pelo método TH é muito diferente do DTH. No método TH furos longos perde-se muita energia através das hastes, portanto, furos muito longos não são muito eficientes para esse método (Zhang, 2016).

A pressão máxima exercida pelo ar comprimido nesse método pode atingir até 8 bar. Essa pressão deve fornecer energia suficiente na área de trabalho do pistão. A área de trabalho do pistão, a pressão efetiva e o deslocamento do pistão são os três fatores impactantes na energia de impacto (Alonso, 1988).

As perfuratrizes que utilizam o método TH quando perfuram rochas mais duras geram taxas de penetração mais altas. As perfuratrizes TH podem ser aplicadas em obras civis, pedreiras, pequenas minas a céu aberto, e também em minas subterrâneas (Gokhale, 2011).

Figura 3.7 - Esboço do método martelo de topo (*Top hammer - TH*)

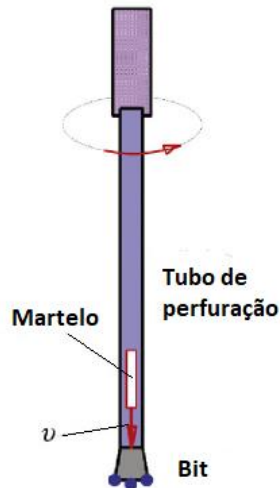


Fonte: adaptado de Zhang (2016).

### 3.2.3.1.2 Martelo de fundo (*Down the hole – DTH*)

No método martelo de fundo - DTH (*Down the hole*) a energia de impacto (percussão) é um mecanismo exclusivo do martelo. A rotação e o avanço são mecanismos independentes da percussão e ocorrem do lado de fora do furo. A Figura 3.8 ilustra a atuação desses mecanismos (Zhang, 2016; Alonso, 1988).

Figura 3.8- Esboço do método de perfuração martelo de fundo (*Down the hole* - DTH).



Fonte: adaptado de Zhang (2016).

A energia de impacto gerada pelos golpes do martelo (pistão) é usada na quebra da rocha e não se dissipa ao longo do tubo de perfuração (*drill pipe*) como acontece no método TH (*Top hammer*).

O método DTH apresenta limitações geométricas para o tamanho do martelo quando comparado com o método TH pois a área de trabalho do pistão no DTH é restrita ao tamanho do diâmetro do furo. Considerando um diâmetro de perfuração 104 mm o método TH, por exemplo, permite uma área de trabalho do pistão de 175-300 cm<sup>2</sup> enquanto que o método DTH permite uma área 5 a 6 vezes menor do que essa. Isso significa que se os métodos DTH e TH utilizarem diâmetros de perfuração iguais a potência de percussão obtida no método DTH será inferior àquela alcançada no método TH. Para se equiparar com o método TH o DTH utiliza-se de pressões medias de 10 a 14 bar e altas de 17 a 25 bar (Alonso, 1988).

Os martelos de diâmetro maiores das perfuratrizes DTH são mais efetivos do que os projetados para pequenos diâmetros e, dessa forma, martelos DTH projetados para diâmetros menores que 80 mm têm baixo desempenho (Alonso, 1988).

Para as perfuratrizes DTH a pressão de ar acionada sobre o pistão é diretamente proporcional a taxa de penetração (Zhang, 2016).

### 3.2.3.1 Rotativo (*Rotary*)



O aumento do material rochoso sobre a linha de minério a ser lavrado, chamado de *overburden*, em minas a céu aberto de carvão, nos Estados Unidos, e o surgimento de explosivos de alta eficiência energética, como o ANFO, foram eventos que incentivaram a indústria a produzir as perfuratrizes rotativas projetadas para grandes diâmetros e capazes de atingir altas taxas de penetração (Jimeno, 2006 e Park, 2016).

A fonte primária de energia dessas perfuratrizes pode ser: motor a diesel ou elétrico. Tendo em vista (Jimeno, 2006) a distribuição média de energia instalada nas perfuratrizes rotativas para diferentes operações e mecanismos, segue-se a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Fração energética dos mecanismos de perfuração.

<b>Operações e mecanismos</b>	<b>Fração energética (%)</b>
Movimentos de elevação e translação	18
Força de avanço ( <i>Pull down</i> )	3
Nivelamento	2
Coletor de pó	3
Limpeza e remoção de sedimentos com ar comprimido	53
Equipamento auxiliar	3
Rotação	18

Fonte: Jimeno (2006).

Os custos de manutenção das perfuratrizes elétricas comparado com o das máquinas de perfuração a diesel são mais baixos e representam de 10 a 15% do custo de uma perfuratriz a diesel. Adotam-se as perfuratrizes a diesel quando não há energia elétrica disponível e segura próxima ao local da operação (Jimeno, 2006).

Gokhale (2011) também traz uma base de classificação para as perfuratrizes rotativas a qual utiliza como critério a fonte de energia e sua distribuição: diesel-hidráulica, diesel-elétrica, elétrica-hidráulica ou elétrica-elétrica, totalizando quatro tipos. A primeira palavra de cada uma dessas combinações significa o tipo de fonte de energia, e a segunda palavra se refere à distribuição da mesma energia.

A rotação em perfuratrizes rotativas é gerada a partir de um motor elétrico ou hidráulico, dirigido por uma engrenagem, chamada de *cabeça rotativa*, que se move para cima e para baixo, ao longo da torre, por um sistema alimentador, gerando o avanço (*pull-down*) necessário para dar força suficiente sobre o *bit* (ATLAS COPCO DRILLING SOLUTIONS, 2015). A limpeza dos detritos originados da perfuração é feita, geralmente, por compressores de ar (Jimeno, 1995).

A perfuração rotativa destina-se, principalmente, à execução de grandes furos para grandes pedreiras, para minas a céu aberto, bem como à extração de petróleo e outras aplicações (Zhang, 2016). Esse tipo de perfuração pode ser subdividido em dois grupos: rotativa por esmagamento (*crushing*), feito por alta carga atuante em um único ponto na rocha por um *bit* tricônico; rotativa por corte (*cutting*), feito por *drag bits* que atuam através de forças cisalhantes (Zhang, 2016; Jimeno,2006). Geralmente, a perfuração rotativa por esmagamento, *tricone bits*, é indicada para rochas de média a duras, em realização de grandes furos, enquanto a rotativa por corte, *drag bits*, é mais usada para rochas brandas e em realização de pequenos furos, de até 25mm, tal como furos para instalação de *bolts* (Zhang, 2016 e Jimeno, 2006).

Pelo fato de a perfuração rotativa com *bits* tricônicos ser a mais utilizada (Jimeno,2006), ela será mais estudada neste trabalho. A Figura 3.9 ilustra a perfuração rotativa por esmagamento.

Figura 3.9 - Figura esquemática de perfuração rotativa por esmagamento.



Fonte: ATLAS COPCO DRILLING SOLUTIONS (2015).

Em minas a céu aberto, as perfurações rotativas com *bits* tricônicos utilizam diâmetros de 2” a 17<sup>1/2</sup>” (50 a 444 mm) (Jimeno, 2006 e Park, 2016) e furam com maior ocorrência na faixa de 6” a 12<sup>1/4</sup>” (152 a 311 mm). Os diâmetros inferiores a 6” são raramente usados, em razão do limite do desgaste do *bit* tricônico, devido ao tamanho reduzido de seus rolamentos,

enquanto os maiores diâmetros são limitados a minas com alta escala de produção (Jimeno,2006).

A perfuração rotativa se ajusta bem à execução de furos com diâmetros variando de 8” a 17” (203 a 445 mm), sendo, portanto, utilizada em grandes minas (Zhang, 2016).

Esse tipo de perfuração limita-se à execução de furos verticais, o que não favorece ao desmonte de rochas (Zhang, 2016).

### **3.2.3 Mecanismos da perfuração percussiva**

Para conhecer melhor a perfuração de rochas é preciso entender os processos de destruição das rochas, causados por ferramentas. O modo básico utilizado em grande parte das máquinas de escavação é a quebra da rocha (*rockbreakage*) feita pela penetração de uma cunha. As *indenters* e as *drag bits* são dois tipos essenciais de ferramentas para corte de rocha. A diferença entre o modo de aplicação desses tipos de ferramentas é a direção de aplicação de suas forças sobre a superfície da rocha. Enquanto as ferramentas *indenters* aplicam suas forças majoritariamente na direção normal em relação a superfície da rocha, as *drag bits* exercem suas forças praticamente paralelas à superfície da rocha. Os bits de perfuratrizes percussivas quebram a rocha por indentação (Hood e Roxborough, 1992).

### **3.2.4 Propriedades das rochas que afetam a perfurabilidade**

Para descrever a influência simultânea das propriedades mecânica, física e textural na taxa de penetração do sistema de perfuração, usam-se termos como “penetrabilidade” e “perfurabilidade” da rocha. Para tornar possível a previsão da taxa de perfuração, selecionar o método adequado de perfuração, especificar os parâmetros operacionais da perfuratriz, selecionar o tipo de *bit* e a sua avaliação de desgaste, é fundamental um vasto conhecimento da perfurabilidade da rocha (Hoseinie, 2009).

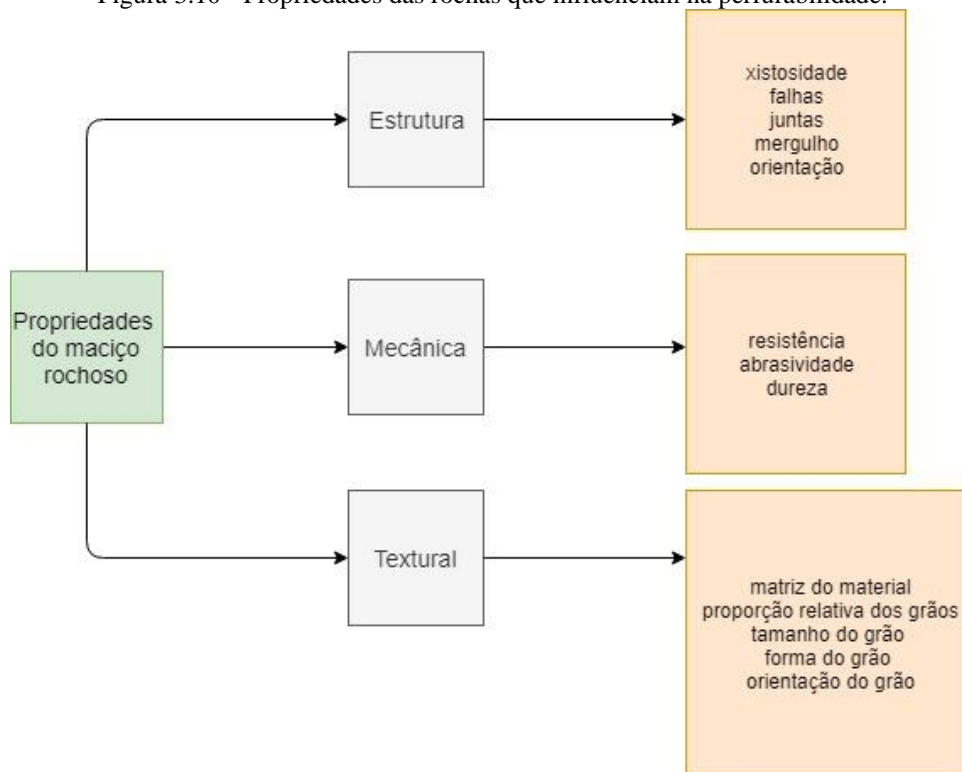
Hoseinie (2009) considera que, até o momento, não há nenhuma classificação compreensiva desenvolvida para a avaliação da perfurabilidade da rocha. Nesse sentido, o autor apresenta um sistema chamado *Rock Penetrability Index* (RPI). O autor destaca, também, que as propriedades das rochas, como resistência a coesão, tipo de matriz, qualidade da cimentação e alteração, também são parâmetros muito importantes na perfurabilidade das rochas.

Além dos parâmetros das perfuratrizes, o conhecimento das propriedades das rochas é fundamental para o entendimento da performance da operação de perfuração. Parâmetros como

resistência à compressão uniaxial da rocha, *uniaxial compressive strength* (UCS) e o índice de perfurabilidade, *drilling rate index* (DRI), interferem na performance da perfuração (Su, 2015). O autor ainda complementa que o número de falhas e presença de água são importantes na escolha do tipo de sistema de perfuração.

Baseado em Jimeno (2006), a estrutura, resistência, abrasividade, dureza, textura e tamanho do grão, bem como elasticidade são propriedades da rocha que afetam os mecanismos de perfuração e, por consequência, a eleição do método de perfuração Figura 3.10.

Figura 3.10 - Propriedades das rochas que influenciam na perfurabilidade.



Portanto, faz-se necessário o conhecimento das características do maciço rochoso na compreensão da perfurabilidade. A seguir, são descritas algumas das mais importantes características das rochas na perfurabilidade.

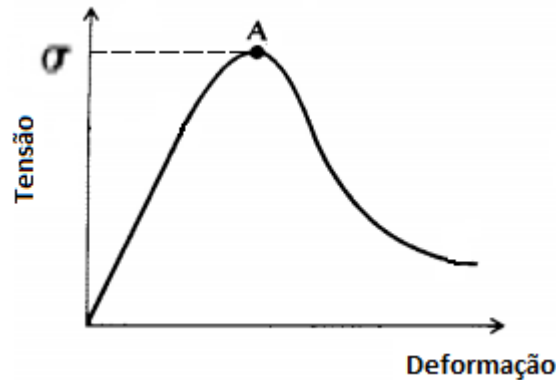
### 3.2.3.2 Estrutura

Diz respeito aos parâmetros da perfuração, como alinhamento dos furos, performance da perfuração e estabilidade das paredes dos furos dependem das características estruturais do maciço rochoso. O tipo de xistosidade, planos de acamamento, juntas e falhas e seu mergulho (*Dip*) e orientação (*Strike*) são algumas dessas estruturas (Jimeno, 2006).

### 3.2.3.3 Resistência

Essa propriedade diz respeito à tensão máxima ( $\sigma$ ), geralmente medida ao longo de um plano, que uma rocha consegue suportar antes de se destruir (Brady e Brown, 2005). Ela pode ser ilustrada na Figura 3.11 tensão-deformação a seguir pelo ponto A.

Figura 3.11 - Gráfico tensão-deformação demonstrando o pico de resistência.



Fonte: adaptada de Brady e Brown (2005).

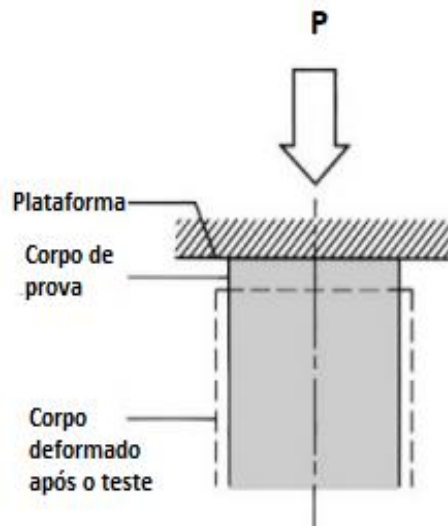
Para a determinação do parâmetro de resistência à compressão uniaxial, também usualmente abreviada por UCS (*uniaxial or unconfined compressive strength*), aplica-se uma carga  $P$  axialmente sobre um testemunho de sondagem cilíndrico de área  $A$  ilustrado na Figura 3.12. O testemunho obedece a uma razão, do comprimento pelo diâmetro, de 2,5 - 3. O teste é finalizado quando o testemunho sofre fratura e, então, determina-se a resistência da rocha (Brady e Brown, 2005).

De acordo com a comissão da sociedade internacional de mecânica de rochas, *International Society for Rock Mechanics* (ISRM), em padronização de laboratório e testes de campo o parâmetro UCS é dado pela expressão 3.15 (Ersoy e Waller, 1995).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.15)$$

O valor da tensão  $\sigma$  no momento da fratura corresponde ao parâmetro UCS, o valor de  $P$  refere-se a carga aplicada medida em Newton (N) e o valor de  $A$  refere-se a área de aplicação da carga sobre o testemunho dada em metro quadrado (m<sup>2</sup>).

Figura 3.12 - Desenho esquemático do teste UCS.



Fonte: adaptada de Brady e Brown (2005).

A distribuição dos minerais constituintes em uma rocha é um agente fundamental de sua resistência. Nesse sentido, considerando-se alguns minerais formadores de rochas, observa-se que a calcita tem uma baixa resistência, variando de 10 a 20 Mpa; os aluminos silicatos e silicatos ferromagnesianos têm uma resistência intermediária, entre 200 e 500 Mpa; os valores da resistência do quartzo chegam a superar 500 Mpa. Dessa forma, conclui-se que a resistência de uma rocha aumenta com a porcentagem de quartzo formado por ela (Jimeno, 2006).

A resistência a compressão também é afetada pela profundidade e grau de metamorfismo das rochas. Dessa maneira, verifica-se que as camadas de argilas mais superficiais apresentam resistências de 2 a 10 Mpa, enquanto rochas argilosas metamorfozadas apresentam resistências que podem atingir a faixa de 50 a 100 Mpa (Jimeno, 2006).

No âmbito das características de fraturas, deformação e resistência, o parâmetro UCS é o mais amplamente utilizado e, portanto, de cortabilidade (Ersoy e Waller, 1995).

O UCS é um parâmetro de rocha muito importante para avaliação de perfurabilidade, por ser utilizado em parâmetros de qualidade das rochas, como tipo de matriz e cimentação, consistindo, portanto, em um teste muito disponível e aceito (Hoseinie, 2009). Segundo Bieniawski, citado por Hoseinie (2009), o parâmetro UCS, em comparação com os demais, é o que melhor descreve o comportamento das rochas atingidas pelas ferramentas de perfuração durante esse processo.

#### 3.2.3.4 Abrasividade

A perda de massa, ou desgaste de material, ocasionada pela interação entre as ferramentas de perfuração e o maciço rochoso é considerada o parâmetro de abrasividade da rocha, conforme a norma ASTM D7625-10 da sociedade americana para testes e materiais, *American Society for testing and materials* (ASTM). Por se tratar do consumo de ferramentas e por influenciar, também, nos custos e no cumprimento dos cronogramas dos projetos, a abrasividade possui grande relevância nos cálculos da perfuração (Piazzetta, 2017; Monteiro e Rocha, 2014; ASTM D7625-10, 2010).

Segundo Hoseinie (2009), a abrasividade é um fator que afeta fortemente as taxas de perfuração e ferramentas de desgaste. Consideram-se, nesse cenário, cinco tipos de desgaste: abrasivo, adesivo, erosivo, corrosivo e por fadiga da superfície (Piazzetta, 2017).

O desgaste em que uma superfície dura e rugosa passa por uma superfície macia é o desgaste abrasivo (Piazzetta, 2017). Alguns pontos, como dureza dos minerais constituintes, características e tamanho dos grãos, composição mineralógica, forma e angularidade, impactam na abrasividade (Ersoy e Waller, 1995; Hoseinie, 2009). O tipo do material da matriz ou o tipo de cimentação, resistência, dureza e energia específica também influenciam na abrasividade da rocha. O índice de abrasividade de impacto dinâmico, *dynamic impact abrasive index* (DIAI), o fator de abrasividade-F de Schimazek e o índice de abrasividade Cerchar, *Cerchar abrasive index* (CAI) são exemplos de testes de abrasividade (Ersoy e Waller, 1995).

### 3.2.3.5 Dureza

A propriedade que demonstra a facilidade com que a superfície de um mineral pode ser riscada é a dureza. Partindo desse conceito, Friedrich Mohs, um mineralogista austríaco, construiu, em 1822, uma escala de dureza chamada de Escala de Dureza de Mohs. Quanto mais duro é um mineral, mais forte são suas ligações químicas (Press *et al*, 2006). Ersoy e Waller (1995a) utilizaram a análise de regressão linear multivariada para prever a performance de um *bit* de perfuração, tendo a Escala de Dureza de Mohs como um dos parâmetros. O parâmetro de Mohs, demonstrado na Tabela 3.2, contudo, não pondera a resistência de ligação da matriz rochosa, o que é uma desvantagem na utilização desse parâmetro para previsão da perfurabilidade (Ersoy e Waller, 1995). Veja-se, como exemplo do exposto, se uma rocha for formada de quartzo em sua maioria, sabe-se que essa rocha é uma rocha dura.

Tabela 3.2 - Escala de dureza de Mohs.

<b>N° na escala</b>	<b>Mineral</b>
1	Talco
2	Gipsita
3	Calcita
4	Fluorita
5	Apatita
6	Ortoclásio
7	Quartzo
8	Topázio
9	Coríndon
10	Diamante

Fonte: Press (2006).

Segundo Jimeno (2006), a dureza e resistência à compressão têm uma certa correlação, que é demonstrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Correlação entre dureza e resistência à compressão.

<b>Classificação</b>	<b>Escala de Dureza de Mohs</b>	<b>Resistência à compressão (Mpa)</b>
Muito Dura	+7	+200
Dura	6-7	120-200
Medianamente dura	4,5-6	60-120
Medianamente macia	3-4,5	30-60
Macia	2-3	10-30
Muito macia	1-2	-10

Fonte: adaptada de Jimeno (2006).

### 3.2.3.6 Textura

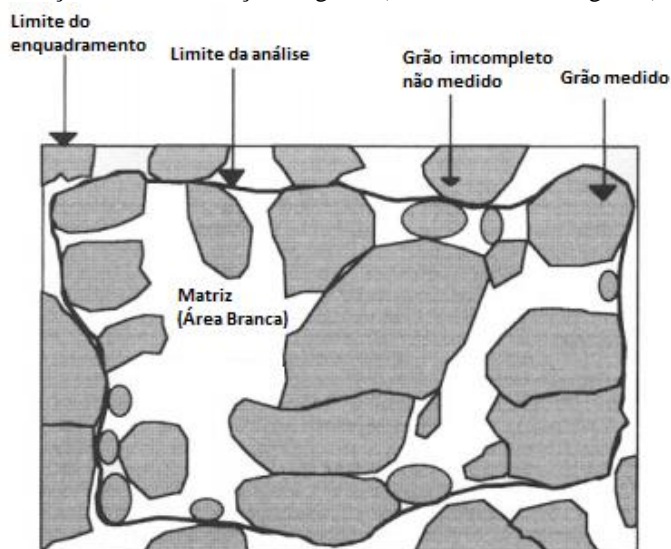
O tamanho absoluto e relativo, a forma e as relações espaciais entre os cristais minerais definem a textura de uma rocha ígnea (SGARBI P. B. A., 2007). Em termos de forma, disposição (orientação e aglutinação) e tamanho, a textura é o aspecto físico e o arranjo dos elementos das rochas sedimentares (SGARBI G. N. C., 2007). Ersoy e Waller (1995) definem a textura da rocha como as propriedades geométricas das partículas da rocha. Segundo o mesmo autor para uma previsão da performance de corte e da perfuração, a textura é uma das principais propriedades do comportamento das rochas.

A matriz do material, proporção relativa dos grãos, tamanho do grão, forma e orientação do grão, são as principais características texturais. Ersoy e Waller (1995) utilizaram-se, para



avaliar as partículas das rochas, um sistema de análise de imagens em que são realizadas medições quantitativas, como demonstrado a Figura 3.13.

Figura 3.13 - Esboço de uma fina seção de grãos (obtida de uma fotografia) de um arenito.

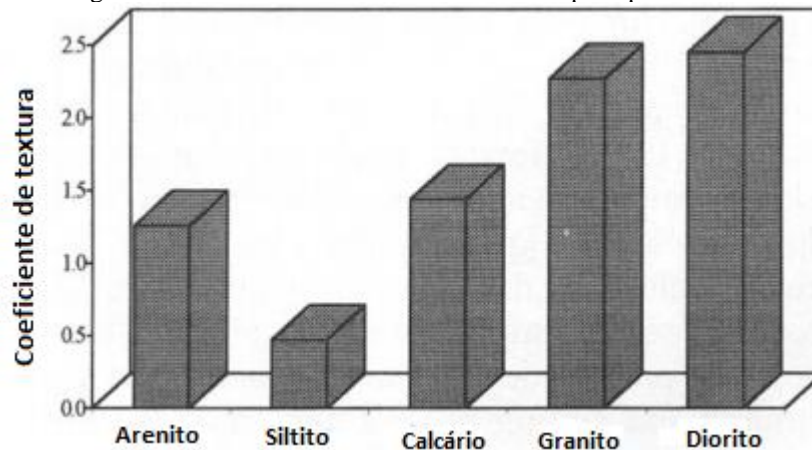


Fonte: Ersoy e Waller (1995).

Dados quantitativos, assim como orientação (ângulo), comprimento do grão, largura do grão, perímetro, porcentagem da área dos grãos e da matriz e área de cada grão em cada fotomicrografia (fotografia retirada de um microscópio), são sintetizados em um parâmetro, o coeficiente de textura, *texture coefficient* (TC) o qual a sua expressão que pode ser conferida em (Ersoy e Waller, 1995). Esse coeficiente representa a interação entre o *bit* de perfuração e a estrutura da rocha (Ersoy e Waller, 1995).

No estudo de Ersoy e Waller (1995), foram calculados os TC para cinco litologias (arenito, siltito, calcário, granito e diorito). Dentre elas, as rochas cristalinas (magmáticas) apresentaram alto coeficiente de textura, enquanto as outras três médias abaixo. A Figura 3.14 mostra o coeficiente de textura por litologia.

Figura 3.14 - Gráfico do coeficiente de textura por tipo de rocha.



Fonte: Ersoy e Waller (1995).

As análises das rochas cristalinas (granito e diorito), no mesmo estudo, mostraram que altos coeficientes de textura se relacionam a baixas taxas de penetração, quando comparadas às rochas sedimentares. Ersoy e Waller (1995 a, b, c) constatam, em seus trabalhos, que as partículas mais rugosas, angulosas e alongadas resultam em maiores taxas de desgaste e baixas taxas de perfurabilidade (Ersoy e Waller, 1995).

### 3.2.3.7 Módulo de Elasticidade (Módulo de Young)

Considera-se a lei de Hooke para analisar o comportamento elástico – frágil – da maioria das rochas, que apresentam uma relação linear na região de elasticidade em um diagrama tensão-deformação (Jimeno, 2006). Segundo Hibbeler (2004), essa lei foi descoberta por Robert Hooke, em 1676, e é representada pela seguinte fórmula:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.16)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão normal aplicada;  $E$  é a constante de proporcionalidade, o que chamamos de módulo de elasticidade ou módulo de Young;  $\varepsilon$  a deformação.

A razão entre a tensão aplicada na rocha e a deformação correspondente, o módulo de elasticidade, dependendo do tipo da composição mineralógica, porosidade, tipo de deformação e magnitude da força aplicada pode variar entre  $0,03 \times 10^3 \text{ Mpa}$  e  $1,7 \times 10^5 \text{ Mpa}$  na maioria das rochas (Jimeno, 2006).

A deformabilidade do maciço rochoso tem um grande impacto na perfurabilidade, sendo que ela descreve o comportamento da rocha no seu processo de fratura. O módulo de Young é o melhor indicador para a deformabilidade da rocha. Foi concluído em pesquisas anteriores à de Hoseinie (2009) que o aumento do módulo de Young acontece com o declínio da penetrabilidade e das taxas de perfuração (Hoseinie, 2009).

### **3.2.5 Diâmetro do furo (ou do Bit)**

O diâmetro do *bit* ou diâmetro dos furos é o principal parâmetro nas diretrizes das operações de perfuração e desmonte de rochas em minas a céu aberto. Na prática, o diâmetro da perfuração afeta diretamente as taxas de penetração e o afastamento, *burden*, da malha para as operações de perfuração e desmonte de rochas (Abbaspour *et al*, 2018).

O diâmetro do furo também é um dos principais fatores na escolha do método de perfuração. Geralmente, na perfuração por martelo de superfície, TH, utilizam-se os menores diâmetros, variando entre 38 e 150 mm; na perfuração DTH, utilizam-se diâmetros intermediários, variando de 89 a 250 mm; na perfuração rotativa (*Rotary*), utilizam-se os maiores diâmetros, que variam de 150 a 445 mm (Gokhale, 2011).

Diâmetro muito grande (por exemplo, maior que 300 mm) não deve produzir uma fragmentação melhor e mais eficiente, uma vez que a distribuição de energia e ondas na rocha fica longe de ser uniforme. Similarmente, pequenos furos não devem levar a uma melhor fragmentação, pois a velocidade de detonação em pequenos furos será muito mais baixa (Zhang, 2016).

Até então, os diâmetros dos furos de detonação têm sido determinados empiricamente, já que não há método teórico disponível. Nesse caso, para escolher o diâmetro mais adequado, é necessário considerar os fatores relevantes para os furos de detonação, dentre os quais os apresentados nas seções seguintes (Zhang, 2016).

### **3.2.6 Indicadores de vida útil das brocas**

Quando a perda de tamanho nos dentes do *bit* é intolerável ou, em outros casos, a taxa de penetração cai a um nível inaceitável, o operador deve saber quando a perfurabilidade chega a um nível mínimo (Gokhale, 2011).

As brocas tricônicas apresentam três cones, que se tocam entre si, com uma linha de dentes de um cone conectada com as outras duas linhas dos outros dois cones. Esse acréscimo

do terceiro cone fez com que a perfuração se tornasse mais macia e rápida e as taxas de penetração e a vida útil dos *bits* duplicassem. A utilização da circulação de ar, ao invés de água, para limpeza dos furos também aumentou as taxas de penetração e vida útil dos *bits* de perfuração rotativas. A inserção dos *bits* com dentes de carbetto de tungstênio aumentou de três a dez vezes a sua resistência e a quebra de materiais como o quartzo na perfuração (Hustrulid, 2013).

### **3.2.7 Determinação da velocidade de penetração para o método percussivo**

Em uma mina ou pedreira, um prognóstico preciso da taxa de perfuração dos furos de desmonte ajuda a fazer, de maneira mais eficiente, o planejamento operacional da perfuração (Kahraman *et al*, 2000). Um dos conceitos mais importantes na operação de perfuração e que afeta significativamente todo o processo da operação e planejamento de mina é a taxa de penetração (Abbaspour *et al*, 2018). Segundo Jimeno (2006) considerando o método de perfuração rotopercussivo a velocidade de penetração (velocidade de perfuração) tem seu desempenho influenciado pelos seguintes fatores:

- Geomecânicos, de abrasividade das rochas e características mineralógicas das rochas;
- Comprimento do furo;
- Tipo de máquina e condições de trabalho;
- Carga de avanço sobre o bit;
- Energia de percussão sobre a perfuratriz;
- Limpeza do furo;
- Eficiência da operação.

Baseado no mesmo autor a velocidade de penetração pode ser prevista pelos seguintes procedimentos:

- A partir de taxas atingidas em outras situações fazer uma extrapolação de dados;
- Equações empíricas;
- Testes de laboratório baseado em amostras representativas (mais preciso e confiável dentre os três).

#### **a) Extrapolação de dados**

A estimativa de uma velocidade de penetração pode ser estimada partindo de outra já conhecida com um certo diâmetro e uma mesma máquina consultando uma tabela de conversão para diferentes diâmetros. A Tabela 3.4 de conversão utiliza fatores de conversão para

diâmetros entre 38 mm e 127 mm e o fator de correção pode ser obtido pela seguinte relação (Jimeno, 2006):

$$F = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{1.5} \quad (3.17)$$

onde  $D_1$  é o diâmetro (mm) do qual se conhece a taxa de penetração (m/h),  $D_2$  é o diâmetro (mm) que se pretende obter a taxa de penetração e F é o fator de conversão.

Tabela 3.4 - Fatores de conversão para diâmetros diferentes.

<b>DIÂMETRO DO FURO (mm)</b>	<b>127</b>	<b>114</b>	<b>102</b>	<b>89</b>	<b>76</b>	<b>70</b>	<b>64</b>	<b>57</b>	<b>51</b>	<b>48</b>	<b>44</b>	<b>41</b>	<b>38</b>
<b>127</b>	1	1.17	1.4	1.71	2.15	2.46	2.83	3.31	3.96	4.35	4.82	5.41	6.1
<b>114</b>	0.85	1	1.19	1.45	1.83	2.09	2.41	2.82	3.37	3.71	4.11	4.61	5.19
<b>102</b>	0.72	0.84	1	1.22	1.54	1.75	2.02	2.36	2.83	3.11	3.45	3.86	4.35
<b>89</b>	0.59	0.69	0.82	1	1.26	1.44	1.65	1.94	2.32	2.55	2.82	3.17	3.56
<b>76</b>	0.46	0.55	0.65	0.79	1	1.14	1.31	1.54	1.84	2.02	2.24	2.51	2.82
<b>70</b>	0.41	0.48	0.57	0.7	0.88	1	1.15	1.35	1.61	1.77	1.97	2.2	2.48
<b>64</b>	0.35	0.42	0.5	0.61	0.76	0.87	1	1.17	1.4	1.54	1.71	1.91	2.15
<b>57</b>	0.3	0.35	0.42	0.52	0.65	0.74	0.85	1	1.19	1.31	1.46	1.63	1.84
<b>51</b>	0.25	0.3	0.35	0.43	0.54	0.62	0.72	0.84	1	1.1	1.22	1.37	1.54
<b>48</b>	0.23	0.28	0.32	0.39	0.49	0.56	0.65	0.76	0.91	1	1.11	1.24	1.4
<b>44</b>	0.21	0.24	0.29	0.35	0.45	0.51	0.59	0.69	0.82	0.9	1	1.12	1.26
<b>41</b>	0.19	0.22	0.26	0.32	0.4	0.45	0.52	0.61	0.73	0.81	0.89	1	0.08
<b>38</b>	0.16	0.19	0.23	0.28	0.34	0.4	0.46	0.54	0.65	0.72	0.79	0.89	1

Fonte: Jimeno (2006).

### b) Equações empíricas

Segundo Jimeno (2006) utilizando uma energia de impacto disponível do martelo (POT) em kW e um certo diâmetro do furo (D) em mm para um determinado tipo de rocha tal qual granito barre de Vermont (Estados Unidos) consegue-se obter a velocidade de penetração (VP) em m/min através da expressão 3.18:

$$VP = 31 \times \frac{POT}{D^{1.4}} \quad (3.18)$$

Segundo Jimeno (2006) para rochas com resistência a compressão acima de 80 Mpa e utilizando máquinas DTH sem válvulas pode-se obter uma velocidade de penetração (VP) (m/h) seguindo a expressão 3.19:

$$VP = \frac{43 \times p_m^{1/2} \times d_p^2}{RC^{\left(\frac{3.5}{RC}+1\right)} \times D^2 \times D^{1/D}} \quad (3.19)$$

Onde  $p_m$  = pressão de ar na entrada do martelo em libras/pol<sup>2</sup>,  $d_p$  = diâmetro do pistão dado em pol,  $D$  = diâmetro do furo em pol,  $RC$  = resistência a compressão uniaxial em (libra/pol<sup>2</sup> /100).

**c) Testes de laboratório baseado em amostras representativas**

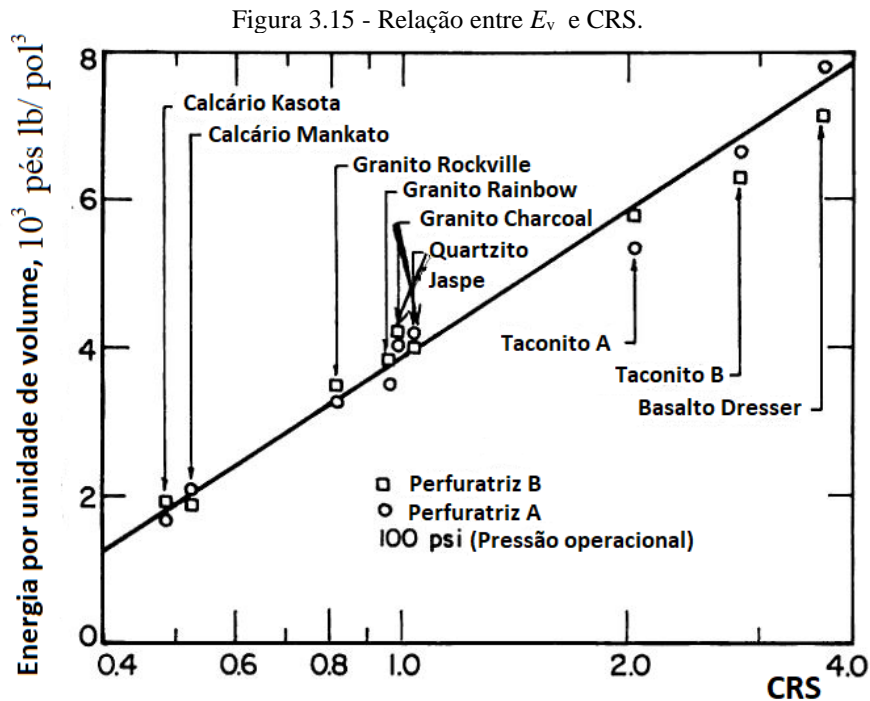
i) Método da energia específica (Bureau of mines – Estados Unidos)

O método da energia específica testa o resultado do impacto da queda de um peso de 2,4 kg a uma altura de 0,6 m sobre uma amostra colocada sobre um fundo cilíndrico oco afim de determinar a energia por unidade de volume ( $E_v$ ) e o coeficiente de resistência da rocha, *coefficient of rock strength* (CRS). O material quebrado no impacto é recolhido, peneirado em 0,5 mm (38 mesh) e o passante é pesado e dividido pelo peso específico para obter o volume. O valor do CRS é determinado dividindo o volume de cinco amostras pelo número de quedas utilizadas na fragmentação do material (Paone *et al*, 1969). As rochas mais duras necessitam de mais quedas podendo variar entre 3 e 40 dependendo da resistência da rocha. Baseado em Paone *et al* (1969) a partir do teste calcula-se a velocidade de penetração (VP) pela expressão 3.20:

$$VP = \frac{4 \times P}{\pi \times D^2 \times E_v} \quad (3.20)$$

onde  $VP$  = Velocidade de penetração (pol/min),  $P$  = Potência da perfuratriz em (pol·lb)/min,  $D$  = Diâmetro do bit (pol), e  $E_v$  = Energia necessária para produzir um volume de rocha (pol·lb)/pol<sup>3</sup>. A relação entre  $E_v$  e o CRS é descrita pela expressão 3.21 e pode ser conferida para alguns tipos de rochas através da Figura 3.15. Essa expressão é válida apenas para *bits* cruzados (*cross type-bit*) (Tandanand e Unger, 1975).

$$E_v = 3860 + 2744 \cdot \ln CRS \quad (3.21)$$



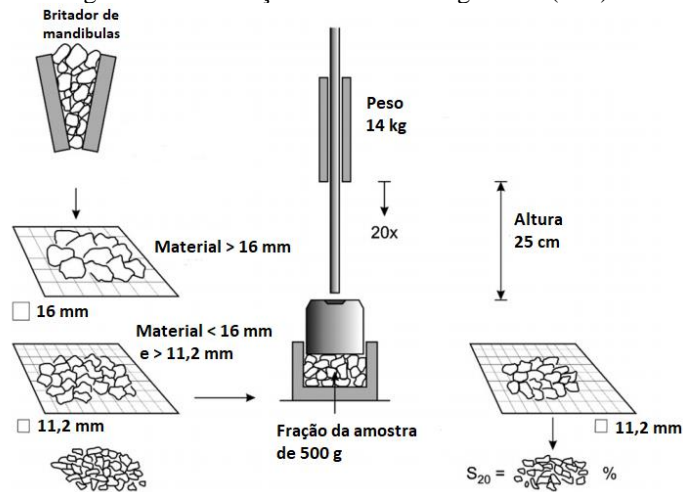
Fonte: Jimeno (1995).

## ii) Índice da Taxa de Perfuração - *Drilling rate index* (DRI)

Com o objetivo de prever a taxa de penetração desenvolveu-se em 1979, na Universidade de Trondheim (Noruega) o índice da taxa de perfuração, *Drilling rate index* (DRI), que significa uma mensuração da facilidade ou dificuldade de perfurar uma rocha (Yenice, 2019). Esse índice se baseia em dois testes que se realizam a partir de amostras de rocha de 15 a 20 kg explicados a seguir (Jimeno, 1995).

O primeiro, Teste de Fragilidade (*Brittleness Test*) também conhecido como “Teste de Fragilidade Sueco” como ilustrado na Figura 3.16 é um bom método de medição da competência da rocha de resistir a britagem por impactos sucessivos (Bruland, 2000). Para esse utiliza-se uma fração da amostra de 500g em uma faixa granulométrica entre 11,2 e 16,0 mm. Deixa-se um peso de 14 kg cair sobre essa fração de uma altura de 25 cm. Esse procedimento é repetido de 3 a 4 vezes e o valor médio da porcentagem do material passante em uma peneira de 11,2 mm é anotado. Esse valor corresponde ao parâmetro  $S_{20}$  (Jimeno, 2006).

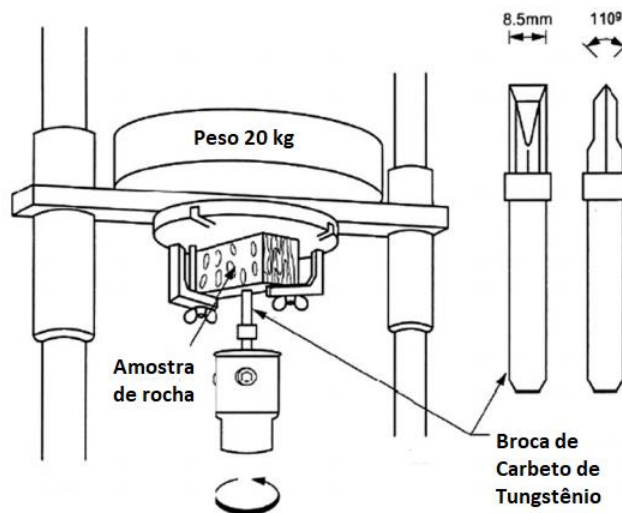
Figura 3.16 - Esboço do Teste de Fragilidade (S20).



Fonte: Jimeno (2006).

O segundo experimento, o teste de perfuração, valor SJ (*Sievers's J-value*), ilustrado na Figura 3.17 fornece a medida da dureza de superfície (resistência a indentação) de uma rocha (Jimeno, 2006; Bruland, 2000). O método utiliza-se de uma miniperfuratriz de 8,5 mm de diâmetro e 110° do ângulo da broca (*bevel angle*). Aplica-se uma força de avanço (*thrust*) de 20 kg e executa 200 rotações sobre a rocha. São realizados de 4 a 8 testes. Ao final do teste obtém-se o segundo parâmetro na determinação do DRI, o comprimento dos furos. Esse é expresso na ordem de grandeza de décimos de milímetros (1/10 mm) e é chamado de valor S-J (*Sievers's J value*) (Dahl *et al*, 2011).

Figura 3.17 - Esquema do Teste de perfuração *Siever's J value*.

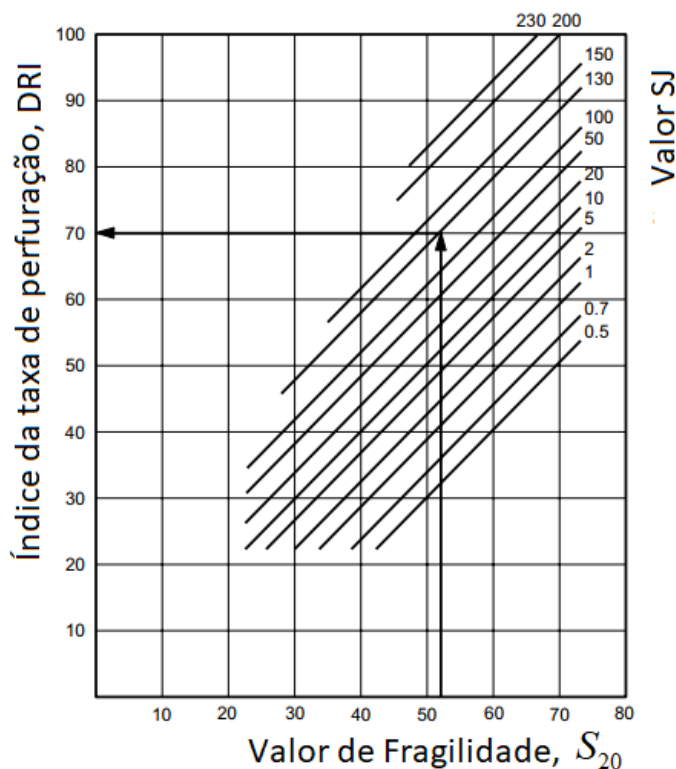


Fonte: Jimeno (1995).



A partir do ábaco da Figura 3.18 avalia-se o DRI proveniente do valor de fragilidade  $S_{20}$  (*Brittleness value*) e o valor SJ (*Siever's J value*) (Bruland, 2000).

Figura 3.18 - Ábaco para avaliação do DRI.



Fonte: Bruland (1998).

Segundo Bruland (2000) mais de 2000 amostras foram obtidas para obter a classificação do DRI. Obtidos os valores de DRI pode-se consultar a classificação por categoria de acordo com a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Classificação do DRI por categoria.

<b>Categoria</b>	<b>DRI</b>
Extremamente baixo	-25
Muito baixo	26-32
Baixo	33-42
Médio	43-57
Alto	58-69
Muito Alto	70-82
Extremamente alto	82-

Fonte: Bruland (2000).

iii) Índice de perfurabilidade, *drillability Index* ( $I_p$ )

Segundo Jimeno (2006), com o propósito de imitar o fenômeno real de uma percussão rotativa através de uma perfuratriz elétrica que se move ao longo de uma estrutura e executa uma força de avanço constante sobre a rocha a ser estudada realiza-se o teste de determinação do  $I_p$  na escola técnica superior de engenheiros de minas de Madri (ETS).

Para a preparação das amostras, deixa-se a superfície polida e coloca-se em um pote preenchido de gesso para fixá-la bem no lugar, com a superfície paralela a base. Os furos são controlados por um temporizador elétrico e duram de 3 a 5 segundos. Furam-se três ou quatro furos com diâmetro de 9,5 mm. A poeira é eliminada por um compressor de ar. As medidas dos comprimentos dos furos são realizadas por uma sonda micrométrica a fim de obter o valor médio. O índice de perfurabilidade, *drillability index* ( $I_p$ ) é expresso em polegadas por minuto assim como a taxa de penetração (Jimeno, 2006).

Propõe-se que para diferentes tipos de *bits*, configurações de martelos e diâmetros a verdadeira taxa de penetração pode ser estimada obedecendo as seguintes etapas (Jimeno, 2006):

1. Obter o índice de perfurabilidade  $I_p$  da rocha no laboratório de testes.
2. Definir as configurações do martelo:  $E_g =$  Energia por golpe (libras×pés) ,  
 $n_g =$  número de golpes por minuto.
3. Determinar o comprimento da cunha de corte  $L_f$  da broca. O valor de  $L_f$  para *bits* com inserções (*insert bits*) segue a expressão 3.22.

$$L_f = 1,7D - 0,7 \quad (3.22)$$

onde  $D$  é o Diâmetro do *bit*.

Considera-se no cálculo da velocidade de penetração (VP), que para *bits* de botões, a VP obtida para o diâmetro estudado deve ser multiplicada por 1,15. Caso seja utilizado uma broca chanfrada (*bevel bits*) multiplica-se VP por 0,85. A velocidade de penetração (VP), portanto, considerando o índice de perfurabilidade  $I_p$  é dada pela expressão 3.23.

$$VP = \frac{E_g \times n_g}{D \times L_f^{1/2}} \times 10^{-6} (51 \times I_p + 90) \quad (3.23)$$

A velocidade de penetração da broca sobre a rocha perfurada é diretamente proporcional à quantidade de rocha efetivamente demolida dentro do furo por unidade de tempo, ao passo que a quantidade de rocha demolida no furo é proporcional à energia de percussão transmitida à broca na unidade de tempo (Alonso, 2013; Ricardo e Catalani, 2007). Por outro lado, o avanço e a rotação são apenas sistemas auxiliares, que, sempre e quando atingem certos valores mínimos suficientes para espaçar convenientemente os pontos de incidência dos impactos e manter o *bit* em contato com a rocha, afetam relativamente pouco a velocidade de perfuração (Alonso, 2013).

Segundo Ricardo e Catalani (2007), a energia cinética transmitida ao punho da broca resulta do movimento do pistão produzido pelo ar comprimido. Admitindo-se, para maior simplicidade, pressão constante sobre a superfície da cabeça do pistão, a velocidade de penetração (VP) é dada pela expressão 3.24.

$$VP = K \times P \times V \times D^2 \quad (3.24)$$

Onde,

VP = Velocidade de penetração (cm/min)

K = Constante

P = Pressão na cabeça do pistão (Kg/cm<sup>2</sup>)

V = Velocidade de impacto do pistão (m/s)

D = Diâmetro da cabeça do pistão em (cm)

### ***3.2.8 Velocidade de penetração, velocidade de penetração média e taxa de penetração média***

Além da eficiência organizacional da operação, a velocidade média de perfuração em um longo período de trabalho depende dos seguintes fatores (Jimeno, 2006):

- Profundidade dos furos
- Tempo de manobra

A influência da profundidade dos furos se enquadra somente para as perfuratrizes TH visto que nesse caso o martelo transmite a energia sobre a coluna de perfuração. O comprimento dos furos influencia diretamente na quantidade de hastes e acoplamentos a serem utilizados na

coluna de perfuração que por sua vez impactam na velocidade de penetração devido as perdas de energia (Jimeno, 2006).

A quantidade de hastes e acoplamentos usados na coluna de perfuração variam de acordo com o comprimento dos furos que impactam na velocidade de penetração devido a dissipação de energia. 3% da energia transmitida é perdida por reflexões das ondas de impacto, e 5,5% é dissipada por calor gerado na fricção que ocorre nos acoplamentos entre hastes. A transmissão das ondas de choque também causa fricções internas na coluna de perfuração e por sua vez elevação na temperatura. Essas perdas variam entre 0,2 a 0,4% por haste adicionada (Jimeno, 2006).

Calcula-se a velocidade de penetração média ( $VP_m$ ) considerando as perdas de energia 9% e o número de hastes utilizadas através da expressão 3.25 (Jimeno, 2006):

$$VP_m = \frac{VP}{N_v} \times \frac{1 - 0,91^{N_v}}{0,09} \quad (3.25)$$

onde  $N_v$  = número de haste usadas,  $VP$  = velocidade de penetração com a primeira haste.

No caso das perfuratrizes DTH a profundidade do furo praticamente não influencia na velocidade de penetração ( $VP$ ), visto que a energia de percussão fornecida pelo martelo não é aplicada sobre a coluna de perfuração. A energia é aplicada diretamente sobre o *bit* e a coluna de perfuração realiza apenas a condução do ar e a rotação (Jimeno, 2006).

Após o cálculo de  $VP_m$  alguns tempos improdutivos devem ser considerados tais como o deslocamento da perfuratriz entre um furo e outro, posicionamento e nivelamento da máquina, centralização da lança, mudanças e retirada de hastes, limpeza e enganchamento dos furos, etc. (Jimeno, 2006). Denomina-se nesta dissertação de taxa de penetração média ( $TP$ ) para as perfuratrizes TH o cálculo feito sobre  $VP_m$  levando em conta essas considerações. No caso das perfuratrizes DTH para obter a  $TP$  esses tempos improdutivos devem ser aplicados diretamente sobre a  $VP$ .

A Tabela 3.6 apresenta alguns tempos médios de perfuratrizes com e sem troca automática de hastes.

Tabela 3.6 - Tempos médios para troca de hastes.

	<b>Troca de hastes</b>	
	<b>Manual</b>	<b>Automático</b>
Tempo para colocar haste	1,0 min	0,9 min
Tempo para retirar a haste	1,5 min	1,0 min
Tempo total de haste	2,5 min	1,9

Fonte: Jimeno (2006).

A Tabela 3.7 apresenta outros tempos médios de manobras.

Tabela 3.7 - Tempo médios de manobras.

<b>Operação</b>	<b>Tempo</b>
Mudança de furo	3 min
Posicionamento e centralização	1 min
Limpeza do furo	1 min

Fonte: Jimeno (2006).

### 3.2.9 Seleção do bit

Segundo (Jimeno, 2006) para o método rotativo percussivo existem basicamente dois tipos de *bits*:

- *Bit* de botões (*button bits*) e;
- *Bit* de inserções (*insert bits*).

Algumas características comuns desses *bits*: fazem contato direto com as hastes através de roscas e assim é possível a transmissão da energia de impacto até a rocha; tem aberturas em seu centro e na lateral para que o fluido de limpeza possa passar e são levemente cônicos onde a sua base é mais larga para evitar desgaste e excessiva adesão a parede do furo (Jimeno, 2006).

Os *bits* de botões têm botões ou inserções cilíndricas de carbeto de tungstênio na superfície de contato com a rocha podendo se dispor em vários padrões. O diâmetro de fabricação desse tipo de *bit* varia de 50 a 251 mm. Já os *bits* de inserções se apresentam em dois padrões básicos, o *cross bit* e o *x-bit*. O primeiro se consiste de quatro inserções de carbeto de tungstênio dispostas entre si por ângulos de 90 graus enquanto que o *x-bit* tem quatro inserções em ângulos de 75 e 10 graus (Jimeno, 2006).

Destacam-se também os *bits* retrac que são usados em formações rochosas nas quais a parede do furo costuma colapsar. Esse *bit* evita enganchamento de hastes. O *bit* balístico que tem botões em forma de balas fornece velocidades de penetração mais altas e melhor eficiência na limpeza (Jimeno, 2006).

## 3.3 Simulação

### 3.3.1 A origem da simulação

Segundo Prado (2010) a abordagem de filas se iniciou no princípio do Século XX (1908), em Copenhague, Dinamarca, com A.K. Erlang, considerado o pai da teoria das filas, quando trabalhava em uma companhia telefônica e estudava o problema de redimensionamento de centrais telefônicas. Foi somente a partir da Segunda Guerra Mundial que a teoria foi aplicada a outros problemas de filas. Apesar do enorme progresso alcançado pela teoria, inúmeros problemas não são adequadamente resolvidos, em decorrência de complexidades matemáticas.

Segundo Prado (2010), com o surgimento do computador, na década de 50 do Século XX, a modelagem de filas pôde ser analisada pelo ângulo da simulação, em que não mais se usam fórmulas matemáticas, mas apenas tenta-se imitar o funcionamento do sistema real. As linguagens de simulação apareceram na década de 60 do mesmo século e, hoje, graças aos microcomputadores, podem ser facilmente usadas. A técnica de simulação visual, cujo uso se iniciou na década de 80 daquele século, em virtude de sua maior capacidade de comunicação, teve uma aceitação surpreendente. Além disso, por ter um menor nível de complexidade, seu uso cresceu enormemente.

Algumas linguagens de simulação são mundialmente conhecidas, como GPSS, GASP, SIMSCRIPT, SIMAN, ARENA, PROMODEL, AUDOMOD, TAYLOR, etc. Arena, ExtendSim, e Simio são pacotes de simulação mais populares.

O GPSS foi uma das primeiras linguagens de simulação a ser desenvolvida. Geoffrey Gordon apresentou essa linguagem em dois artigos em 1961 & 1962. O *software* foi comercializado pela IBM, em 1961. Um programador em GPSS não escrevia um programa da mesma maneira que um programador de SIMSCRIPT. Ele construía um diagrama de blocos, uma rede de blocos interconectados.

Segundo Freitas Filho (2001), no primeiro semestre de 1993, o professor Paulo José de Freitas Filho levou para a UFSC uma cópia do SIMAN/CINEMA. De acordo com o autor mencionado, o *software* foi empregado, naquela instituição, pela primeira vez numa universidade brasileira substituindo a já então fora de moda linguagem GPSS.

Segundo Prado (2010), o ARENA foi lançado pela empresa americana *Systems Modeling*, em 1993, e é o sucessor de dois outros produtos de sucesso da mesma empresa: SIMAN (primeiro *software* de simulação para PC) e CINEMA, os quais foram desenvolvidos

em 1982 e 1984, respectivamente. O SIMAN é uma evolução da arquitetura do GPSS, lançado pela IBM em 1961 e que, durante anos, foi o líder entre os produtos de simulação de uso geral no mercado mundial. Em 1984, o SIMAN recebeu um complemento chamado CINEMA (primeiro *software* de animação para PC), que adicionava habilidades de animação gráfica. Esse conjunto foi continuamente melhorado e, a partir de 1993, os dois programas foram unificados e aperfeiçoados em um único *software*, o ARENA. A partir de 1998, a empresa *Rockwell Software* incorporou a *Systems Modeling*.

O ARENA é, ao mesmo tempo, uma linguagem de simulação e um ambiente de trabalho e experimentação, podendo ser usado para testar o modelo e fazer a apresentação de seus resultados, através de avançados recursos de animação. Esse *software* é, hoje, um dos mais populares *softwares* de simulação, tanto no Brasil, como no resto do mundo.

### 3.3.2 Conceitos fundamentais de simulação

A simulação é uma metodologia amplamente aplicada na indústria que reproduz parcialmente ou integralmente a operação de um sistema ou processo real em escala menor. Os modelos de simulação propiciam uma análise detalhada da situação e permite a experimentação do seu comportamento (Banks *et al*, 2014; Paragon, 2006; Freitas Filho, 2001).

Algumas ideias, métodos e questões são fundamentais para a construção e entendimento de um modelo de simulação e ainda para trabalhar com algum *software* de simulação (Kelton *et al*, 2015). A modelagem e simulação de sistemas abarcam uma série de termos que é habitualmente utilizada para conceituar seus principais elementos (Freitas Filho, 2001). Para a simulação a eventos discretos alguns termos são considerados relevantes nesse trabalho (Fishman, 2001; Banks *et al*, 2014; Freitas Filho, 2001):

**Sistema:** Um conjunto de entidades (ex: máquinas e pessoas) que, ligados, interagem através do tempo para realizar um ou mais objetivos (Banks *et al*, 2014).

**Modelo:** Geralmente por meio de relações matemáticas ou lógicas e estruturais o sistema é caracterizado em termos de estado, entidades e seu atributos, equipamentos, eventos, processos, atividades e atrasos construindo uma representação abstrata do sistema (Banks *et al*, 2014).

**Variáveis de estado:** Constitui em um conjunto de variáveis, que para o entendimento pleno do sistema e, visando o propósito de estudo, em um determinado instante de tempo, agrega-se informações adequadas dos elementos de estudo (Freitas Filho, 2001). Independente de quantas e quais tipos de entidades estejam envolvidas, uma variável é parte da informação

que retrata alguma característica do sistema. Por pertencer ao sistema como um todo, não estão vinculadas a apenas uma entidade específica como estão os atributos. O estado de uma máquina, livre ou ocupada, ou o número de peças na fila, o número de servidores ocupados, o relógio corrente de simulação e o tempo médio de servidores ocupados podem ser variáveis incluídas em modelos de simulação (Kelton *et al*, 2015).

**Entidade:** É um objeto que se representa de forma nítida e clara dentro do sistema (Freitas Filho, 2001, Banks *et al*, 2014). Elas podem atuar de forma dinâmica ou estática. Quando se movem através do sistema, por exemplo, como peças que se movem pela fábrica ou um cliente ao se movimentar dentro de um banco, atuam de forma dinâmica. Já no último caso, elas podem servir outras entidades e participarem de forma estática como as máquinas de uma fábrica, também chamadas de recursos (Freitas Filho, 2001; Kelton *et al*, 2015).

É comum na simulação representar as entidades como objetos “reais” e há diversos tipos de entidades e formas de incluí-las no modelo. Porém, há casos em que as entidades não correspondem a um elemento palpável e podem ser manipuladas para executar determinadas operações no modelo. Chama-se essas de entidades “falsas” (ou lógicas). Seguramente a primeira ação a ser feita no sistema é descobrir quais são as entidades do sistema (Kelton *et al*, 2015).

**Atributos:** Denomina-se de atributos, as características que definem integralmente uma entidade, em outras palavras, são aquelas exclusivas da mesma (Freitas Filho, 2001). Além da singularização das entidades, a fim de guiar os objetivos do modelo, atributos pertinentes servem para controlar o comportamento das entidades que por meio deles são retidas estatísticas importantes para análise (Freitas Filho, 2001; Pinto, 2002). Tempo médio de peças em uma fábrica, nível da habilidade de um servidor, status de um servidor, se está ocupado ou ocioso, prioridade de um cliente em espera são exemplos de atributos (Freitas Filho, 2001; Fishman, 2001; Banks *et al*, 2014).

**Evento:** São ocorrências instantâneas, programadas ou não, as quais, provocam uma mudança de estado no sistema (Freitas Filho, 2001; Banks *et al*, 2014, Fishman, 2001).

**Lista de eventos:** Uma lista que registra o instante em que um evento será executado, ordenado de uma forma lógica (tal qual por prioridades, ou por exemplo, quando clientes em uma fila, ordenados por regras como a “primeiro que entra primeiro que sai”, *first in first out* (FIFO) (Fishman, 2001; Banks *et al*, 2014). A atualização da lista é realizada com o avanço do relógio de simulação através da ocorrência do próximo evento (Law, 2015).



**Atividade:** São procedimentos e operações que são instaurados em cada evento e, cada atividade tem um tempo de duração que pode ser programado (por exemplo ser descrito por uma distribuição de probabilidade) (Pinto, 2002; Banks *et al*, 2014; Fishman, 2001).

**Espera:** O intervalo de tempo sobre o qual não se pode predeterminar, chama-se espera, ao contrário de uma atividade. Um exemplo é a permanência de uma entidade na fila a espera por recurso (Freitas Filho, 2001).

**Processo:** Trivialmente compila-se uma sequência de eventos por ordem cronológica de suas ocorrências. Toda ou parte da “vida” de uma entidade do sistema é representada por essa sequência, melhor dizendo, o processo (Pinto, 2002).

**Relógio de simulação:** É uma variável que representa o instante corrente da simulação (Banks *et al*, 2014; Pinto, 2002; Kelton *et al*, 2015). Ela decorre o tempo através da mudança de eventos que estão programados para ocorrer em um instante do tempo, ou seja, há uma passagem discreta do tempo entre a ocorrência de um evento e o seu ulterior. Uma vez que no relógio do tempo real, o tempo é fluido continuamente, assumindo todos os valores contidos no espaço de tempo entre dois eventos. No ARENA essa variável é chamada de “TNOW” (Kelton *et al*, 2015).

**Recursos:** Um recurso (entidade estática) pode prover serviços às entidades dinâmicas. Esse, é capaz de atuar como um servidor paralelo ao suportar o atendimento de uma ou mais entidades dinâmicas simultaneamente. Trabalhar com diversos tipos de recursos concomitantemente, ou com mais de uma unidade de recurso por vez são opções de operação oferecidas a uma entidade dinâmica por um recurso (Freitas Filho, 2001).

Equipamento, espaço em uma área limitada por tamanho ou operadores podem equivaler a um recurso quando entidades normalmente competem entre si por serviços dos mesmos. Unidades de um recurso quando disponíveis são ocupadas por entidades e então liberadas ao término do serviço (Kelton *et al*, 2015).

No caso em que um recurso estiver ocupado, uma entidade dinâmica deverá esperar em uma fila para ser atendida (Freitas Filho, 2001).

**Filas:** Quando uma unidade de recurso está sobrecarregada com outra entidade, a entidade consecutiva é impedida de continuar sendo necessário um espaço para que ela aguarde o seu atendimento, ou seja, a fila faz este papel (Kelton *et al*, 2015). As filas se estruturam de políticas operacionais aderidas pelo sistema ou modelo para gerenciar seu funcionamento. Geralmente costumam aderir a políticas como a FIFO que significa o primeiro que chega na fila é o primeiro a ser atendido (Freitas Filho, 2001).

O período na fila é normalmente um parâmetro difícil de controlar. Uma vez que é iniciado, seu término não é programado. O aguardo por um recurso a partir do momento que uma entidade entra na fila exemplifica uma espera comum causada por eventos inesperados. O tempo de permanência dela em fila é consequência da soma dos tempos de processamento das outras entidades que se encontram na fila ou em processo. Esta espera pode ser calculada quando a política FIFO é adotada para gerir a fila. Apesar disso, quando atribui prioridades a entidades que chegam na fila o seu controle torna-se quase impossível (Freitas Filho, 2001).

### ***3.3.3 Simulação a eventos discretos***

Para entender a simulação de eventos discretos é necessário compreender a diferença entre os modelos discretos e contínuos. Seja de forma contínua ou seja de forma discreta a alteração do sistema no decorrer do tempo classifica a simulação nesses dois tipos de modelos. O sistema é caracterizado pelas variáveis independentes ligadas a ele. Em simulação, essas variáveis são chamadas de variáveis de estado do sistema. É importante ressaltar que não é o sistema que é classificado em discretos e contínuos e sim o modo como o modelo é construído (Freitas Filho, 2001).

Nos modelos discretos, os valores das variáveis de estado permanecem constantes em um certo período de tempo até o momento da ocorrência de um evento, instante que a variável modifica seu valor (Freitas Filho, 2001).

### ***3.3.4 As formas da estruturação de programas em simulação***

A abordagem pelo método das três fases, por processo, por atividades e por eventos são as quatro formas de modelagem já estudadas até hoje, as quais para a sua implantação dependem da linguagem de simulação adotada (Pinto, 2002; Freitas Filho, 2001). As mais utilizadas hoje são a abordagem pelo método das três fases e abordagem por processo. No *software* ARENA é utilizada a abordagem por processos.

Geralmente todo programa de simulação a eventos discretos independentemente do método de abordagem em que está baseado, possui três partes: um programa executivo, uma parte destinada a modelagem que representa o sistema a ser simulado e um conjunto de ferramentas. O programa executivo é o responsável pelo controle da simulação deste o início até o término da simulação. A modelagem ou construção do modelo é feita por um usuário e é específica de cada sistema a ser modelado. Uma vez construído o modelo, ele é salvo em um

arquivo. O conjunto de ferramentas oferece suporte a uma série de tarefas tais como: entrada de dados, ajustes de distribuições, saída de resultados, amostragens aleatórias, identificações de erros, etc. Durante a simulação o programa executivo interage com o modelo e com o conjunto de ferramentas. O programa executivo deve identificar todos instantes da simulação em que vai ocorrer um evento ou uma próxima mudança de estado no sistema, avançar o relógio de simulação e registrar as mudanças que ocorrem naquele instante. O nome “simulação a eventos discretos” é devido ao fato de que os eventos ocorrem em determinados momentos, isto é, em instantes discretos do tempo.

A seleção do próximo evento a ser processado é realizada por uma parte lógica do modelo, de modo peculiar em cada tipo de abordagem, a qual proporciona alterações adequadas no estado do sistema. O modo de programação com que o próximo evento é processado indica a diferença fundamental de cada método dentre a abordagem por eventos, por atividades e por processos (Banks *et al*, 2014; Freitas Filho, 2001).

A compreensão dos diferentes tipos de abordagens é essencial para proporcionar alternativas de modelagem a um determinado sistema, mesmo que o pacote de simulação não contenha uma ou mais visões do mundo (Banks *et al*, 2014). Informações mais detalhadas sobre como é processada a simulação para cada tipo de abordagem podem ser encontradas em Pidd (2004).

### **3.3.5 Vantagens e desvantagens da simulação**

Por meio da simulação é permitido a geração de uma coleção de possibilidades de cenários do sistema partindo do processo de modificação das características do modelo e da entrada de dados. Seja para a criação de um novo sistema ou para a análise de um sistema já existente, a simulação é um ótimo recurso (Banks *et al*, 2014).

O entendimento aprofundado das vantagens e desvantagens da simulação é indispensável, embora ela seja uma excelente ferramenta de análise (Freitas Filho, 2001). Baseados em Freitas Filho (2001) e Banks *et al* (2004, 2014) a simulação apresenta vantagens e desvantagens.

#### **Vantagens:**

1. A fim de entender melhor o escoamento dos materiais, informações, processos e a super ocupação de recursos, é feito o reconhecimento dos “gargalos”, problemas recorrentes e causadores em demasia nos atrasos da produção de sistemas reais (Freitas Filho, 2001);

2. Um modelo pode ser aplicado em diversas ocasiões após sua conclusão, a fim de avaliar políticas e projetos propostos (Freitas Filho, 2001);
3. Com o sistema em funcionamento, novos procedimentos operacionais e organizacionais, regras de decisão, fluxos de informações podem ser executados, sem obrigatoriamente ter que paralisar o sistema real (Freitas Filho, 2001);
4. A fim de entender melhor algum fenômeno existente no sistema, a simulação possibilita a diminuição ou aumento de sua velocidade de experimentação e compressão ou expansão do tempo sob análise (Banks, 2009; Freitas Filho, 2001);
5. A simulação proporciona uma melhor interpretação do modo de interação das variáveis entre si e com outros elementos do sistema e identifica as variáveis mais relevantes no que concerne a performance do sistema (Freitas Filho, 2001);
6. Um estudo de simulação consegue transmitir uma compreensão mais realista do funcionamento do sistema além do modo que normalmente as pessoas entendem o seu funcionamento (Banks, 2004; Freitas Filho, 2001);
7. A simulação consegue responder perguntas como “o que aconteceria se?”. Diferentes cenários podem ser experimentados pelo programa de simulação a fim de antecipar prováveis circunstâncias do sistema, obtendo-se assim, maior entendimento dos diversos riscos (Freitas Filho, 2001).
8. Ao comparar modelos analíticos com os modelos de simulação, o primeiro demanda muitas simplificações para deixá-lo matematicamente tratável, enquanto o outro não apresenta essas restrições. Os modelos probabilísticos, dessa forma, possuem um certo limite no que diz respeito aos parâmetros de desempenho. Já os modelos de simulação fornecem mais informações para uma análise mais aprofundada (Freitas Filho, 2001).

**Desvantagens:**

1. A construção de modelos de simulação pode requerer bastante tempo e treinamento especializado, é considerada uma arte, e somente com a experiência, a pessoa estará apta para modelar um sistema. As chances que a construção de um modelo proveniente de um mesmo sistema possa ser concebida de diversas maneiras são altíssimas se propostos a especialistas distintos (Freitas Filho, 2001).
2. A compreensão dos resultados da simulação é as vezes difícil de ser alcançada. As entradas de um modelo por serem apoiadas em dados aleatórios geram saídas também do mesmo modo. Em razão dos modelos buscarem obter a variabilidade do sistema, é obscuro a identificação da variabilidade do sistema no julgamento dos resultados. Visto que esse pode ser

acarretado da própria aleatoriedade de processos construídos e embutidos no modelo ou das próprias inter-relações ocorridas no sistema (Freitas Filho, 2001).

3. Muitas vezes a simulação demanda muitos dados e quando não se tem essa quantidade de dados disponíveis não se consegue estimar e tampouco a simulação é aconselhada (Banks *et al*, 2014).

4. O consumo de tempo e o dispêndio de recursos na modelagem e análise de uma simulação podem ser significativos. Entretanto, a redução desses investimentos poderia resultar em um modelo deficiente para a resolução de problemas (Banks, 2004).

5. O uso da simulação quando em alguma situação, a solução analítica apresenta-se factível, ou até mais precisa. Isso pode ser confirmado para alguns modelos em que fórmulas como as da *teoria das filas* são aplicáveis (Freitas Filho, 2001).

6. Se o comportamento do sistema é muito difícil de ser compreendido não se aconselha o uso da simulação. Muitas vezes o comportamento humano é difícil de ser modelado (Banks *et al*, 2014).

### **3.3.6 A simulação na indústria minerária**

O tamanho, custo e complexidade das operações em minas tem aumentado ao longo dos anos e os projetos para essas operações estão sujeitos a um alto risco (Raj *et al*, 2009 e Chinbat e Takakuwa, 2009). Submetido a um comportamento aleatório, o funcionamento do sistema, afetado por muitos fatores, carece da construção de um modelo de simulação probabilístico que é o mais adequado para a compreensão do comportamento real do sistema. Normalizações ambientais mais estritas e requisitos de qualidade mais rigorosos no âmbito minerário também impelem pesquisas mais científicas e tecnológicas a buscarem melhor rentabilidade e, os estudos de simulação em minas tem sido uma ótima ferramenta para superar tais desafios (Raj *et al*, 2009).

Estudos mostram ampla aplicabilidade de estudos de simulação em várias operações tanto em minas a céu aberto quanto em subterrâneas e, que projetos para rochas duras e para carvão fazem parte desses (Raj *et al*, 2009; Basu, 1999). Aparentemente, a ampla maioria dos estudos tem sido relatada para minas a céu aberto, ainda que a realização de estudos tanto em minas a céu aberto quanto em subterrâneas já foram realizados. Operações de *stope* (um *stope* é uma abertura com alta produção) e manuseio de materiais são as principais áreas de estudos de simulação em mina subterrânea com o acréscimo de alguns estudos de simulação para a operação completa nesse tipo de mina. Equivalentemente, estudos sobre *shovels*-caminhões,

escavadeiras *bucket wheel*, *dragline* e outros diversos sistemas foram verificados para minas a céu aberto. Em virtude de ser a operação unitária mais onerosa da mina, o manuseio de materiais (carregamento e transporte) provocou as maiores diligências de pesquisadores e especialistas (Raj *et al*, 2009).

Para reproduzir os principais processos de produção de operação de uma mina subterrânea de ouro desenvolveu-se dois modelos em programas de computador. Os principais processos são representados por dois subsistemas, o sistema de transportes e o sistema de painéis (*stopping systems*). Para o último é simulado as operações de fragmentação por perfuração e desmonte, limpeza dos painéis (*stopes*) e operações de suporte em um contrato por *stope*. Variáveis geométricas gerais como comprimento e largura do *stope* e, itens como velocidade do *winner* e capacidade do *scraper*, são parâmetros considerados na composição do modelo. As probabilidades de falhas nas operações e suas respectivas distribuições de tempos ajudam a construir o banco de dados obtidos em campo (Touwen e Joughin, 1972?).

O primeiro trabalho de simulação em um computador para a operação de uma mina foi publicado por Rist (1961). O modelo elaborado por Rist teve o propósito de determinar o número ideal de trens para o transporte em uma mineração subterrânea de molibdênio. A problemática do sistema confrontava-se com fila de trens carregados em um portal para a liberação de um único trilho, bem como aguardar até a desocupação da área do britador (era permitido apenas dois trens ocuparem ou aguardarem no britador) (Sturgul, 2000).

A construção de modelos para correias transportadoras era um problema peculiar da mineração, especificamente para minas subterrâneas de carvão. Aparentemente, Sanford (1965) foi o primeiro a encarregar-se desse problema ao simular um sistema de correias transportadoras para sua tese de mestrado pela Universidade do estado da Pennsylvania (Sturgul, 2000).

Kaba *et al* (2014) afirma que um sistema de içamento foi analisado, através da aplicação do Arena, por Temeng e Oduro (2002). Segundo Kaba *et al* (2014), para essa aplicação, foram construídos modelos estocásticos de sistemas de içamento por *skips* e gaiolas (*double drum cage*), em *Goldfields Ghana Limited*, em Tarkwa (Gana), para avaliar a performance e tentar melhorar a eficiência dos sistemas.

Muitas aplicações de modelos de simulação na mineração são baseadas na teoria das filas, tal qual a chegada de caminhões a um ponto de carregamento ou basculamento. Cross e Williamson (1969) propuseram um dos primeiros modelos de simulação para uma mina a céu aberto de cobre em funcionamento no sudoeste dos Estados Unidos. A mina operava pelo sistema *shovel*-caminhão com 5 equipamentos de carregamento para caminhões que

basculhavam na área de lixiviação, britador de minério e pilha de estéril. Estabelecer as rotas dos caminhões para diferentes *shovels* e minimizar os tempos de fila eram os parâmetros que a construção do modelo avaliou para deliberar se um sistema de despacho poderia ser implantado (Sturgul, 2000).

*Software* geralmente usado por minas nos estados do leste da Austrália, o TALPAC (Runge Mining Software, 1999) usa a simulação de eventos discretos para sistema caminhão - carregadeira. Esse, não precisa de dados de distribuição estatística para descrever um processo de transporte de caminhão em uma determinada rota assim como o software ARENA e o GPSSH. Propriedades das estradas como inclinação (*grade*), resistência ao rolamento e coeficiente de tração em que o caminhão trafega, restrições operacionais (condições da superfície, limites de velocidade, etc.) e, o tipo de caminhão são parâmetros inseridos no TALPAC (Basu, 2000).

Foi utilizado o *software* ARENA para construir o modelo *shovel*-caminhão a lidar com o agrupamento de caminhões e, utilizou-se uma *shovel* para carregar cinco caminhões para a representação do sistema. Foi testado usando o coeficiente de correlação de Pearson a dependência dos tempos de ciclo para dois cenários nessa simulação. Para avaliar a correlação entre os tempos de ciclo utilizou-se a variável número de caminhões lentos no primeiro cenário e também o efeito do aumento da velocidade dos caminhões lentos em um segundo cenário. Erros de superestimação e incertezas da produtividade ocorreram ao assumir que as distribuições dos tempos de ciclo são identicamente independentes (Anani e Awuah-offei, 2013).

Foi utilizado o método de simulação de Monte Carlo com auxílio do *software* @Risk para gerar um modelo probabilístico que representou a taxa de penetração em dois estudos de caso em minas do Irã. Funções de distribuição de probabilidade foram definidas como parâmetros de entrada em uma equação proposta por Saeidi (2014) para taxa de penetração. Parâmetros da perfuratriz e da rocha tais quais velocidade de rotação, força de avanço (*pull down*), UCS, espaçamento entre descontinuidades e inclinação da descontinuidade em relação a direção de perfuração foram os parâmetros de entrada medidos em campo e laboratório. O modelo probabilístico da taxa de penetração que aplicados somente para rochas sedimentares (calcário e arenito magnético) e ígnea porfirítica mostrou valores entre 0,2 e 2,5 m/min para perfuração rotativa a um nível de confiança de 90% (Saeidi, 2014).

A modelagem de sistemas em minerações é uma ferramenta muito prática para investigar situações onde o estudo direto nos sistemas é impossível de ser realizado ou torna-se impeditivamente oneroso. É feita uma tentativa de duplicar parâmetros importantes do sistema

em um determinado grau por um modelo matemático ou computacional e conceder a experimentação do modelo afim de compreender a sensibilidade do sistema a essas mudanças e visualizá-las em diversos cenários operacionais alternativos (Raj *et al*, 2009). Empresas de consultoria na área de modelagem de sistemas geralmente direcionam seus serviços a grandes mineradoras que podem incumbir-se do custo de tais serviços, enquanto minerações menores ainda são descrentes em relação ao custo-benefício desse tipo de investimento (Basu, 1999).

Atualmente o acesso a um *hardware* de computador relativamente barato e a visualização através da realidade virtual propiciam a oportunidade da criação de uma simulação real de mina por animação 3D, o que auxiliaria no planejamento e *design* de mina (Basu, 1999).

Análises de custos e tempos de sistemas de transportes e fluxo de materiais utilizados em processos que caracterizados por movimento (dinâmico) podem ser realizadas eficientemente por estudos de simulação (Pop-Andonov *et al*, 2012).

Comercializado e suportado pela empresa de consultoria Australiana *Simulation Modeling Services* (SMS) Pty Ltd, o ARENA é uma das ferramentas de modelagem de simulação de eventos discretos comumente utilizada na indústria mineral australiana (Basu, 1999). Na indústria minerária, atividades de mina subterrânea, sistemas escavadeira – caminhão e processos metalúrgicos – são alguns exemplos de aplicação de modelagem através do *software* Arena (Kaba *et al*, 2014).

### **3.3.7 Modelagem e simulação de sistemas**

O estudo de planejamento de uma indústria que utiliza a modelagem de sistemas para melhor dimensionar a quantidade de atendentes (veículos, ferramentas, máquinas, etc.) e pessoas em suas respectivas funções entrega um produto ou serviço de qualidade em um custo razoável. Assim, busca-se um *layout* compatível, que não origina regiões de filas, e um dimensionamento balanceado do sistema, que é crucial na eliminação de gargalos (Prado, 2004). A simulação e a teoria das filas são técnicas já viabilizadas pela modelagem de sistemas (Prado, 2010).

O uso de técnicas matemáticas em computadores digitais, que reproduzem o funcionamento de praticamente qualquer modo de processo (sistema) real, define a simulação, ao passo a abordagem de filas em sistemas reais, através de fórmulas matemáticas, caracteriza a teoria das filas (Freitas Filho, 2001). O autor entende que essa reprodução do sistema (modelo) permite, além de descrever o comportamento do sistema de maneira mais próxima à realidade, experimentar alterações e métodos para prever o seu comportamento futuro. Chwif e Medina



(2015) consideram que a simulação é capaz de antecipar o comportamento de um sistema, com certo grau de confiança, ao obedecer a um conjunto de premissas e se apoiar em dados de entrada intrínsecos.

### 3.2.8.1 O processo de modelagem no ARENA software

Para realização da modelagem no *software* Arena dispõe-se de dois tipos de módulos: módulo de fluxograma e módulo de dados. O primeiro estabelece o processo a ser simulado enquanto o último retrata as características de diversos elementos do mesmo, tal quais, recursos, filas e variáveis. São criadas entidades no processo de simulação que ao se moverem através do do modelo são acionadas pelos módulos ao longo do fluxograma (Kaba *et al*, 2014).

### 3.3.8 Distribuição de probabilidades teóricas

Identificar uma distribuição teórica de probabilidades é a terceira etapa no processo de análise dos dados coletados. Para identificar, de modo mais razoável, o comportamento estocástico de um parâmetro sob observação para o possível modelo de simulação, o histograma é uma ferramenta fundamental para o descobrimento e o desenho da distribuição teórica de probabilidades, que é construído através da distribuição de frequência dos dados (Freitas Filho, 2001).

O autor considera que se pode inferir uma suposta distribuição teórica baseando-se no contexto e no formato do histograma. Pode-se ilustrar essa inferência da seguinte forma: em virtude de a distribuição Exponencial normalmente se associar à medição de tempos entre chegadas de entidades em um sistema, quando os dados analisados provêm de intervalos de tempo entre chegadas e o histograma desses dados apresenta um perfil semelhante ao de uma distribuição Exponencial, grandes serão as chances de que os dados obtidos sigam essa distribuição de probabilidade teórica (Freitas Filho, 2001).

A definição de variável aleatória está intimamente ligada ao conceito de distribuição de probabilidade, sendo importante saber diferenciar as variáveis aleatórias Discretas das Contínuas (Triola, 2013). Em um espaço amostral de uma variável aleatória  $X$  com valores finitos, ou infinitos e enumeráveis, os pares ordenados dos possíveis valores específicos  $x_i$  e suas respectivas imagens da função de distribuição de probabilidades,  $f(x_i)$ , formam uma distribuição *discreta* de probabilidade (Farias *et al*, 2003). O autor propõe, nesse sentido, para a função de densidade de probabilidades de uma variável *discreta*, as seguintes propriedades:

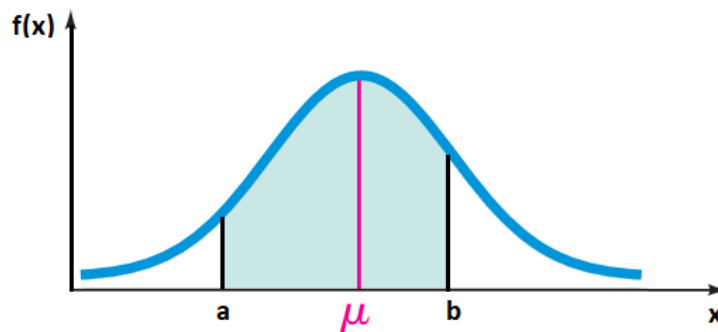
1.  $f(x) \geq 0$
2. Somatório de  $f(x) = 1$  (dentro do domínio de  $X$ , a soma da probabilidade,  $f(x)$ , de cada valor de  $x$  é igual a 1).
3.  $P(X = x) = f(x)$ .

No caso da distribuição contínua de probabilidades, considera-se um domínio infinito não enumerável de pontos (Farias *et al*, 2003). As seguintes relações são propostas pelo autor:

1. A área total sob o gráfico da função de densidade é 1.
2.  $P(a \leq X \leq b) =$  área sob a curva de densidade entre os pontos  $a$  e  $b$ .
3.  $f(x) \geq 0$
4.  $P(X = x_0) = 0$

A Figura 3.19 ilustra a propriedade 2 referente à distribuição contínua de probabilidades.

Figura 3.19 - Área sob  $f(x)$  no intervalo  $[a,b]$  de uma distribuição de probabilidade.



Fonte: adaptada de Triola (2010).

Dentre as distribuições contínuas, há a Uniforme, Triangular, Lognormal, Erlang, Gama, Beta, Weibull e outras mais. Porém, as mais conhecidas são a Normal e a Exponencial, que são de análise e reconhecimento simples. As distribuições Gama e Weibull dispõem de uma diversidade de formas, embora sejam de análise mais difícil (Freitas Filho, 2001).

### 3.3.9 Geradores de números aleatórios (GNA)

Há determinados problemas em que as variáveis apresentam um comportamento aleatório ao invés de determinístico e a simulação com o auxílio da amostragem aleatória variáveis apresenta eficácia ao tratar desse tipo de comportamento (Pinto, 2002). E a existência

desse comportamento em certas variáveis, próprios do sistema de simulação, exige desse, um método de obtenção ou geração de números aleatórios (Law, 2015). Como esses elementos podem ser parâmetros e/ou variáveis do sistema, é necessário amostrar valores dessas variáveis utilizando técnicas conhecidas, como as que os geradores de números aleatórios utilizam (Pinto, 2002). A produção de números aleatórios a partir de uma aspirada distribuição probabilística pode ser feita de modo eficiente e conveniente para a realização de modelos de simulação (Law, 2015). Variáveis operacionais de uma perfuratriz, tais como disponibilidade e utilização, fornecidas por geradores de números aleatórios e, de acordo com modelos probabilísticos previamente selecionados, podem ser representadas por valores aleatórios (Chwif e Medina, 2015).

Segundo Chwif e Medina (2015), comumente, são dois os estágios para o procedimento de construção de uma distribuição probabilística executados pelo computador:

1. Para um intervalo  $[0, 1]$  é sorteado um número de distribuição uniforme;
2. O número sorteado é transformado em um valor que segue uma função de repartição originada de uma distribuição probabilística determinada.

Uniformidade e independência são duas propriedades estatisticamente notáveis de uma sequência de números aleatórios  $R_1, R_2, \dots$ . Uma distribuição uniforme contínua circunscrita pelo intervalo  $[0,1]$ , provê cada número aleatório  $R_i$ , uma amostra independente, que pode ser delineada seguindo a função de distribuição de probabilidade (f.d.p.) através da expressão 3.26 (Banks, 2014):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.26)$$

Os algoritmos que geram os números aleatórios contidos no conjunto  $[0,1]$ , são calculados, geralmente, a partir de um valor inicial nomeado por semente. A semente será utilizada para gerar o primeiro número aleatório que será utilizado para a geração do segundo, e assim, por diante. Esses, são chamados de números pseudoaleatórios, já que os números verdadeiramente aleatórios seriam aqueles gerados por um experimento que não fosse permitido a repetição de sua realização (Chwif e Medina, 2015). O resultado de um lançamento de um dado, por exemplo, seria um número aleatório autêntico.

Os geradores aritméticos, também chamados de pseudoaleatórios não são aleatórios de fato, sendo que por obedecer a uma regra permanente é possível ter uma certa prognose dos

resultados (Law, 2015). Mas a geração de um número, genuinamente aleatório, fornecido pela natureza, por exemplo, não manifesta discordâncias quando confrontado por um grupo de valores produzidos por um computador, do ponto de vista estatístico (Freitas Filho, 2001). Isso se deve a características (propriedades) que um determinado método de geração deve ter.

Pode-se dizer que o estado de um sistema é definido através do seu conjunto de variáveis de estado cujos valores determinam a situação em que o sistema se encontra em um dado instante do tempo.

O estado final de um sistema ao fim da simulação (conjunto dos valores finais das variáveis de estado) é o resultado proveniente de todas as mudanças de estado que ocorrem de uma forma sequencial desde o início da simulação.

Durante a simulação, uma série de valores de variáveis aleatórias são geradas através de amostragens aleatórias efetuadas sobre as distribuições que representam o comportamento probabilísticos dessas variáveis. Para cada valor amostrado um número aleatório entre 0 e 1 deve ser gerado e que vai corresponder a um valor da função de repartição que a variável amostrada segue.

Portanto, o estado final é dependente da sequência de números aleatórios entre 0 e 1 gerados durante a simulação e conseqüentemente, da semente inicial geradora dos números aleatórios. Deve-se, portanto, realizar uma série de réplicas, ou seja, repetir o processo de simulação a fim de que várias respostas possíveis para o comportamento do sistema possam ser obtidas que posteriormente serão analisadas estatisticamente.

Para que um gerador de números aleatórios possa ser utilizado em programas de simulação, eles devem apresentar as seguintes qualidades:

Foi sugerido por Lehmer (1951), citado por Banks (2010) um gerador de números aleatórios chamado de gerador linear congruencial que produz uma sequência de números inteiros,  $X_1, X_2, \dots$  entre zero e  $m-1$ , através da expressão 3.27.

$$X_{i+1} = (aX_i + c) \bmod m \quad \text{para } i = 0, 1, 2, \dots \quad (3.27)$$

$X_0$  é denominado semente, o valor inicial,  $c$  é o incremento (constante aditiva),  $a$  denomina-se de multiplicador e  $m$  é o módulo. O valor gerado  $X_i$  representa o resto da divisão de  $(aX_i + c)$  por  $m$ .

Para que os números  $X_i$ , inteiros, sejam incluídos no intervalo  $[0,1]$  deve-se dividir  $X_i$  por  $m$  por meio da expressão 3.28.

$$R_i = \frac{X_i}{m} \quad \text{para } i=1, 2, \dots \quad (3.28)$$

O número máximo de valores que estes tipos de geradores podem gerar é igual  $m$  e estes valores são cíclicos, ou seja, após um certo número de valores gerados, chamados de ciclo, a sequência gerada começa a se repetir.

A escolha dos valores de  $a$ ,  $c$  e  $m$  é fundamental para determinar se os números gerados terão uso prático na simulação. Em geral, deseja-se garantir as seguintes características aos geradores:

- os números gerados devem estar distribuídos uniformemente entre 0 e 1 e não podem apresentar correlação entre um valor e outro;
- a geração deve ser rápida e deve apresentar um ciclo muito grande;
- deve ser possível reproduzir a sequência gerada principalmente para se fazer comparações mais adequadas entre diferentes cenários.
- deve ser possível gerar diferentes sequências de números aleatórios de uma forma fácil.
- deve ser portátil, ou seja, capaz de gerar uma mesma sequência para diferentes compiladores e computadores.

Geralmente os vários programas de simulação já trabalham com geradores que apresentam estas características.

A função de repartição ou distribuição acumulada crescente de uma variável aleatória, normalmente é dada por uma expressão que fornece a probabilidade de que uma variável aleatória  $X$  seja menor ou igual a um dado valor  $x$  que aquela variável pode assumir. Na amostragem aleatória obtém-se o valor da variável aleatória  $x$  correspondente ao valor da função de repartição igual ao número entre 0 e 1 gerado aleatoriamente.

### **3.3.10 Testes de aderência**

Como se sabe, a adequabilidade do modelo probabilístico a ser escolhido para um determinado conjunto de dados amostrado, o qual será utilizado na simulação, precisa ser

testada. Para tanto, utilizam-se técnicas estatísticas (para validação do modelo), os testes de aderência (Freitas Filho, 2001). Os testes de aderência são uns dos tipos de testes de hipóteses.

Teste de Hipótese é um procedimento que leva a uma tomada de decisão a respeito de uma hipótese particular. A hipótese nula ( $H_0$ ) é a hipótese que queremos testar. A palavra “nula” significa nenhuma diferença. A hipótese alternativa é chamada de  $H_1$ .

Por exemplo, deseja-se testar se a média  $\mu$  de uma variável estimada a partir de  $n$  amostras, pode ser igual a um valor fixo  $\mu_0$ . Neste caso pode-se escolher entre três hipóteses alternativas  $H_1$ :

$$\left| \begin{array}{l} H_0: \mu = \mu_0 \\ \text{A hipótese alternativa } H_1 \text{ pode ser:} \\ H_1: \mu \neq \mu_0 \quad (1) \\ H_1: \mu < \mu_0 \quad (2) \\ H_1: \mu > \mu_0 \quad (3) \end{array} \right.$$

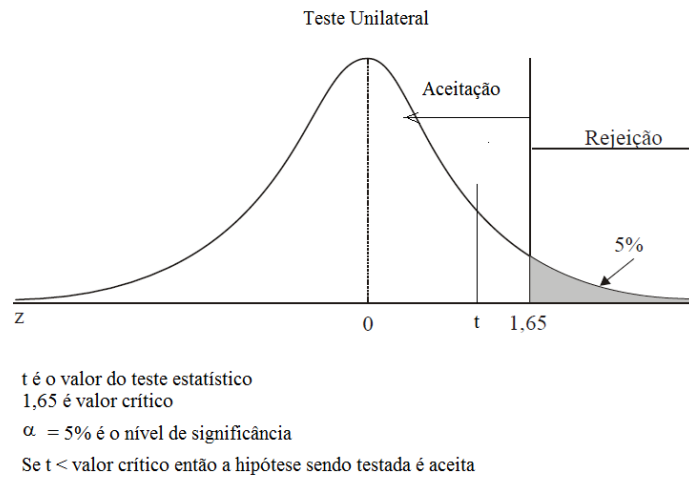
Para a primeira hipótese  $H_1$  se tem um teste bilateral, pois  $\mu$  pode ser maior ou menor do que  $\mu_0$ , enquanto nos outros casos, o teste é unilateral.

O teste normalmente é feito a partir de uma estimativa de uma função ou teste estatístico calculado a partir de dados amostrais. Esta função ou teste estatístico tem uma distribuição de probabilidade conhecida.

Comete-se um erro do tipo I, ao se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. A probabilidade de ocorrer um erro do tipo I é dado por  $\alpha$  que é chamado de nível de significância do teste.

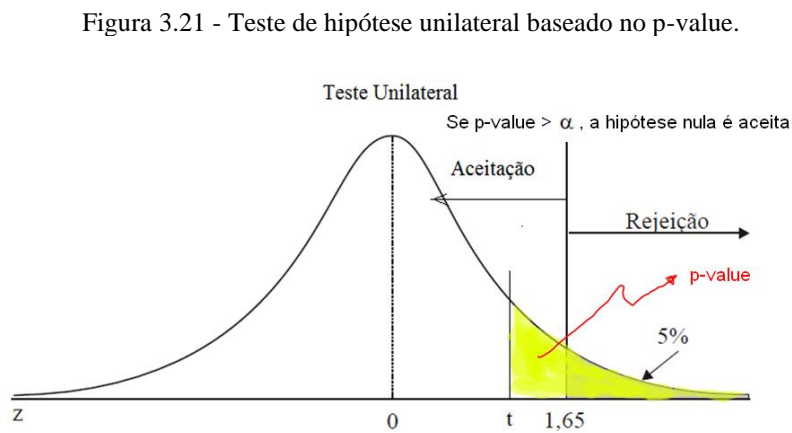
Para um dado  $\alpha$  os valores do teste estatístico que levam a rejeitar  $H_0$  constituem o que se chama de região crítica. Para os demais valores temos a região de aceitação. Os limites entre estas duas regiões são chamados de valores críticos. A área sob a curva da função de distribuição de probabilidade do teste estatístico correspondente à região crítica é igual a  $\alpha$ . Se o valor do teste estatístico  $t$  cair na região de aceitação,  $H_0$  é aceito e em caso contrário, ele é rejeitado. A Figura 3.20 ilustra o caso de um teste unilateral baseado no valor do teste estatístico  $t$ .

Figura 3.20 - Teste de hipótese unilateral baseado no valor do teste estatístico  $t$ .



Chama-se *p-value* o maior nível de significância para o qual a hipótese nula não deveria ser rejeitada para o valor do teste estatístico calculado a partir dos dados amostrais. É o nível de significância observado. O nível de confiança corresponde a  $1 -$  nível de significância. Outra maneira de se analisar o teste é através do *p-value*. Se ele for maior do que o nível de significância  $\alpha$  desejado para o teste, a hipótese nula é aceita e em caso contrário ela é rejeitada.

A Figura 3.21 ilustra o teste unilateral baseado no *p-value*.



Segundo Chwif e Medina (2015) é comum utilizar faixas de valores para avaliar o grau de evidência para a rejeição da hipótese nula como é apresentada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Critérios usuais para classificação do *p-value*.

Valor	Critério
$p\text{-value} < 0,01$	Evidência fraca para aceitação da hipótese nula
$0,01 \leq p\text{-value} < 0,05$	Evidência moderada para aceitação da hipótese nula
$0,05 \leq p\text{-value} < 0,10$	Evidência potencial para aceitação da hipótese nula
$0,10 \leq p\text{-value}$	Evidência forte para aceitação da hipótese nula

Fonte: adaptada de Chwif e Medina (2015).

Os níveis de significância mais comuns de serem utilizados são 1% e 5%.

Para se testar se um conjunto de dados se ajusta a uma distribuição teórica de probabilidade o Arena fornece ao usuário os resultados de dois testes de aderência: o teste do qui-quadrado e o teste de Kolmogorov – Smirnov chamado também de teste KS.

### 3.2.8.2 Teste do qui-quadrado

O teste de aderência  $\chi^2$  (qui-quadrado) foi proposto por Karl Pearson, em 1900 (Farias, 2003; Fernandes, 2013). O objetivo do teste é medir a aderência de dados observados de uma variável aleatória para uma determinada função de distribuição de probabilidades teórica, contínua ou discreta, com ou sem parâmetros conhecidos (Fernandes, 2013; Magalhães e Lima, 2015).

Com o teste de Qui-quadrado procura-se comparar o histograma de um conjunto de amostras com a função de distribuição teórica de probabilidade discreta ou contínua. A hipótese  $H_0$  a ser testada é a de que a distribuição de probabilidade das amostras (histograma observado) é igual a uma particular distribuição de probabilidade teórica (esperada).

O procedimento do teste do qui-quadrado tem início pelo arranjo das  $n$  observações em um conjunto de  $K$  classes adjacentes. A variável teste estatístico para o teste do qui-quadrado é dada por uma das expressões (3.29):

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(N_j - np_j)^2}{np_j} \quad \text{ou} \quad \chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(fo_j - fe_j)^2}{fe_j} \quad (3.29)$$

em que:

$K$  é o número de classes

$N_j$  é número de amostras ou observações que presentes numa classe  $j$



$p_j$  é a proporção esperada dos valores que cairiam dentro da classe j, caso o conjunto de observações siga a distribuição teórica para a qual está sendo testada.

$f_{o_j}$  é a frequência relativa observada para a classe j

$f_{e_j}$  é a frequência relativa esperada para a classe j

Pode-se mostrar que  $\chi^2$  segue aproximadamente uma distribuição qui-quadrado com  $K-p-1$  graus de liberdade onde p é o número de parâmetros estimados da distribuição teórica que está sendo testada.

Para a decisão, compara-se o valor calculado de  $\chi^2$  com o valor crítico  $\chi_{k-p-1,1-\alpha}^2$  da distribuição do qui-quadrado para o nível de significância  $\alpha$ . Estes valores normalmente se encontram em tabelas da distribuição do qui-quadrado. A hipótese nula é rejeitada se  $\chi^2 > \chi_{k-p-1,1-\alpha}^2$ .

A desvantagem deste teste é que ele é dependente do número de classes K. Para a aplicação do teste recomenda-se que o valor mínimo para a frequência esperada de uma classe seja 5. Se isto não acontecer deve-se fundir classes adjacentes até que esta condição seja satisfeita.

O teste do qui-quadrado é talvez o teste de aderência mais utilizado.

O teste de aderência do KS não depende do número de classes, mas possui algumas desvantagens em relação ao teste do qui-quadrado. Para maiores informações sobre o teste do KS pode-se consultar Law (2015).

### 3.3.11 Análise do p-value para ajuste das distribuições

É necessário determinar uma função de densidade de probabilidades para representar o conjunto de dados que será inserido no modelo de simulação. Para fazer o ajuste de um conjunto de dados a uma distribuição de probabilidade, o próprio analista, baseado no seu conhecimento preliminar a respeito do fenômeno, pode escolher a distribuição a ser ajustada dentre as distribuições teóricas mais conhecidas (Kelton, 2001; Fishman, 2001). Nesse caso, a função da ferramenta *Input Analyzer* do software ARENA se restringe, apenas, pelo fornecimento das estimativas numéricas dos parâmetros apropriados do modelo determinado. A ferramenta fornece também, para um mesmo conjunto de dados, um ranqueamento das distribuições que melhor se saíram no teste baseado no menor erro quadrático (*square error*) dentre uma série de distribuições disponibilizadas pelo próprio *software* (Kelton, 2015).

O *Input Analyzer* apresenta um resultado gráfico composto por uma função densidade de probabilidade, um histograma, uma descrição estatística dos dados e os resultados dos testes de aderência (Freitas Filho, 2001).

Além de poder verificar graficamente a diferença entre os valores dos dados de cada classe no histograma e o valor correspondente da curva de probabilidade estimada, o programa fornece, também, para a análise da qualidade do ajuste: o erro quadrático, o *p-value* e os resultados dos testes estatísticos provenientes dos testes Chi-quadrado e *Kolmogorov Smirnov (KS)* (Freitas Filho, 2001).

O erro quadrático (*square error*), representado pelo valor médio das diferenças (elevadas ao quadrado) entre os valores das frequências relativas estimadas pelo modelo e os valores das frequências relativas dos dados amostrais. Baixas diferenças indicam um ajuste melhor (Freitas Filho, 2001).

O fato de uma distribuição apresentar o menor erro quadrático, não significa que ela passaria no teste de ajuste. O ajuste deve ser verificado baseado nos valores críticos ou nos *p-values*.

Existem duas opções de escolha para o ajuste da função de distribuições de probabilidades: Empírica e teórica.

As sequências de valores produzidas por um modelo probabilístico empírico revelam uma variação inerente dos processos e outra em razão do tamanho limitado da amostra. A primeira é desejável, porém, a segunda expõe problemas de limitação do conjunto de dados (Fishman, 2001).

A suavidade e aumento do tamanho da amostra são características necessárias para as funções de densidade de probabilidade teórica. Essas peculiaridades, quando comparadas com modelos empíricos, perdem relevância à medida que se aumenta o tamanho da amostra (Fishman, 2001).

Modelos empíricos, podem em algumas conjunturas, promover mais acurácia e maior concordância para amostras relativamente pequenas (Fishman, 2001). Kelton (2015) ainda sugere, para conjuntos com baixos *p-values*, o ajuste empírico visto que se consegue reter algumas características dos dados que ao comparar com a mesma amostra em ajustes para distribuições teóricas, as mesmas características não são retidas.

Portanto, a identificação da situação para o estudo particular é uma tarefa fundamental para um bom desempenho da simulação (Fishman, 2001).

### 3.3.12 Análise dos resultados da simulação (Intervalo de confiança - IC)

O comportamento das variáveis de resposta do modelo deve ser observado após a execução das rodadas de simulação afim de obter uma conclusão a respeito da performance do sistema (Freitas Filho, 2001).

Conforme Taha (1988) citado por Destro (2015) a estimativa dos resultados da simulação é realizada através de um intervalo de confiança (I.C.) uma vez que esses são considerados uma amostra de um experimento estatístico. Compreende-se no âmbito da simulação que uma rodada equivale a um “experimento”. Esse método fornece os resultados sob uma precisão pré-estabelecida (Chiwf e Medina, 2015; Freitas Filho, 2001).

O tamanho do intervalo é submetido ao nível de confiança adotado. Quanto maior é o nível de confiança mais largo é a faixa de valores abrangida na estimativa (Freitas Filho, 2001). O termo confiança estatística é usado para afirmar, com certa probabilidade, que uma média populacional está dentro de um intervalo de confiança delineado. Apesar disso, a precisão está associada ao tamanho desse intervalo e, caso esse seja grande demais, as suposições são insuficientes a respeito da variável em estudo e, assim sendo, é difícil tomar decisões a respeito do valor verdadeiro (Chwif e Medina, 2015).

Para determinação deste intervalo é preciso calcular uma distância conhecida por metade do intervalo de confiança representada por  $h$ , através da qual são definidos os extremos superior e inferior do intervalo (Freitas Filho, 2001). Dessa forma, o intervalo de confiança IC para uma estimativa  $m$  de uma média será dado por  $(m+h; m- h)$ .

O intervalo de confiança é aplicado de modo diferente conforme o conhecimento ou não do desvio-padrão populacional  $\sigma$ . A construção do intervalo de confiança utilizando a distribuição normal padrão obedece a alguns requisitos para eficácia do método:

1. o conhecimento de  $\sigma$  (situação rara em situações reais),
2. a suposição de normalidade e
3. a suposição do tamanho amostral (Triola, 2013).

A suposição de normalidade admite que os indivíduos da população sejam normalmente distribuídos, ou  $n > 30$ . Essa condição não deve ser tão rigorosa uma vez que ela é admitida nos casos de populações com  $n \leq 30$  e em que a distribuição se aproxima da normal e sem a presença *outliers* (Triola, 2013).

Admitindo-se que  $\sigma$  seja conhecido  $h$  será dado pela expressão 3.30.

$$h = z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.30)$$

Em que:

$\sigma$  é o desvio padrão populacional;

$z_{\alpha/2}$  é o valor crítico referente à distribuição normal padrão Z para um nível de significância  $\alpha$  ou confiança  $1-2\alpha$ ;

$n$  é o número de amostras.

Quando  $\sigma$  não é conhecido, na maioria dos casos de simulação, ele é substituído por  $S$ , uma estimativa do desvio padrão amostral e o valor de  $z_{\alpha/2}$  é substituído pelo valor crítico  $t_{n-1,\alpha/2}$  da distribuição de *Student* com  $n-1$  graus de liberdade e para um nível de significância  $\alpha$  ou confiança  $1-2\alpha$ ;

Neste caso  $h$  passa a ser calculado pela expressão 3.31.

$$h = z_{n-1,\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.31)$$

Os desenvolvimentos para se chegar aos intervalos de confiança que podem ser determinados a partir das expressões 3.30 e 3.31 podem ser encontrados, por exemplo, em Montgomery (2003).

No intuito de obter boas características de precisão e confiabilidade, o nível de confiança  $100(1-\alpha)\%$  de 95% correspondente a  $(\alpha = 5\%)$  é um valor bastante utilizado (Triola, 2013).

A largura do intervalo de confiança é uma medida de precisão da estimação. E, como a precisão é inversamente proporcional ao nível de confiança a obtenção de intervalos de confiança mais encurtados (mais precisos) colabora para uma tomada de decisão mais acertada (Montgomery, 2003).

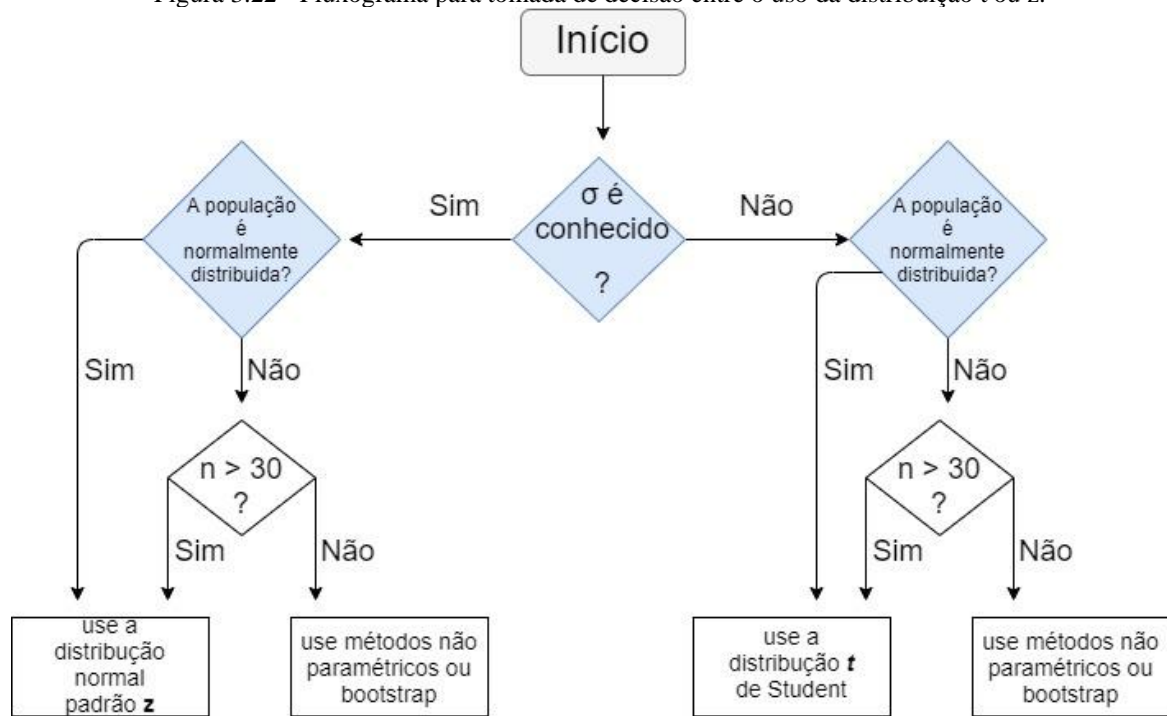
A metade do intervalo de confiança é chamado também de margem de erro da estimativa para um dado nível de confiança. O nível de confiança  $100(1-\alpha)\%$ , o desvio padrão  $\sigma$  e o tamanho  $n$  da amostra impactam diretamente no erro de estimação. Uma possível alteração em

um desses três parâmetros influencia conseqüentemente no intervalo de confiança (Magalhães 2015).

Ao aumentar o nível de confiança pretendido, conseqüentemente obtém-se maiores valores de  $z_{\alpha/2}$  e, portanto, uma maior margem de erro  $E$  e um intervalo de confiança mais largo. Quanto maior o intervalo maior é as chances de que a média populacional  $\mu$  esteja inclusa dentro dele. A variabilidade da população também afeta consideravelmente a largura desse intervalo, visto que o desvio-padrão  $\sigma$  indica a dispersão dos valores amostrais em relação a média populacional. A respeito do tamanho das amostras  $n$ , o seu aumento acarreta mais quantidade de informação disponível. Assumindo que a variabilidade da população representada por  $\sigma$  e o nível de confiança adotado sejam constantes, o aumento de  $n$  gera intervalos mais curtos, isto é, intervalos mais informativos. O mesmo é válido para o caso em que a metade do intervalo de confiança é calculado através da distribuição de *Student*.

Triola (2013) estruturou um fluxograma para ajudar na eleição da distribuição mais apropriada para a construção do intervalo de confiança, dentre a distribuição  $t$  de *Student* e a distribuição normal padrão  $z$ . O autor organizou alguns postos-chave mediante um fluxograma descrito na Figura 3.22. Em casos de amostras pequenas ( $n < 30$ ) com distribuições muito diferentes da normalidade, esses dois tipos de distribuições não se aplicam. Para esses casos recomenda-se a utilização de métodos não paramétricos ou o método computacional *bootstrap* que não precisam de uma suposição precedente a respeito da população original (Triola, 2013).

Figura 3.22 - Fluxograma para tomada de decisão entre o uso da distribuição t ou z.



Fonte: Triola (2013).

### 3.3.13 O Ambiente Arena

A partir dos *softwares* SIMAN e CINEMA (feitos para computadores pessoais) desenvolveu-se em 1993 o programa Arena. O primeiro, lançado em 1983, é também uma linguagem de simulação e, é uma continuidade da linguagem GPSS (primeira linguagem de simulação criada em 1961). Enquanto o segundo (desenvolvido em 1984), é um *software* que incorpora a animação gráfica (Prado, 2010).

Ferramenta comercializada pela Paragon Tecnologia Ltda no Brasil, o *software* Arena auxilia na construção e execução de modelos computacionais e fornece recursos de modelagem, animação, análise estatística e análise de resultados (Rosseti, 2016; Ramos Neto e Pinto, 2004).

A linguagem SIMAN no Arena permite ao usuário construir o modelo usando a metodologia de construção por blocos - *drag and drop* (arrastar e soltar). Esse método exige o modelador de conhecer a linguagem SIMAN através de linhas de comando durante a modelagem. Os blocos funcionam como comandos de uma linguagem de programação como Delphy, Fortran, Cobol, VB, etc. Portanto, o processo de modelagem torna-se mais rápido e proporciona uma clara visualização do modelo (Rosseti, 2016; Prado, 2010; Souza, 2009).

A modelagem é construída no Arena se baseando na abordagem por processos do sistema (Freitas Filho, 2001). O movimento das entidades acontece seguindo um sentido lógico e, ocorre através da conexão entre os blocos (Lima *et al*, [2006?]). No Arena, os blocos de

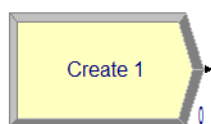
construção ou módulos podem ser selecionados como elementos dos *templates* (conjunto de módulos) e inseridos na área de projeto (área de trabalho) onde o fluxograma é construído (Souza, 2009). Os módulos de *templates* são enquadrados em duas categorias: módulos de fluxograma e módulos de dados.

Os módulos de fluxograma são aqueles que por meio de conexões formam uma rede de informações e comandos por onde as entidades se movimentam. Eles descrevem a lógica do processo de maneira visual podendo ser nós (desvios) ou locais de passagem das entidades, ou pontos de origem ou saída das entidades do modelo. A criação do fluxo entre um módulo e outro é permitida através de pontos de entrada e saída embutidos em cada módulo. Já inserido na área de trabalho, através de um duplo clique sobre módulo abrir-se uma caixa de diálogo onde é permitido configurar e editar os procedimentos a serem executados pelo módulo (Lima *et al*, [2006]; Kelton, 2015; Paragon, 2006?).

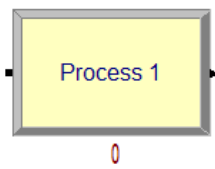
Os *módulos de dados*, embora pertencentes aos *templates*, não são inseridos na área de trabalho. Aparecem na área de planilha como informações sobre os elementos do processo como filas, recursos e entidades. Valores numéricos, expressões e variáveis, que são associadas integralmente ao modelo, podem ser configuradas nesse tipo de módulo. Eles permitem, para cada elemento, a adição e remoção de linhas contendo informações e, edição de conteúdo (Paragon, 2006?; e Kelton, 2015).

Objetos tais como recursos, variáveis, filas, tipos de entidade aparecem com o mesmo nome tanto nos módulos de fluxo quanto nos módulos de dados fazendo uma ligação entre esses dois tipos de módulos. Os nomes em comum aparecem como listas suspensas na área de planilha do Arena quando se clica em qualquer um desses módulos ajudando o modelador a não cometer erros de digitação (Kelton, 2015).

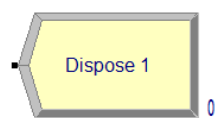
Para a construção do modelo neste trabalho serão utilizados os seguintes módulos de fluxograma dos *templates basic process* e *advanced process*:



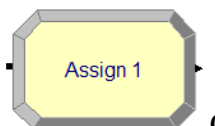
O módulo *create* é responsável pela inserção das entidades no modelo. O intervalo de tempo em que as entidades entram no modelo e o tipo de entidade são informações são informações configuradas nesse módulo (Lima *et al*, 2006?).



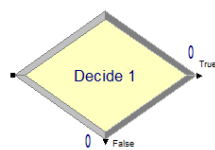
O módulo *process* tem o papel de consumir um espaço de tempo de permanência da entidade no sistema representando um tempo de execução de uma tarefa. Nesse módulo, pode-se configurar a necessidade de recursos (máquina ou operador) pela entidade para a realização da tarefa ou simplesmente gastar um tempo para que a tarefa seja concluída (Paragon, 2006?).



O papel do módulo *dispose* é retirar as entidades do sistema (Paragon, 2006?).



O bloco *assign* é responsável pela alteração ou atribuição de valores a atributos de entidades, variáveis do sistema, modificação das imagens de entidades e outras variáveis ou parâmetros do modelo. É possível mais de uma atribuição por módulo (Paragon, 2006?).

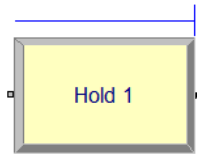


Baseado em uma ou mais possibilidades ou em uma ou mais condições o módulo *decide* propicia opções de fluxo para as entidades em um determinado ponto do modelo (Paragon, 2006?).

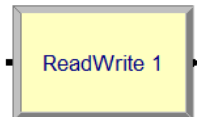


O módulo *record* oferece o registro de informações estatísticas além daquelas geradas pelas estatísticas normais do Arena depois da simulação. De acordo com os objetivos do modelo, registrar tempos que uma entidade gasta entre determinadas etapas do processo ou funcionar como um simples contador são opções deste módulo (Paragon, 2006?).





A função do módulo *hold* é segurar a entidade numa fila para esperar por um sinal ou segurar indefinidamente (para ser removida através do módulo *remove*) ou aguardar por uma condição intrínseca. Caso a condição seja atendida, a entidade prossegue para o próximo módulo (Lima *et al*, 2006?).



O módulo *read/write* serve para ler dados históricos armazenados em um arquivo externo ao Arena e o módulo faz a ligação dos dados a variáveis e atributos do modelo. Esse módulo também faz o registro de dados gerados no modelo em um arquivo externo (Kelton, 2015).

## 4 METODOLOGIA

Geralmente, por meio de dados obtidos da própria mina, o Engenheiro de Minas faz aproximações determinísticas para fazer a previsão das produções futuras e, assim, fornece as metas periódicas. Há uma variação significativa de aproximações determinísticas em relação à produção real, quando se adere a essa metodologia, o que gera incertezas para o Engenheiro de Minas ao planejar (Kaba *et al*, 2014). Visto que os sistemas, em muitas minas, apresentam problemas complexos, como gargalos na operação e falta de aderência entre os planos de produção e o executado, a simulação é uma importante ferramenta para solucioná-los.

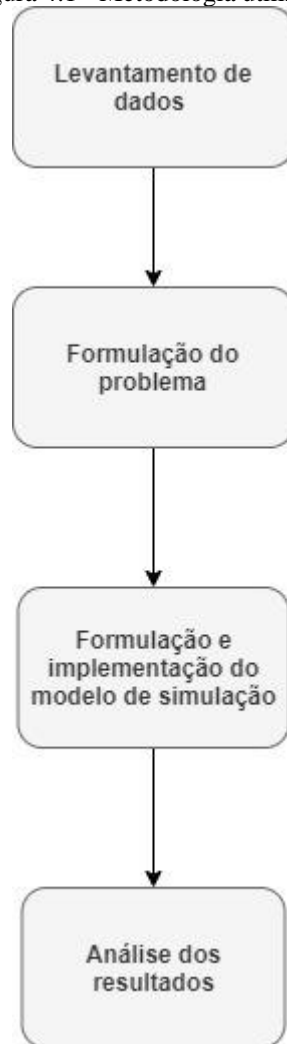
O foco deste trabalho está na previsão do tempo de execução de um plano de perfuração em uma área que deve ser perfurada, carregada e desmontada para que um equipamento de carga possa efetuar o carregamento do material desmontado. O ideal é que a liberação da área desmontada ocorra exatamente ou então com uma certa antecedência do momento previsto em que se tenha um equipamento de carregamento livre para efetuar o carregamento de acordo com o sequenciamento previsto pelo planejamento de lavra.

No estudo de caso deste trabalho a empresa de mineração faz essa previsão baseada em valores médios das disponibilidades físicas e utilização da frota de equipamentos de perfuração e de uma taxa de penetração. Incertezas estão associadas a esses índices já que eles variam de um dia para outro e por equipamento.

A fim de considerar estas incertezas na previsão foi desenvolvido um modelo de simulação a eventos discretos onde os índices disponibilidade física (DF) e utilização (UT) foram modeladas estatisticamente. A taxa de penetração (TP) mesmo sendo uma variável de incerteza será considerada em todo trabalho como um valor constante. As previsões obtidas com o modelo de simulação e com a prática atual da empresa que trabalha com valores constantes foram comparadas. O modelo de simulação foi desenvolvido no *software* Arena®.

A metodologia utilizada consistiu no levantamento de informações relativas à operação de perfuração da mina do estudo de caso e de dados necessários para o desenvolvimento do modelo de simulação, estabelecimento do problema da previsão do tempo de execução do plano de perfuração, formulação e implementação do modelo de simulação e análise dos resultados. A Figura 4.1 ilustra a metodologia utilizada.

Figura 4.1 - Metodologia utilizada.



#### 4.1 Levantamento de dados

Para o desenvolvimento do modelo de simulação é importante o cálculo do tempo em horas necessário para uma perfuratriz com uma produtividade (PDE) dada em m/h realizar um furo com um determinado comprimento.

A partir dos dados de DF, UT e TP, a PDE pode ser calculada pela expressão 4.1:

$$PDE = DF \times UT \times TP \quad (4.1)$$

O tempo em horas  $T_f$  necessário para uma perfuratriz executar um furo de profundidade  $H_f$  em metros pode ser obtido dividindo-se o comprimento do furo pela sua produtividade PDE.

A partir do  $T_f$  calculado através da expressão 4.2 é possível determinar o tempo da realização de um plano de perfuração com  $n$  furos.

$$T_f = \frac{H_f}{PDE} \quad (4.2)$$

Para o estudo presente, os dados foram fornecidos por uma mineradora de ferro. Na operação de perfuração são utilizadas seis perfuratrizes sendo que uma é destinada à furos de pré-corte e as outras cinco são destinadas aos furos de produção. As seis perfuratrizes são do tipo furo abaixo, *Down the hole* (DTH) sendo que a perfuratriz de pré-corte trabalha sobre esteiras e as outras cinco que são destinadas aos furos de produção operam sobre caminhões com o objetivo de oferecer maior mobilidade para seus deslocamentos de uma área a outra. A perfuratriz de pré-corte é da marca Epiroc modelo FlexiROC D60 e as outras cinco são da marca Atlas Copco modelo T4BH A4. A fim de controlar o desempenho das perfuratrizes, foram dados os seguintes nomes para cada uma delas: PF0121 (perfuratriz de pré-corte) e, PF1108, PF1110, PF22057, PF4501 e PF7115 (perfuratrizes de produção).

Para garantir que a operação da mina não seja interrompida, ou seja, para que ela trabalhe 24 horas por dia o seu horário de trabalho é organizado em regime de turnos (três neste caso). Um turno tem duração de seis horas e os outros dois de nove. O turno de 7h às 16h é chamado de “turno administrativo” o qual exerce a função operacional da mina e cumpre ações administrativas financeiras e de planejamento enquanto os outros dois exercem substancialmente a função operacional podendo haver um membro ou outro da empresa exercendo função administrativa financeira e/ou de planejamento. A organização dos horários de trabalho da mina é resumida na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Horários de trabalho da mina dividido em turnos.

<b>Turno</b>	<b>Período</b>
1	1h - 7h
2	7h - 16h
3	16h - 1h

O horário de trabalho das perfuratrizes obedece ao horário de trabalho da mina, salvo a perfuratriz de pré-corte que só trabalha no turno administrativo (7h às 16h).

A respeito da geometria dos furos foram usados 11 metros para o comprimento sendo 1 metro reservado à subfuração o que resulta em uma altura de banco de 10 metros. Os diâmetros utilizados para os furos foram respectivamente 6” e 9” sendo o primeiro valor relativo aos furos de pré-corte e o segundo referente aos furos de produção. O primeiro deve ser necessariamente menor, pois eles são usados próximos da região dos limites de cava ou dos *pushbacks*, setores da mina em que os taludes devem ser recortados cuidadosamente.

Dados foram coletados dos equipamentos de perfuração da própria mina, durante a operação. Os dados disponibilizados são referentes a um período de três meses equivalente a 91 dias para os meses de abril, maio e junho de 2018. Foram fornecidos os dados de DF da frota de perfuratrizes em %, os tempos de perdas operacionais (PO) em horas e as TP em m/h de cada uma das seis perfuratrizes que compõe a frota de perfuração. As DF da frota foram obtidas diariamente pela equipe de manutenção, para os meses de abril e maio, visto que essa informação é passada para equipe de operação da mina mensalmente.

Normalmente, as disponibilidades das perfuratrizes são determinadas de cronogramas oriundos da equipe de manutenção enquanto que as utilizações são obtidas do passado histórico da mina (Kaba, 2016). O espaço de tempo em que os dados foram coletados também deve ser levado em consideração.

Por exemplo, a partir de uma população de dois anos (Agosto de 2009 - Agosto de 2011) dados referentes às perdas por falhas e reparos de quatro perfuratrizes foram extraídos de um banco de dados do sistema de gerência de manutenção computadorizado de uma empresa mineradora localizada no norte da Suécia. Foi possível estudar a confiabilidade desses equipamentos em duas minas subterrâneas por meio dos dados de TBF (*time between failure*) – tempo entre falhas (Al-Shalabi, 2014).

Para uma boa análise dos dados de eficiência dos equipamentos necessita-se de um tempo, pelo menos superior a um ano, visto que o desempenho dos equipamentos de mineração varia com as estações do ano.

As PO foram coletadas diariamente pela equipe de operação de cada uma das seis perfuratrizes durante os três meses. As TP foram tiradas de um plano de perfuração (conforme a planilha da empresa). Cada plano (área) refere-se a uma zona da mina que representa uma determinada massa (t) que será perfurada com um determinado número de furos que compõe um certo tipo de material (um conjunto de litologias). Nesse plano foi determinado uma taxa de penetração média - TP.

Para os dados referentes as TP, foram fornecidos pela empresa dois valores fixos: 12 e 17 m/h. Uma zona apresentou um material médio mais duro (TP = 12 m/h) e outra um material

médio mais brando (TP = 17 m/h). Os valores das taxas de penetração são importantes devido à heterogeneidade da mina que necessita lavar várias frentes simultâneas.

Os dados referentes às PO e às TP são gerados através de um *tablet* (também conhecido como *tracker*). Com esse dispositivo, durante a operação, os operadores fazem os apontamentos dos motivos de perdas e os instantes de início e término em que esses acontecem. Os dados das TP são medidos da mesma forma, apontando o início e término da perfuração propriamente dita. Esses dados são enviados para uma central de despacho da mina onde o *software* Smartmine gera os relatórios com os tempos de perdas e as taxas de penetração calculadas. A partir dessas informações é possível calcular o percentual das perdas e o próprio valor da UT.

É evidente que o êxito dos registros de apontamentos de perdas que contabilizam os fatores de eficiência dos equipamentos, tais como, OEE, disponibilidade e utilização, dependem da habilidade em coletar os dados necessários. Dados não confiáveis e inadequados podem não refletir na utilização real do equipamento (Elevli, 2010).

É também muito importante que cada perda classificada corresponda ao estado correto do equipamento (Elevli, 2010). Agyei (2019) também acrescenta que se deve levar em conta durante a coleta de dados, um relatório diário para cada perfuratriz que contenha o comprimento dos metros perfurados e o tempo produtivo.

O levantamento de dados é a fase em que, no estudo de simulação, pretende-se representar a realidade. Caso os dados obtidos não sejam coletados de maneira apropriada a partir da fonte, poderão se tornar inúteis para a autenticidade de um estudo de simulação. Com o objetivo de determinar o tempo de realização de um determinado plano de perfuração o modelo de simulação foi baseado nos três fatores impactantes da PDE:

1. DF (da frota).
2. UT (da frota).
3. TP (da frota).

O modelo de simulação foi alimentado com distribuições de probabilidades ajustadas aos dados de DF, UT e rendimento. As TP foram inseridas no modelo como valores constantes. Portanto, os tempos de perdas por motivos mecânicos (manutenção) e operacionais foram considerados por meio dos parâmetros DF e UT respectivamente.

Os dados da DF foram obtidos de forma direta. Antes de definir o cálculo das DF denomina-se de horas calendário (HC) as horas programadas para o equipamento trabalhar por

dia. HC é determinado conforme o horário de trabalho da mina, portanto, HC é igual a 24 horas por dia e, partindo dos valores da DF fornecidos pela equipe de manutenção, foi possível calcular os valores da UT. Primeiramente foi necessário obter as horas disponíveis para operar (HD).

O número de horas disponíveis para operar (HD), que corresponde à diferença entre HC e o tempo perdido por manutenção (PM), pode ser obtido multiplicando-se DF por HC conforme a expressão 4.3.

$$DF = \frac{HC - PM}{HC} = \frac{HD}{HC} \quad (4.3)$$

As horas disponíveis representam as horas em que a máquina está em um estado mecânico adequado e seguro para poder operar. Para a determinação da UT, que representa o fator de aproveitamento das HD, o número de horas eficientes (HE) foi obtido subtraindo-se de HD o total da soma das perdas diárias por motivos operacionais da frota de seis perfuratrizes, ou seja, PO conforme a expressão 4.4.

$$UT = \frac{HD - PO}{HD} = \frac{HE}{HD} \quad (4.4)$$

Para a realização da soma das PO da frota tem-se dados de 47 tipos de PO (em horas), o que se mostrou um grande detalhamento nos dados fornecidos a respeito das paradas operacionais. No entanto, não é necessário investir muito esforço na análise de todos os tipos de perdas, pois gastar-se-ia muita energia e obteria pouquíssimos resultados, visto que existem parâmetros que não impactam significativamente nas PO e conseqüentemente na UT.

Foi realizada uma análise inicial dos 47 tipos de perdas coletados das 6 perfuratrizes em estudo durante os meses de abril, maio e junho, a fim de se obter uma melhor compreensão dos dados e verificar se poderia existir alguma relação entre estes tipos de perdas com os meses coletados ou com as diferentes perfuratrizes. Para uma melhor organização dos dados criou-se uma tabela com as seguintes informações:

- índice j da causa da perda operacional;
- as causas das perdas;
- o número total de horas de perdas operacionais de uma determinada causa j ( $PO_j$ );

- a contribuição do número de horas de perdas operacionais causada por uma determinada causa de perda em relação ao número total de horas de todas as causas de perdas operacionais ( $\% PO_j$ ).

A terceira coluna, o número total de horas de perdas operacionais de uma determinada causa  $j$ , é obtida através da expressão 4.5.

$$PO_j = \sum_{i=1}^{n_j} PO_{ji} \quad (4.5)$$

Onde  $n_j$  é o número de ocorrências da causa  $j$ .

A quarta coluna, contribuição de uma determinada causa  $j$  nas perdas operacionais totais corresponde aos valores da terceira coluna dividido pelo somatório total das perdas operacionais conforme a expressão 4.6.

$$\% PO_j = \frac{PO_j}{\sum_{j=1}^{47} \sum_{i=1}^{n_j} PO_{ji}} \times 100 \quad (4.6)$$

A Tabela 4.2 mostra o total de horas de perdas operacionais de 47 causas de perdas ordenadas crescentemente e a relação de cada uma delas com o total de perdas.

Tabela 4.2 - Horas de perdas operacionais separadas por causas e a devida razão de cada com o total das 47 perdas.

Índice $j$	CAUSA DE PERDAS	Contribuição	
		Nº de horas de perdas operacionais por causa (h)	de uma causa em relação a todas as causas (%)
1	ABASTECIMENTO ENCERRADO	0,008	0,0002
2	IMPRODUTIVA EXT-POSTO SEM COMBUSTIVEL	0,009	0,0002
3	AG ENTREGA P/ MANUT	0,018	0,0004
4	AG EQTO AUXILIAR	0,530	0,0113
5	IMPRODUTIVA INT-TRANSPORTE EM CARRETA	0,544	0,0116
6	IMPRODUTIVA INT-AG MAO OBRA AUXILIAR	0,951	0,0202



7	IMPRODUTIVA INT-MAT DESG TROCA CHAPE BRC	0,980	0,0208
8	INSP CONDICAO OPERACIONAL	1,083	0,0230
9	MAT DESG TROCA BITSUB	1,216	0,0258
10	SEM EQUIP SEGURANCA	1,262	0,0268
11	AG GEOLOGIA	1,268	0,0269
12	LANCHE	1,584	0,0336
13	IMPRODUTIVA INT-LOCOMOCAO TROCA DE TURN	1,589	0,0337
14	TRANSPORTE EM PRANCHA	1,598	0,0339
15	INSPECAO OPERA/LIMPEZA	1,720	0,0365
16	IMPRODUTIVA INT-RECEBE COMPLEMENTO ÁGUA	1,999	0,0425
17	FALTA FRENTE	2,604	0,0553
18	AG TOPOGRAFIA	3,329	0,0707
19	TROCA DE OPERADOR	3,360	0,0714
20	IMPRODUTIVA INT-MEDICAO QUEBRA BOCAFURO	3,805	0,0808
21	OPERADOR INAPTO	4,367	0,0927
22	AG MARCACAO MALH PERF	5,143	0,1092
23	AG ORIENTACAO	5,477	0,1163
24	AG PARA ABASTECER	10,824	0,2299
25	FALTA DE ÁGUA	11,673	0,2479
26	IMPRODUTIVA INT-AG TROCA MAT DESGASTE	13,722	0,2914
27	IMPRODUTIVA EXT-MAU TEMPO	14,271	0,3031
28	FALTA DE COMBUSTIVEL	17,817	0,3784
29	IMPRODUTIVA INT-AG PLANEJ DEMANDA	26,643	0,5658
30	ESTRADA BLOQUEADA	28,815	0,6119
31	MAT DESG TROCA BROCA	35,891	0,7622
32	PALESTRA OPERADOR	36,029	0,7652
33	IMPRODUTIVA INT-AG COMBOIO	40,367	0,8573
34	AG PRANCHA	42,065	0,8933
35	MAT DESG TROCA HASTE	58,711	1,2469
36	ABASTECENDO	78,796	1,6734
37	MAT DESG TROCA MARTELO	131,886	2,8009
38	AG DETONACAO	175,899	3,7356
39	MAT DESG TROCA BIT	207,458	4,4058
40	TROCA DE TURNO	208,371	4,4252
41	REFEICAO	215,635	4,5795
42	DISPONIVEL PARA OPERAR	233,504	4,9590
43	AG ACERTO DE PRACA	252,945	5,3718
44	CONTROLE DE RUIDOS	276,262	5,8670
45	LOCOMOCAO LONGA	285,923	6,0722
46	LIBERADO PELA MANUT	288,820	6,1337
47	FALTA DE OPERADOR	1971,959	41,8788
<b>TOTAL</b>		<b>4708,73</b>	<b>100</b>

A partir da Tabela 4.2 observou-se que cada uma das 34 primeiras causas de perdas representaram um percentual abaixo de 1% (47,08 horas) quando comparadas ao total de todas as causas de perdas. Portanto, essas causas, foram consideradas individualmente insignificantes e foram agrupadas em apenas um grupo que foi nomeado de “outras perdas”. Foram, então, atribuídas a esse grupo 322,5626 horas de perdas operacionais equivalente a 6,8503% do total de perdas.

Também foi notado que dentro dos 47 motivos de perdas ocorreram dois apontamentos de causas, “liberado pela manut” e “disponível para operar”, que poderiam ser incluídos em “falta de operador”. A causa “liberado pela manut” tem o mesmo significado de “disponível para operar”, ou seja, a máquina está disponível após realizada uma manutenção e nenhum operador atuou nessa máquina após essa liberação. Portanto, se não tem operador para atuar na máquina, logo, a máquina está parada por falta de operador.

Assim, eliminou-se duas causas do total de causas e agrupou-se três motivos de perdas em somente um, a falta de operador. A “falta de operador” continuou sendo a causa mais impactante, que já era antes de se agrupar. A falta de operador representou após o agrupamento uma perda de 2494,28 horas equivalente a 52,97% do total de perdas.

Com esses dois novos grupos categorizados, foram eliminadas trinta e cinco razões de perdas para serem analisadas. Restou-se, por fim, apenas doze causas de perdas e a tabela 4.2 se transformou na Tabela 4.3. Portanto, devido aos agrupamentos, a quarta coluna da Tabela 4.3 foi calculada conforme a expressão 4.7.

$$\%PO_j = \frac{PO_j}{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_j} PO_{ji}} \times 100 \quad (4.7)$$

Tabela 4.3 - Horas de perdas operacionais e a devida % em relação ao total de perdas dividida 14 causas.

Índice <i>j</i>	CAUSAS DE PERDAS	Nº de horas de PO por causas (h)	Contribuição de uma causa em relação a todas as causas (%)
1	FALTA DE OPERADOR	2494,283	52,971
2	OUTRAS PERDAS	322,563	6,850
3	LOCOMOCAO LONGA	285,923	6,072
4	CONTROLE DE RUIDOS	276,262	5,867
5	AG ACERTO DE PRACA	252,945	5,372
6	REFEICAO	215,635	4,579
7	TROCA DE TURNO	208,371	4,425
8	MAT DESG TROCA BIT	207,458	4,406
9	AG DETONACAO	175,899	3,736
10	MAT DESG TROCA MARTELO	131,886	2,801
11	ABASTECENDO	78,796	1,673
12	MAT DESG TROCA HASTE	58,711	1,247
	TOTAL	4708,730	100

A Tabela 4.3 foi utilizada para análise de um gráfico de Pareto que vai ser apresentado na análise dos resultados.

#### 4.2 Problema da previsão do tempo de execução do plano de perfuração

O problema a ser estudado se deve em razão dos incidentes de atrasos na entrega das massas prontamente desmontadas para que os equipamentos de carregamento (escavadeiras e/ou pás – carregadeiras) possam começar a carregar o minério. Dessa forma, ocorrem os gargalos, os equipamentos de carregamento ficam aguardando que uma determinada massa esteja liberada. Os tempos de espera dessas máquinas resultam na demora da chegada do minério até a alimentação da usina. Uma massa liberada para o carregamento precisa antes ser perfurada, carregada por explosivos e, então, desmontada.

A perfuração deve estar à frente do carregamento tendo em vista que após a operação de perfuração, os furos devem ser carregados com explosivos e detonados. Essa etapa dura aproximadamente 72 horas considerando a liberação da mina após a detonação e a conferência de que todos os furos foram, realmente, detonados.

O desmonte não pode ocorrer durante o turno da noite por conta da segurança e os ruídos gerados às comunidades vizinhas. O desmonte geralmente ocorre no turno do dia (7h –

16h). É necessário o devido gerenciamento das atividades de perfuração e desmonte de acordo com a equipe de operação para ajustar o melhor horário conforme as previsões de término da operação de perfuração.

Deve-se, portanto, tentar fazer uma previsão mais confiável do tempo de realização da perfuração para uma determinada área. Essa área pode ser considerada um plano de perfuração o que corresponde a uma zona da mina. Na previsão é importante que os parâmetros de data e hora do início e término da realização do plano de perfuração sejam estimados.

A área deve conter, no mínimo, a quantidade de massa equivalente a que os equipamentos de carregamento conseguem produzir em um determinado tempo. Normalmente na empresa essa previsão é feita em uma planilha de Excel com valores médios de disponibilidade, utilização e taxas de penetração das perfuratrizes. Esses dados são obtidos a partir de um histórico da mina.

A equipe de planejamento de mina, partindo de um modelo de blocos cria um plano de lavra de curto prazo (semanalmente e mensalmente). Esse plano é enviado a equipe de operação da mina para que ela possa executar. Nesse plano é definido as áreas prioritárias que deverão ser lavradas naquele período (semana ou mês). A equipe de operação é responsável pela alocação de todos os equipamentos da mina, sobretudo, os equipamentos de perfuração e carregamento. Esses definem as frentes de avanço da lavra. Tendo posse de uma previsão (diária, semanal, mensal) do término das áreas de perfuração e carregamento é possível tomar decisões.

A escolhas das frentes adequadas para a alocação do número de perfuratrizes e carregadeiras e suas respectivas áreas é de suma importância no decorrer da operação, já que a mina é heterogênea e necessita de lavrar em várias frentes simultaneamente para compor produção e qualidade.

Por exemplo, uma determinada área “1” em que a operação de perfuração se encontra adiantada em relação ao prazo de entrega (liberação) para se iniciar o carregamento após o desmonte, não exige uma alta produtividade por parte dos equipamentos de perfuração. No entanto, uma outra área “2” recentemente liberada para ser perfurada e com um prazo mais curto demanda uma produtividade mais alta para o cumprimento das metas do planejamento.

É necessário, portanto, saber quantas perfuratrizes devem ser utilizadas em cada área da mina e as suas respectivas produtividades a fim de se atingir as metas planejadas. Dessa forma, também é possível estimar a quantidade de operadores necessários para trabalhar naquele turno, dia, semana, mês etc. A aquisição ou venda de equipamentos podem ser considerados como

medidas estratégicas conforme a necessidade da mina. A partir do conhecimento das perdas operacionais das perfuratrizes pode-se também analisar o impacto de suas causas e propor meios para se tentar melhorar os índices de disponibilidade física e utilização dos equipamentos.

O problema da previsão do tempo de perfuração para uma área está associado também a uma data prevista para que um equipamento de carga termine o carregamento de uma área já desmontada. A partir, então, de uma dada produtividade (DF, UT e taxa de produção média em t/h) de um equipamento de carga alocado em uma determinada área (frente) deve-se estimar qual produtividade (DF, UT, e TP em m/h) devem ser atingidas na área de perfuração para se conseguir perfurar e desmontar, no mínimo, a mesma quantidade de massa que o equipamento de carga produz em um certo tempo. Assim, sempre que o carregamento de uma área terminar deveria haver uma outra massa já desmontada pronta para ser carregada pelos equipamentos de carga. A seguir, será descrito, através de um exemplo, como a empresa realiza estas previsões.

Na empresa, para fazer essa previsão, a equipe de planejamento define, por exemplo, uma massa de 150.000 t que deve ser lavrada em um determinado período. Essa massa é usada como meta a ser atingida. Foi calculado, também como meta, o tempo que uma certa escavadeira consome para carregá-la.

Partindo dessas premissas foi feito um cálculo, para a escavadeira CAT7295 EM 3308 que opera com uma taxa de produção média igual a 1600 t/h, DF = 65% (média) e UT = 60% (média). Para se calcular as HE (h/dia) dessa escavadeira, multiplicou-se HC (h/dia) por DF e UT para obter HE chegando-se ao valor de 9,36 h/dia. Ao se multiplicar a taxa de produção média por HE obteve-se a massa carregada por dia ( $M_{DIA}$ ) conforme a expressão 4.8 .

$$M_{DIA} = \text{Taxa de produção média} \times HE = 14.976 \text{ t/dia} \quad (4.8)$$

A massa considerada da área a ser lavrada ( $MS_{PLANO}$ ) nesse problema é de 150.000 t. Ao dividir  $MS_{PLANO}$  por  $M_{DIA}$ , obteve-se os dias necessários para carregar a massa do plano conforme a expressão 4.9.

$$DIAS_{CARGA} = \frac{MS_{PLANO}}{M_{DIA}} = 10,02 \text{ dias} \quad (4.9)$$

Esses cálculos foram realizados em uma planilha onde a partir da duração do carregamento (dias) foi determinada a data de término do carregamento referente às 150.000 t planejadas. A planilha com a representação desse cálculo é demonstrada na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Cálculo da previsão do término do carregamento realizado pela escavadeira CAT 7295 EM 3308.

Carregamento										
Escavadeira	M <sub>DIA</sub> (t/dia)	MS <sub>PLANO</sub> (t)	Início	Término	HC (h)	HE (h)	DIAS <sub>CARGA</sub> (dias)	Taxa de produção (t/h)	DF	UT
CAT 7295 EM 3308	14976	150000	3/5/18 1:00	<b>13/5/18 1:23</b>	24	9,36	10,02	1600	65%	60%

O mesmo valor de massa que foi enviado pelo planejamento (150.000 t) também foi tomado como meta para calcular a previsão da duração da operação de perfuração em uma determinada área. Vale lembrar que em um sequenciamento de lavra nem sempre as áreas em que o carregamento está atuando representa a mesma massa da área em que a operação de perfuração também atua. Foi incluído também no cálculo da previsão de entrega das áreas, um valor médio para a duração do carregamento de explosivos e o desmonte. Somando o tempo da perfuração com o tempo para carregar os furos e desmontar o material obteve-se o tempo para liberar a escavadeira para iniciar o carregamento.

Considerando que a densidade do material é de 2,9 t/m<sup>3</sup> e que todos os furos são verticais foram também acrescentados na base de cálculo desse plano de perfuração os seguintes dados:

E – Espaçamento: 4m

A – Afastamento: 3m

H<sub>f</sub> – Profundidade do furo: 11m

S – Subfuração: 1m

H<sub>b</sub> – Altura do banco: 10m

É necessário determinar a área do polígono ( $A_{POL}$ ) em m<sup>2</sup>, o número de furos (NF) e a massa por furo ( $MS_{FURO}$ ) em t para calcular os metros totais a perfurar nesse plano de perfuração ( $MT_{PLANO}$ ). A área  $A_{POL}$  foi calculada dividindo-se  $MS_{PLANO}$  pela multiplicação entre a densidade (D) e a  $H_b$  (dada pela diferença entre  $H_f$  e S) conforme a expressão 4.10.

$$A_{POL} = \frac{MS_{PLANO}}{(D \times (H_b))} = 5.172 \text{ m}^2 \quad (4.10)$$

Dividindo-se  $A_{POL}$  pela área da malha ( $E \times A$ ) obteve-se NF conforme a expressão 4.11.

$$NF = \frac{A_{POL}}{(E \times A)} = 431 \text{ furos} \quad (4.11)$$

$MS_{FURO}$  é obtido dividindo-se  $MS_{PLANO}$  por  $NF$  conforme a expressão 4.12.

$$MS_{FURO} = \frac{MS_{PLANO}}{NF} = 348 \text{ t} \quad (4.12)$$

Multiplicando-se  $NF$  por  $H_f$  obteve-se a metragem total do plano a ser perfurado  $MT_{PLANO}$  conforme a expressão 4.13.

$$MT_{PLANO} = NF \times H_f = 4.741 \text{ m} \quad (4.13)$$

A Figura 4.3 demonstra a planilha com o resumo dos cálculos da metragem total do plano:

Figura 4.3 - Principais valores dos cálculos dos metros a serem perfurados do plano de perfuração para desmontar 150.000 t.

Planejamento											
DENSIDADE (t/m <sup>2</sup> )	Liberado Infra	MS <sub>PLANO</sub> (t)	A <sub>POL</sub> (m <sup>2</sup> )	E (m)	A (m)	NF	NF <sub>REAL-DIA</sub>	MS <sub>FURO</sub> (t)	MS <sub>REAL-DIA</sub> (t/dia)	H <sub>f</sub> (m)	MT <sub>PLANO</sub> (m)
2,9	4/5/18 16:00	150000	5172	4,00	3,00	431	34,14	348	11880	11	4741

Antes de se iniciar os cálculos das produtividades referentes às perfuratrizes (estimada por médias) foi necessário determinar a produtividade mínima necessária ( $PDE_{MÍN}$ ) que a perfuração deve atingir para conseguir acompanhar a produtividade da operação de carregamento. Para calcular  $PDE_{MÍN}$  dividiu-se  $MT_{PLANO}$  pelo tempo previsto em horas para o equipamento de carga efetuar o carregamento ( $DIAS_{CARGA} \times 24h$ ) das 150.000t da área onde ela foi alocada. Supõe-se que é esse equipamento que deverá entrar depois na área para a qual os cálculos dos planos de perfuração estão sendo calculados conforme a expressão 4.14.

$$PDE_{MÍN} = \frac{MT_{PLANO}}{(DIAS_{CARGA} \times 24h)} = 19,71 \text{ m/h} \quad (4.14)$$

Para calcular o tempo de perfuração dos 4.741 m, calcula-se, primeiro, a produtividade de uma perfuratriz a partir dos valores médios (do mês de abril) para a DF = 67,17%, UT = 45,68% e TP = 17 m/h. A empresa utiliza para esses cálculos os valores médios da DF e UT da frota de perfuratrizes referentes ao mês anterior em que a perfuração deve ocorrer. A produtividade por equipamento de perfuração – PDE (1 pf) para as condições apresentadas acima foi calculada pela expressão 4.15.

$$\text{PDE (1pf)} = \text{TP} \times \text{DF} \times \text{UT} = 5,22 \text{ m/h} \quad (4.15)$$

Da mesma forma pode-se considerar a possibilidade de variar o número de perfuratrizes que trabalham em uma mesma área, ou seja, o número de perfuratrizes em uso (NPUSO). Portanto, assumindo os mesmos valores médios (TP, DF e UT) que foram utilizados para determinar a produtividade de um equipamento obteve-se também a produtividade de três perfuratrizes – PDE (3 pf). Para a obtenção de PDE (3 pf) multiplicou-se PDE (1pf) por NPUSO de acordo com a expressão 4.16.

$$\text{PDE (3pf)} = \text{PDE (1pf)} \times \text{NPUSO} = 15,6 \text{ m/h} \quad (4.16)$$

Pode-se observar que baseado nos dados apresentados, e considerando-se que se tem somente 3 perfuratrizes para serem alocadas inicialmente nessa área, essa produtividade é menor do que a produtividade mínima necessária,  $\text{PDE}_{\text{MÍN}}$ , para se cumprir o plano de perfuração antes do tempo previsto para o equipamento de carga terminar o carregamento do material na frente em que ela se encontra. A diferença entre a produtividade das três perfuratrizes alocadas – PDE (3pf) e a  $\text{PDE}_{\text{MÍN}}$  foi de 4,11 m/h, o que demonstra que com mais uma perfuratriz poderia completar-se o plano dentro do prazo, visto que a produtividade de um equipamento – PDE (1pf) é 5,22 m/h, ou seja, maior do que a diferença demonstrada acima.

O número de furos realizados por dia ( $\text{NF}_{\text{REAL-DIA}}$ ) é calculado dividindo-se a produtividade horária das 3 perfuratrizes ( $\text{PDE (3pf)} \times 24$ ) por  $H_f$  conforme a expressão 4.17.

$$\text{NF}_{\text{REAL-DIA}} = \frac{((\text{PDE (3pf)}) \times 24\text{h})}{H_f} = 34,14 \text{ furos/dia} \quad (4.17)$$



O número de horas previstas para uma perfuratriz executar o plano de perfuração, HPP (1 pf), é obtido dividindo-se a metragem total do plano  $MT_{\text{PLANO}}$  por PDE (1 pf), conforme a expressão 4.18.

$$\text{HPP (1 pf)} = \frac{MT_{\text{PLANO}}}{\text{PDE (1 pf)}} = 909,08 \text{ horas} \quad (4.18)$$

Analogamente, o número de horas previstas para as 3 perfuratrizes alocadas executarem o plano, HPP (3 pf), é obtido dividindo-se  $MT_{\text{PLANO}}$  por PDE (3 pf), como mostrado na expressão 4.19.

$$\text{HPP (3 pf)} = \frac{MT_{\text{PLANO}}}{\text{PDE (3 pf)}} = 303 \text{ horas} \quad (4.19)$$

A Figura 4.4 resume os cálculos das horas previstas para perfurar (HPP) do plano.

Figura 4.4 -Planilha base para o cálculo das horas previstas para perfurar o plano.

Perfuratrizes								
NPUSO	DF	UT	TP - Taxa de penetração (m/h)	PDE (1 pf) (m/h)	PDE <sub>MÍN</sub> (m/h)	PDE (3 pf) (m/h)	HPP (1pf) (h)	HPP (3 pf) (h)
3	67,17%	45,68%	17	5,22	19,7	15,6	909,08	303

Após a área ser perfurada totalmente deve ser adicionado o tempo do carregamento de explosivos, amarração e desmonte (CAD) em h, que neste caso foi considerado um tempo média de 3 dias (72 horas). Portanto, obteve-se as horas previstas para a área ser liberada para o carregamento iniciar. As expressões 4.20 e 4.21 fornecem respectivamente as horas previstas para o carregamento iniciar (HPCI) e o número de dias previstos ( $N_{\text{DIAS}}$ ) para a área ser liberada para o carregamento.

$$\text{HPCI} = \text{HPP (3pf)} + \text{CAD} = 330 \text{ horas} \quad (4.20)$$

$$N_{\text{DIAS}} = \frac{\text{HPCI}}{24 \text{ h}} = 13,76 \text{ dias} \quad (4.21)$$

A Figura 4.5 resume os cálculos das horas e dias previstos para a área do plano de perfuração ser liberada para o carregamento:

Figura 4.5 - Planilha com o cálculo dos principais valores da execução do desmonte e as datas de término da perfuração e do desmonte.

Desmorte					
Tempo CAD (h)	HPCI (h)	N <sub>DIAS</sub>	DIAS <sub>CARGA</sub> (dias)	Término da perfuração	Término do desmorte
72.00	330	13.76	10.02	15/5/18 10:14	18/5/18 10:14

Calculado o número de dias,  $N_{DIAS}$ , obteve-se a data e hora da liberação da área para iniciar o carregamento.

Como já mencionado, a empresa utiliza para esses cálculos valores médios de DF e UT da frota de perfuratrizes do mês anterior ao da execução do plano de perfuração. Tanto a DF quanto a UT são variáveis aleatórias e, como tal, podem assumir diferentes valores a cada dia. Pretende-se através da simulação a eventos discretos fazer uma previsão do tempo de execução do plano de perfuração levando-se em conta essas variabilidades e comparar os resultados com aqueles obtidos pela metodologia atualmente empregada pela empresa.

### 4.3 Desenvolvimento do modelo

Neste estudo o tempo de execução de um plano de perfuração foi simulado com o software ARENA, considerando que os parâmetros de DF e UT ou rendimento (produto entre DF e UT) variam diariamente segundo funções de distribuição de probabilidades ajustadas aos dados disponíveis. Para as taxas de penetração foram usados valores médios. Desta forma, espera-se que a previsão do tempo de execução do plano de perfuração, se aproxime mais da realidade, uma vez que não se utiliza valores médios para DF e UT na previsão.

#### 4.3.1 Algoritmo do modelo

A ideia básica do algoritmo para o cálculo do tempo necessário para executar um plano de perfuração é simples. As seguintes considerações serão feitas para a descrição do processo de execução do plano de perfuração:

- a. a produtividade efetiva de uma perfuratriz seja dada pela sua taxa de penetração em m/h multiplicada pela sua disponibilidade física e utilização, ou pelo seu rendimento que é o produto entre DF e UT;
- b. a disponibilidade física e utilização ou o rendimento de cada perfuratriz varia de um dia para o outro, e conseqüentemente, a sua produtividade efetiva;
- c. todos os furos terão o mesmo comprimento;

- d. uma perfuratriz pode executar mais de um furo considerando um dia de 24 horas;
- e. no início de um dia a perfuratriz deverá completar o restante do furo que estava fazendo no fim do dia anterior.

O tempo para o cumprimento de um plano de perfuração será o intervalo de tempo compreendido entre o instante em que se inicia a perfuração e o instante em que se termina de perfurar todos os furos, ou seja, quando ao se terminar um furo, não existir nenhum outro furo sendo executado e nenhum outro furo para ser perfurado ainda dentre todos aqueles planejados.

Para cada dia e para cada perfuratriz, no início de um dia são calculados a produtividade efetiva e o tempo necessário para se executar um furo completo. Uma variável que controla para cada perfuratriz o tempo de perfuração é zerada no início de um dia. Após o término de cada furo e desde que o dia não tenha terminado ainda, esta variável é atualizada somando-se o tempo gasto naquele dia na execução do furo que terminou de ser perfurado.

Após o cálculo da produtividade efetiva no início de um dia, do tempo para se executar um furo completo e de zerar a variável que acumula o tempo de perfuração de um dia para cada perfuratriz, calcula-se o tempo necessário para a perfuratriz completar o furo que ela estava fazendo e acumula-se o número total de furos executados até aquele momento por todas as perfuratrizes. Supõe-se que nenhum furo leva mais do que 24 horas para ser completado.

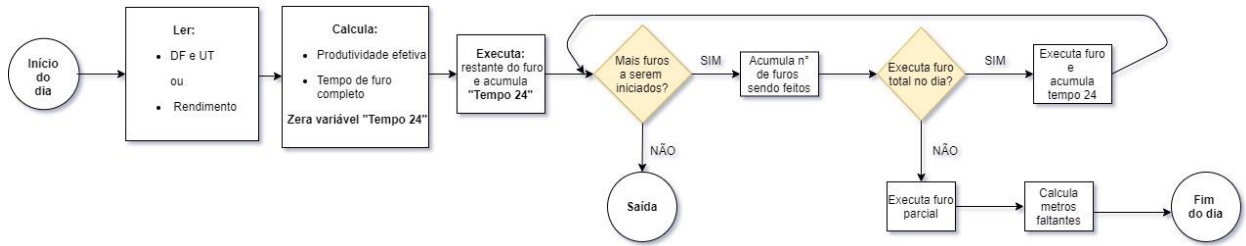
Após o término de um furo se houver mais furo para ser executado, deve ser verificado se ele terá condições de ser terminado naquele dia. Caso seja possível, a variável que acumula o tempo de perfuração em um dia é incrementada com o valor do tempo de perfuração de um furo completo, bem como o número total de furos perfurados é atualizado, e se possível, a perfuratriz passa a perfurar outro furo. Esse processo se repete até que um furo não possa ser completado até o fim de um dia, situação que vai acontecer quando o tempo de perfuração de um furo para uma dada perfuratriz somado com o seu tempo acumulado de perfuração em um dia ultrapassar o total de 24 horas.

Nesse caso, deve-se então calcular a quantidade de metros que vão faltar para esse furo ser terminado no outro dia, terminando assim o processo referente a um dia.

Para os dias seguintes este processo se repetirá até que todos os furos tenham terminado de serem perfurados.

No fluxograma apresentado na Figura 4.6 tem-se representado este algoritmo para cada perfuratriz durante o período de um dia.

Figura 4.6 - Algoritmo do modelo considerando a perfuração em 24 horas.



### 4.3.2 Descrição do modelo

O modelo de simulação construído para simular o tempo de execução da operação de perfuração para uma determinada massa (tonelagem) de minério referente a um polígono planejado pela equipe de planejamento de mina é constituído por três blocos de simulação.

1. Bloco de leitura de dados.
2. Bloco de controle do tempo ou término da simulação.
3. Bloco de execução dos furos.

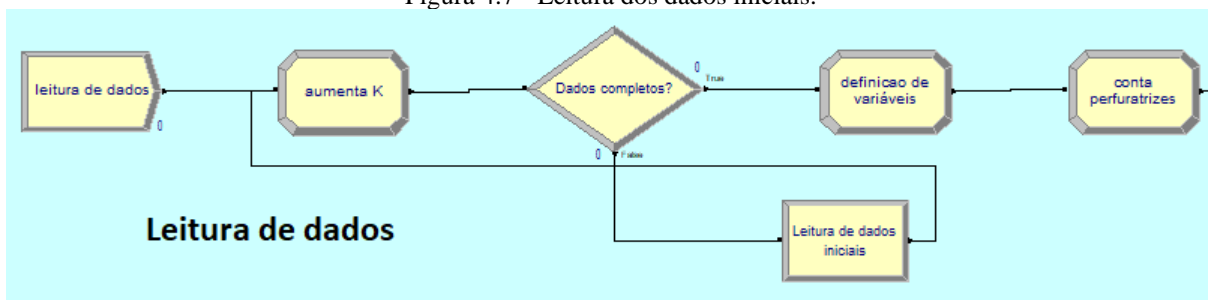
O cálculo da produtividade efetiva pode ser feito usando valores separados de DF e UT amostrados em suas respectivas distribuições de probabilidades ajustadas ou então valores de rendimento amostrados de acordo com a sua distribuição de probabilidade. Pode-se também trabalhar com distribuições diferentes para cada perfuratriz ou então com distribuições referentes aos valores médios da frota.

#### 4.3.2.1 Bloco de leitura de dados

O bloco de leitura de dados é responsável pela leitura em um arquivo Excel de informações referentes ao plano de perfuração cujo tempo de execução se pretende simular. As informações lidas são armazenadas no Arena em forma de variáveis. Para realizar estas funções são utilizados os módulos de fluxograma *Read/Write* conjuntamente com o módulo de dados *File* do Arena. O módulo *File* associa um nome de registro a cada nome de faixa de células que contém dados a serem transferidos para o Arena. O módulo *Read/Write* transfere o conteúdo dos registros para nomes de variáveis que serão usadas na realização da simulação.

No bloco *Create* “leitura de dados” é criada uma entidade chamada “leitadora” no instante zero da simulação. Esta entidade ao passar cinco vezes pelo módulo *Read/Write* “Leitura de dados iniciais” lê o número de furos do plano, o comprimento dos furos, o número de perfuratrizes a serem usadas, um indicador de uso ou não de rendimento e outro de uso ou não de dados médios da frota para o cálculo da produtividade efetiva e os salva em uma variável “vetor” de 5 elementos chamada “dados”. Através do módulo *Assign* “definição de variáveis” aquelas informações são armazenadas nas variáveis “v\_nfuros”, “compfuro”, “v\_npuso”, “usarendimento” e “usafrota”. Estes são parâmetros gerais da simulação e do plano a ser executado. A Figura 4.7 ilustra o trecho do bloco de leitura do modelo em que é feita a leitura dos dados iniciais.

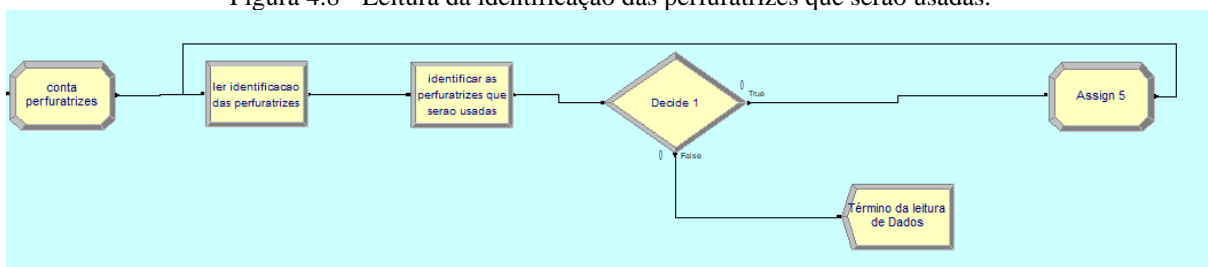
Figura 4.7 - Leitura dos dados iniciais.



Em seguida a entidade leitadora passa seis vezes por cada um dos módulos *Read/Write* “ler identificacao das perfuratrizes” e “identificar as perfuratrizes que serão usadas” onde serão lidos os números que identificam cada uma das perfuratrizes e a identificação das perfuratrizes que serão usadas no plano. Essas informações são armazenadas respectivamente nas variáveis “numeroperfuratriz” e “v\_numperfusada”. A dimensão destas variáveis é igual a 6 (seis) que corresponde ao tamanho da frota de perfuratrizes. Após a leitura dessas informações, a entidade leitadora sai do modelo através do módulo *Dispose* “Término da leitura de Dados”.

A Figura 4.8 ilustra o trecho do modelo no qual a entidade “leitadora” identifica as perfuratrizes e aloca as que serão usadas no plano de perfuração.

Figura 4.8 - Leitura da identificação das perfuratrizes que serão usadas.



Através dos módulos de dados *Variable* e *Expression* associados ao módulo *File* é possível transferir e armazenar diretamente dados da planilha em nomes de variáveis e de expressões a serem usadas na simulação, sem a necessidade de se utilizar uma entidade para tal. Esta transferência pode ser feita antes do início de cada simulação e/ou de cada réplica.

Um módulo de dados *Variable* foi usado para repassar as informações das taxas de penetração de cada perfuratriz que foram armazenadas em uma variável “produtividade” com dimensão 6, ou seja, um valor para cada perfuratriz.

O módulo de dados *Expression* foi usado para repassar do Excel para o Arena as expressões que identificam o tipo de distribuição de probabilidades associado às disponibilidades físicas, utilizações e rendimentos de cada perfuratriz e da frota. Estas informações foram armazenadas nas expressões do Arena denominadas “disponibilidade”, “utilizacao”, “rendimento”, “dispfrota”, “utilfrota” e “rendfrota”. As expressões “disponibilidade”, “utilização” e “rendimento” possuem uma dimensão igual a seis, pois se referem a cada perfuratriz.

A Figura 4.9 ilustra um modelo de planilha com dados que são repassados ao modelo de simulação.

Figura 4.9 - Modelo de planilha com dados que são repassados ao modelo.

Identificação	Nome	Perfuratriz alocada	Disponibilidade	Utilização	Rendimento	Taxa de penetração
1	PF0121	3	NORM(0.6,0.05,15)	NORM(0.8,0.05)	CONT (0.000, 0.200,...)	17
2	PF1108	5	NORM(0.6,0.05,15)	NORM(0.8,0.05)	CONT (0.000, 0.200,...)	17
3	PF1110	6	NORM(0.7,0.05)	NORM(0.4,0.05)	CONT (0.000, 0.200,...)	17
4	PF4501	0	NORM(0.8,0.05)	NORM(0.3,0.05)	CONT (0.000, 0.200,...)	17
5	PF7115	0	NORM(0.4,0.05)	NORM(0.6,0.05)	CONT (0.000, 0.200,...)	17
6	PF22057	0	NORM(0.3,0.05)	NORM(0.7,0.05)	CONT (0.000, 0.200,...)	17

Dados iniciais	
numero de furos	431
usafrota	1
compfuro	11
usarendimento	1
NPUSO	3

Essa planilha possibilita ao simulador, a oportunidade de experimentar vários cenários com apenas um modelo. Situação como o número de máquinas alocadas por frente, taxa de penetração da rocha a ser perfurada e o número de furos totais do polígono podem ser alterados na planilha pelo usuário. É importante ressaltar que a taxa de penetração deve ser medida por funcionários da mina de acordo com o maciço rochoso a ser perfurado.

As variáveis usafrota e usarendimento só podem assumir valores iguais a 0 (zero) ou 1 (um). Quando for usado no modelo as distribuições de probabilidades de DF, UT ou rendimento de cada perfuratriz, deve ser atribuído o valor 0 para a variável usafrota. Se as distribuições são

relativas aos valores médios da frota, usafrota receberá o valor igual a 1. O valor da variável usarendimento deve ser igual a 0 se nos cálculos das produtividades efetivas forem usados os valores da DF e UT, e igual a 1 se forem usados os valores do rendimento.

Na variável “v\_numperfusada”, o número de perfuratrizes alocadas (escolhidas) para perfurar o polígono, será preenchida a partir dos valores disponíveis na variável “v\_numeroperfuratriz” (nome identificador). A quantidade de perfuratrizes escolhidas é determinada pelo valor da variável “v\_npuso”. Se não forem escolhidas todas perfuratrizes disponíveis no sistema, as células não preenchidas com os nomes identificadores serão preenchidas por zero para não dar erro na execução do programa.

Após o bloco de leitura dos dados ter sido processado, o processamento dos blocos de execução dos furos e de controle do tempo de simulação já podem ser iniciados visto que as informações necessárias para caracterizar o sistema já estão armazenadas no Arena.

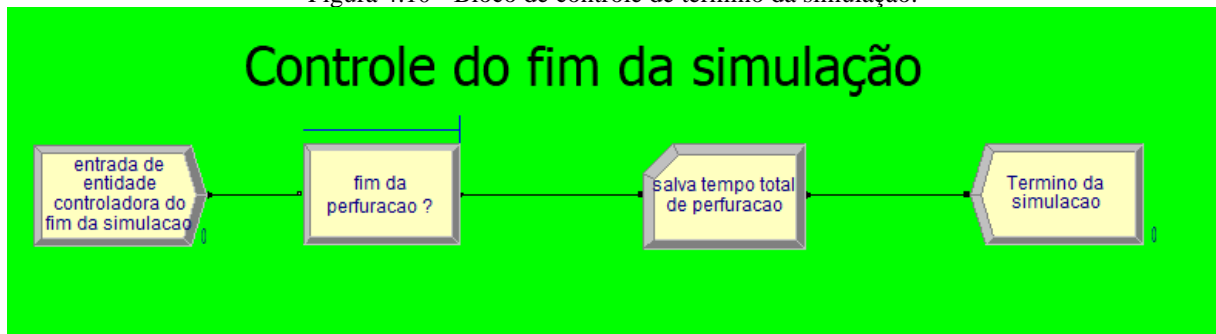
#### 4.3.2.2 Bloco para controlar o tempo final de simulação

Uma simulação ou réplica da simulação chega ao fim quando a variável tempo corrente de simulação (TNOW) atinge ou ultrapassa um valor previamente definido, ou quando uma condição de término normalmente representada por uma expressão é satisfeita, ou quando não se tem mais entidades no modelo e ao mesmo tempo que não existe previsão de chegada de nenhuma outra.

Será visto no bloco de execução dos furos que quando uma perfuratriz termina um furo e não existe mais nenhum outro para ser realizado, ela sai do modelo pelo módulo *Dispose* “Saida de perfuratriz”. O que se pretende é registrar o instante em que a última perfuratriz deixa o modelo, ou seja, quando todos os furos do plano tiverem sido realizados. Logo, é preciso que exista neste instante pelo menos uma entidade no modelo para que se possa registrar este momento antes que a simulação ou réplica termine. Esta é a função do bloco de controle de término da simulação.

A Figura 4.10 ilustra o bloco que exerce o controle de término da simulação.

Figura 4.10 - Bloco de controle de término da simulação.



Neste bloco a entidade denominada “controladora” entra logo após o início da simulação e depois de terminado o processamento do bloco de entrada de dados. Em seguida ela entra no módulo *Hold* “fim da perfuração ?” e permanece aí até que a condição “saida de perfuratriz.NumberOut == v\_npuso” seja satisfeita. Esta condição estabelece que o número de perfuratrizes que passaram pelo módulo *Dispose* “Saida de perfuratriz” seja igual ao número v\_npuso de entidades perfuratrizes que entraram no modelo e que corresponde ao número de perfuratrizes que serão usadas no plano de perfuração. Assim que a condição é satisfeita, a entidade passa pelo módulo *Record* “salva tempo total de perfuração”, armazena o tempo corrente da simulação, TNOW, na expressão “tempo total de perfuração”, e em seguida vai para o módulo *Dispose* “Termino da simulacao” saindo do modelo e terminando a simulação, pois não existirá mais nenhuma entidade no modelo.

#### 4.3.2.3 Bloco de execução dos furos

Este bloco é responsável pela amostragem aleatória dos valores de DF, UT e rendimento e cálculo da produtividade efetiva diária para cada perfuratriz, pelo tempo de execução dos furos de cada perfuratriz, e pela contagem do número de furos já realizados até a conclusão do plano de perfuração.

O modelo é iniciado com a entrada pelo módulo *Create* “Entrada das perfuratrizes” das entidades “perfuratrizes” que representam as perfuratrizes a serem usadas no plano de perfuração. O número de entidades perfuratrizes que entram no modelo é dado pela variável “v\_npuso”.

Cada um dos primeiros valores diferentes de 0 (zero) da variável “v\_numperfusada” lidos no bloco de leitura de dados indicam o número identificador de cada uma das perfuratrizes que foram alocadas para a execução do plano de perfuração. Esta variável é importante para indicar quais são as expressões corretas das distribuições de probabilidades a serem usadas na



amostragem dos valores das DF, UT, ou rendimento que serão utilizados no cálculo da produtividade efetiva de uma dada perfuratriz.

A partir deste ponto será descrito o percurso feito por cada entidade perfuratriz dentro do modelo desde a entrada até a saída do modelo de simulação.

Após a entrada, a entidade perfuratriz passa pelo módulo *Assign* “Inicialização das perfuratrizes” onde a variável “v\_contaperf” é incrementada (seu valor é aumentado de uma unidade a cada entidade perfuratriz que entra no modelo) e onde são criados os atributos “indperf” e “metrosfaltantes” para cada perfuratriz.

O valor da variável “v\_contaperf” corresponde à ordem em que as perfuratrizes alocadas no plano aparecem na planilha de entrada dos dados. A Tabela 4.4 apresenta parte da planilha de dados a ser lida pelo modelo.

Tabela 4.4 - Número identificador das perfuratrizes, nome das perfuratrizes e o número identificador das perfuratrizes alocadas.

<b>Identificação</b>	<b>Nome</b>	<b>Perfuratriz alocada</b>
1	PF0121	3
2	PF1108	5
3	PF1110	6
4	PF4501	0
5	PF7115	0
6	PF22057	0

Na coluna “Nome” tem-se o nome de cada perfuratriz do conjunto de perfuratrizes da empresa. Na coluna “Identificação” tem-se um número que identifica cada perfuratriz que corresponde à ordem em que elas aparecem na lista ou na coluna “Nome” e que está associado também aos demais dados da planilha referentes a cada perfuratriz. Na coluna “Perfuratriz alocada” se tem o número de identificação das perfuratrizes alocadas para a realização de um dado plano de perfuração. De acordo com a tabela foram alocadas três perfuratrizes, sendo que as três primeiras perfuratrizes alocadas são identificadas pelos números 3, 5 e 6, que correspondem respectivamente às perfuratrizes PF1110, PF7115 e PF22057.

O atributo “indperf” recebe o valor da variável “v\_numperfusada(v\_contaperf)”, ou seja, para a primeira, segunda e terceira entidades perfuratrizes que entram no sistema, os valores do atributo indperf serão 3, 5 e 6, respectivamente.

Dessa forma, quando uma entidade com o atributo “indperf” igual a 5 entrar em um módulo em que aparece o termo “disponibilidade(indperf)”, isto significará que aquele termo

faz referência ao tipo de distribuição de probabilidade seguida pela disponibilidade física da perfuratriz (5), ou seja, PF7115.

O atributo “metrosfaltantes” corresponde à quantidade em metros que falta no início de um dia para uma dada perfuratriz completar o furo que estava fazendo no instante final do dia anterior. Após a entidade perfuratriz entrar no modelo, o valor que este atributo recebe inicialmente corresponde ao comprimento total de um furo, ou seja, ao valor da variável “compfuro”, já que a perfuratriz ainda não iniciou a perfuração de nenhum furo.

Logo depois a entidade vai para outro módulo *Assign* “acumula furos 1” onde uma variável “v\_somafuros” é acrescida de uma unidade. Toda vez que uma perfuratriz tem condição de iniciar um furo, esta variável é incrementada, portanto, o seu valor corresponde à soma do número de furos já realizados com o número de furos que estão sendo perfurados. Essa variável será utilizada mais adiante para verificar se após uma perfuratriz terminar um furo, existem mais furos para serem feitos.

O próximo passo é calcular a produtividade efetiva da entidade perfuratriz para que seja calculado o tempo gasto na perfuração dos furos. Para o cálculo da produtividade efetiva é necessário o conhecimento de valores da DF e UT ou rendimento da entidade perfuratriz ou da frota, dependendo dos valores das variáveis “usafrota” e “usarendimento”. Estes valores são obtidos através de amostragem aleatória realizada sobre as suas respectivas distribuições de probabilidades e são usadas no modelo como atributos da entidade perfuratriz.

A Tabela 4.5 indica como serão definidos os valores dos atributos DF, UT e rendimento, bem como, a fórmula a ser usada para o cálculo da produtividade efetiva de uma perfuratriz com um dado atributo “indperf”, para as diferentes combinações entre as variáveis “usafrota” e “usarendimento”.

Tabela 4.5 - Definição dos valores dos atributos DF, UT, rendimento e produtividade efetiva.

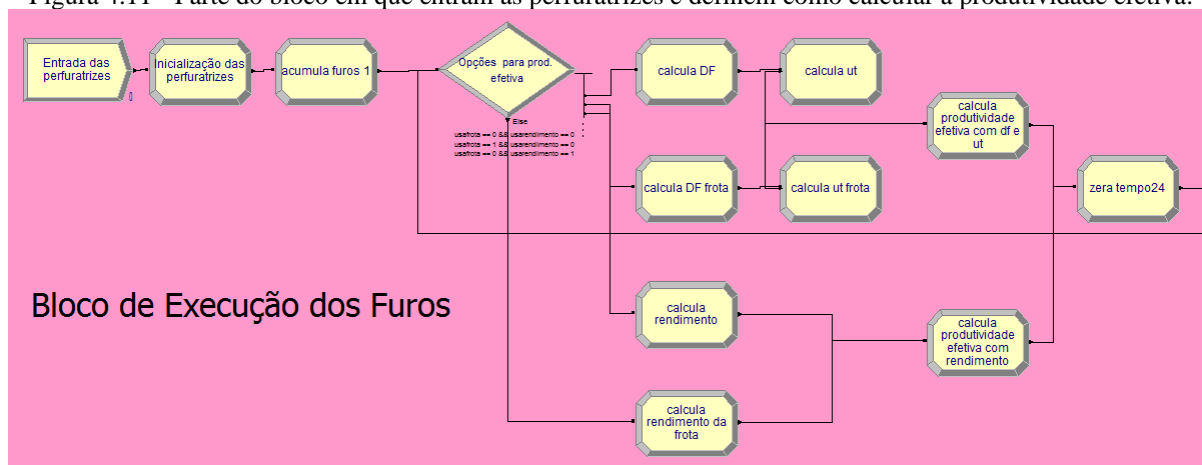
usar frota	usar rendimento	DF	UT	Rendimento	Produtividade efetiva
0	0	disponibilidade(indperf)	utilizacao(indperf)	-	DF × UT × produtividade(indperf)
1	0	dispfrota	utilfrota	-	DF × UT × produtividade(indperf)
0	1	-	-	rendimento(indperf)	Rendimento × produtividade(indperf)
1	1	-	-	rendfrota	Rendimento × produtividade(indperf)

Baseado nas Tabelas 4.4 e 4.5, se o conteúdo da expressão disponibilidade (5) obtido a partir da planilha de dados for “NORM(0.4,0.05)”, o valor do atributo “DF” para a perfuratriz PF7115, cujo atributo “indperf” é igual a 5, será obtido amostrando-se aleatoriamente em cima de uma distribuição normal de média igual a 0,4 e desvio padrão igual a 0,05, caso os valores de “usafrota” e “usarendimento” forem iguais a 0. Neste caso o atributo “produtividade efetiva”

será calculado multiplicando-se os valores da variável “produtividade(5)” pelos valores dos atributos “DF” e “UT”.

De acordo com a Figura 4.11, a entidade depois de passar pelo módulo “acumula furos 1”, ela entra no módulo *Decide* “Opções para prod. Efetiva” onde são verificados os valores das variáveis “usafrota” e “usa rendimento” que definirá para qual trecho a entidade deve seguir para o cálculo de sua produtividade efetiva que será armazenado no atributo “prodefetiva”.

Figura 4.11 - Parte do bloco em que entram as perfuratrizes e definem como calcular a produtividade efetiva.



Os módulos *Assign* “Calcula DF”, “Calcula UT”, “Calcula DF frota”, “Calcula UT frota”, “Calcula rendimento” e “Calcula rendimento da frota” são responsáveis pela definição dos valores dos atributos “DF”, “UT” e “Rendimento” a partir das amostragens realizadas em distribuições de probabilidades conforme indicado na Tabela 4.5.

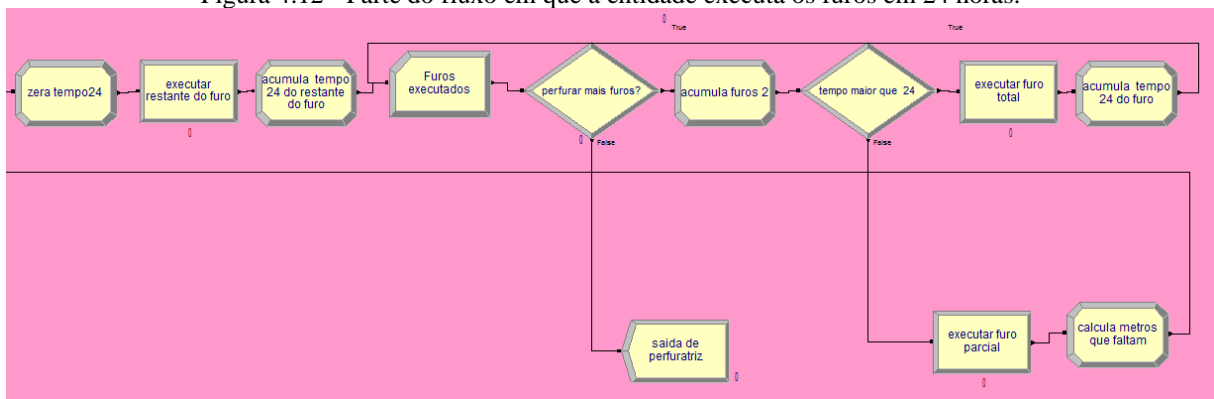
Nos módulos *Assign* “Calcula produtividade efetiva com DF e UT” e “Calcula produtividade efetiva com rendimento” é calculada a produtividade efetiva de acordo com as fórmulas da tabela 4.5 cujo valor é armazenado no atributo “prodefetiva”. Nestes módulos é calculado também o valor do tempo para executar um furo completo, dividindo-se a variável “compfuro” pelo atributo “prodefetiva”. Este valor é armazenado no atributo “tempofuro”.

Depois do cálculo da produtividade efetiva, a entidade passa pelo módulo *Assign* “zera tempo 24” onde é zerado o valor do atributo “tempoacum24”. Este atributo é responsável por acumular o tempo de perfuração a cada 24 horas. Toda vez que a perfuração de um furo é completada antes que um dia termine, este valor é incrementado com o valor do atributo “tempo furo” da perfuratriz que realizou o furo.

A Figura 4.12 ilustra o fluxo de uma entidade perfuratriz após os módulos onde a produtividade efetiva é calculada.

Em seguida a entidade entra no módulo *Process* “executar restante do furo” que tem a função de “atrasar” o progresso da entidade pelo tempo necessário para a perfuratriz terminar o furo iniciado no dia anterior. Quando a entidade sai deste módulo, o tempo de simulação, ou o valor da variável TNOW no instante que a entidade entrou nesse módulo é acrescido do tempo de processo, ou tempo que a entidade permaneceu no módulo. Nesse caso este tempo corresponde à divisão do atributo “metrosfaltantes” pelo atributo “prodefetiva”. Este tempo de processo é utilizado para aumentar o valor do atributo “tempoacum24” que é realizado no próximo módulo *Assign* “acumula tempo 24 do restante do furo”.

Figura 4.12 - Parte do fluxo em que a entidade executa os furos em 24 horas.



Em seguida a entidade entra no módulo *Record* “Furos executados” contabiliza-se o número de furos executados, através do contador “Furos executados”.

No módulo *Decide* seguinte “perfurar mais furos?” é verificado se existe mais furos para serem realizados, comparando se o valor da variável “v\_somafuros” é menor que a variável “v\_nfuros”. Se não for menor, então a entidade sai do modelo através do módulo *Dispose* “saida de perfuratriz” e a variável interna do Arena “saida de perfuratriz.NumberOut” associada a este módulo é aumentada de uma unidade.

Havendo então mais furos para serem executados, a entidade entra no módulo *Assign* “acumula furos 2” onde a variável “v\_somafuros” é acrescida de uma unidade novamente.

Em seguida a entidade entra no módulo *Decide* “tempo maior que 24” onde é verificado através da expressão “tempo furo + tempoacum24 <= 24” se a entidade consegue realizar o furo inteiro antes do término do dia.

Se for possível, a entidade segue para o módulo *Process* “executar furo total” que vai simular a execução do furo cuja duração será igual ao atributo “tempo furo”. A variável TNOW será acrescida deste valor. Depois a entidade passa pelo módulo *Assign* “acumula tempo 24 do

furo” onde o atributo “tempoacum24” é aumentado do valor do atributo “tempo furo” e retorna ao módulo *Record* “Furos executados” seguindo a partir daí o fluxo já descrito.

Se não for possível a conclusão do furo antes do término do dia, a entidade segue para o módulo *Process* “executar furo parcial” onde é simulado a perfuração de parte do furo até o final do dia cujo tempo de duração em horas é calculado pela expressão “24-tempoacum24”. Novamente o TNOW é acrescido deste tempo de processo. Depois a entidade passa pelo módulo *Assign* “calcula metros que faltam” onde o atributo “metrosfaltantes” recebe o valor em metros do comprimento do furo que falta para ser completado no dia seguinte. Este valor é dado pela expressão “compfuro - (24-tempoacum24) \* prodefetiva”. Em seguida a entidade retorna ao módulo *Decide* “Opções para prod. Efetiva” para o cálculo da produtividade efetiva de um novo dia. A partir daí o ciclo se repete até o término da simulação.

## **5 ANÁLISE DE RESULTADOS**

A análise de resultados apresentada aqui, pode ser dividida em duas partes. A primeira parte se refere às causas de perdas operacionais e possíveis correlações que possa haver entre as perdas operacionais, meses, perfuratrizes, DF e rendimentos. A segunda é destinada a resultados ligados às simulações realizadas.

### **5.1 Análise das causas de perdas**

Após o agrupamento de 47 causas sucederam apenas 12 motivos de perdas operacionais, o que se tornou mais tangível a análise das perdas com o propósito de tomar medidas exequíveis. Após os agrupamentos das causas, foram obtidas as seguintes causas: Falta de operador, outras perdas, locomoção longa, controle de ruídos, aguardando acerto de praça, refeição, troca de turno, material desgastado (troca de bit), aguardando detonação, material desgastado (troca de martelo), abastecendo e material desgastado (troca de haste). É necessário entender bem o significado das causas, como elas ocorrem e quais critérios foram adotados a fim de classificá-las. Dessa forma, foi constatado um número exagerado de causas de perdas o que dificulta nas tomadas de providências para resolução dos reais problemas operacionais da mina. As 12 causas foram descritas conforme a seguir:

Falta de operador – É assinalado pelo despacho que não há operador presente no local de trabalho quando a máquina está disponível fisicamente e há condições operacionais para que ela atue. O espaço de tempo entre o momento em que a manutenção finaliza o serviço sobre a máquina e o instante em que o operador entrou na máquina e iniciou a operação é contabilizado.

Outras perdas – Foi assinalada como outras perdas toda causa de perda insignificantes.

Locomoção longa – O tempo de locomoção da perfuratriz entre uma frente e outra com duração acima de 5 minutos.

Controle de ruídos – Pelo fato de a mina estar localizada perto de um condomínio residencial, geralmente no turno da noite, todos os equipamentos da mina são desligados devido ao excesso de ruídos.

Aguardando acerto de praça – Tempo em que a perfuratriz aguarda a finalização dos trabalhos de infraestrutura. Geralmente esses trabalhos são feitos por tratores de esteira para acerto do nível da praça e retirada de fragmentos de rochas contidos na área de perfuração que possam prejudicar ou mesmo impedir o emboque de um furo. Esses trabalhos, às vezes, podem ser feitos por tratores de pneus ou motoniveladoras.

Refeição – Horário em que os operadores param para se alimentarem. Esse horário acontece entre 10 e 14h e toda equipe é rodada sendo cada operador tem sua hora específica para fazer sua refeição. Assim, evita-se que a máquina fique menos tempo parada.

Troca de turno – horário em que a operação é interrompida para trocar de operador. É necessário que antes de retomar a operação os operadores conversem sobre as ocorrências mais importantes da máquina e da operação. Nesse momento é feito um *check-list* verificando os principais componentes da máquina e condições operacionais como limpeza mal feita.

Material desgastado (troca de bit) – Espaço de tempo para realizar a troca do bit após esse não servir mais para operação (fim da vida útil da broca).

Aguardando detonação – Tempo em que a mina para a fim de executar a detonação. Esse tempo dura aproximadamente 40 min.

Material desgastado (troca de martelo) – Espaço de tempo em que é feita a troca do martelo de perfuração quando esse atingir o fim da vida útil.

Abastecendo – Tempo de parada em que acontece o abastecimento de combustível das perfuratrizes.

Material desgastado (troca de haste) – Espaço de tempo em que é feita a troca da haste quando essa atingir o fim da vida útil.

### **5.1.1 Análise das causas de perdas por gráfico de Pareto**

Partindo da ideia de que poucas causas afetam fortemente nos resultados e muitas delas tem impactos insignificantes, há uma análise muito conhecida e utilizada nas empresas que trata esse tipo de situação. Na análise pelo “gráfico de Pareto” é comum considerar que 20% das causas de perdas sejam responsáveis por cerca de 80% das horas perdidas (Hall e Daneshmand, 2003). Para montar o gráfico de Pareto (Figura 5.1) foi plotado para cada tipo de causa, as horas perdidas pela frota de perfuratrizes devido àquela causa de perda operacional (PO), representadas no gráfico na forma de barras, e a participação acumulada em relação ao total de horas de perdas operacionais dadas em porcentagem, representada no gráfico na forma de uma linha. Os tipos de causas em sequência que aparecem no eixo das abscissas estão ordenados em ordem decrescente de acordo com as horas perdidas de cada causa. Para construir esse gráfico foi coletado, durante 3 meses, informações referentes a 2761 ocorrências de perdas operacionais totalizando 4708,73 horas de perdas operacionais de uma frota de 6 perfuratrizes. As informações para a construção do gráfico de Pareto (Figura 5.1) foram obtidas da Tabela 5.1.

O gráfico de Pareto permitiu identificar que dentre os doze tipos de perdas agrupadas apresentados na Tabela 5.1, as horas perdidas por “falta de operador” é a causa que mais afetou nas PO. Esse impacto foi responsável por 52,97% das horas totais de perdas, o equivalente a 2494,28 horas perdidas pela ausência de operador na máquina. Para essa causa também foram registradas o maior número de ocorrências (1068). A ocorrência dessa causa gera, em média, um impacto de 2,34 horas perdidas por ocorrência. Como a perfuração é a primeira operação do ciclo de produção, o seu atraso faz com que o carregamento de explosivos, detonação, carregamento e transporte também sejam atrasados pelas mesmas 2,34 horas a cada ocorrência dessa causa.

Tabela 5.1 - Tabela da causa de PO da frota de perfuratrizes com horas perdidas, o % de cada tipo PO e % acumulado de cada tipo PO.

	<b>CAUSAS DE PERDAS</b>	<b>PO (h)</b>	<b>% PO</b>	<b>% PO Acum.</b>
1	FALTA DE OPERADOR	2494,28	52,97	52,97
2	OUTRAS PERDAS	322,56	6,85	59,82
3	LOCOMOCAO LONGA	285,92	6,07	65,89
4	CONTROLE DE RUIDOS	276,26	5,87	71,76
5	AG ACERTO DE PRACA	252,95	5,37	77,13
6	REFEICAO	215,63	4,58	81,71
7	TROCA DE TURNO	208,37	4,43	86,14
8	MAT DESG TROCA BIT	207,46	4,41	90,54
9	AG DETONACAO	175,90	3,74	94,28
10	MAT DESG TROCA MARTELO	131,89	2,80	97,08
11	ABASTECENDO	78,80	1,67	98,75
12	MAT DESG TROCA HASTE	58,71	1,25	100
	<b>TOTAL</b>	<b>4708,73</b>	<b>100</b>	

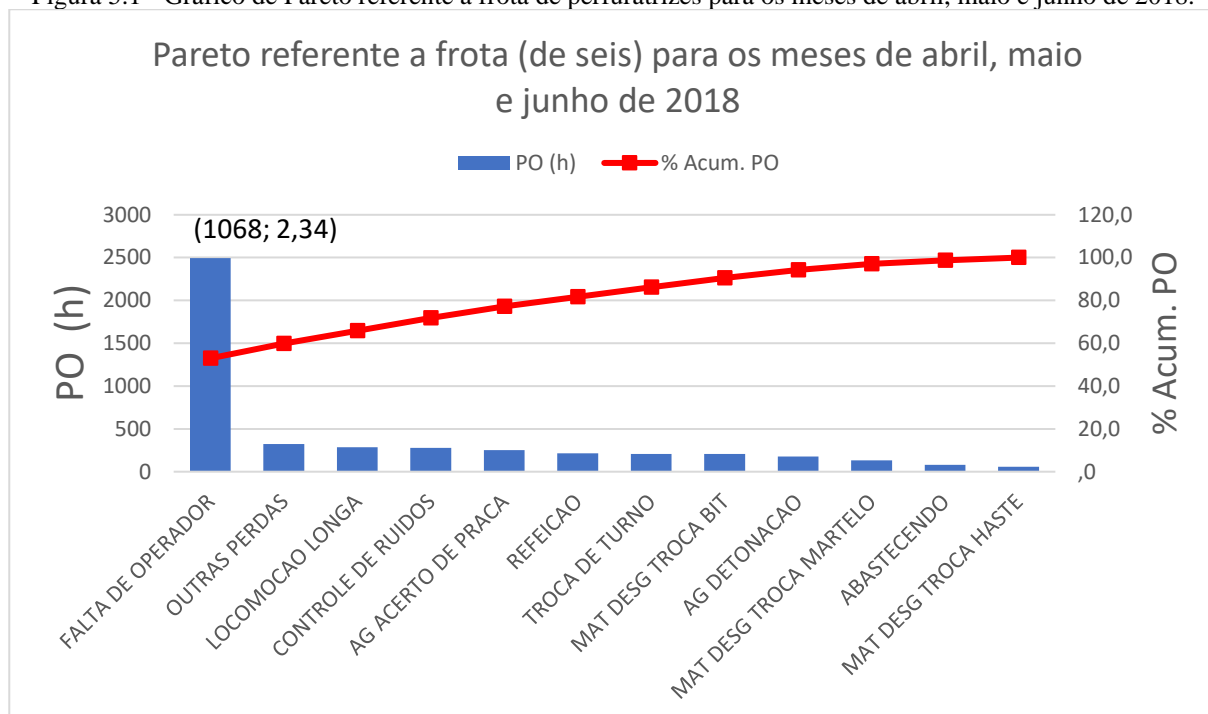
A falta de operador, considerando o agrupamento feito, constitui em uma causa dentre doze causas consideradas. Apenas uma causa reflete em 52,97% do impacto de horas perdidas. Portanto, foi confirmado, também nesse caso, que poucas causas afetam grandes perdas em um determinado processo.

Dentre os outros tipos de perdas, o impacto é insignificante comparado com a falta de operador. Esses demais fatores estão todos abaixo de 7%. Porém, algum desses fatores podem se mostrar relevantes ao analisar o número de ocorrências. Um grande número de ocorrências indica uma probabilidade alta do evento ocorrer e, portanto, grandes chances de se poder atuar sobre a causa, caso ela ofereça condições para isso.



Pode ocorrer, também, uma impossibilidade de atuação na causa mesmo que o número de ocorrências seja alto, já que determinadas perdas são mais rígidas como o tempo de “refeição” que são regidas por lei, por exemplo.

Figura 5.1 - Gráfico de Pareto referente a frota de perfuratrizes para os meses de abril, maio e junho de 2018.



Ao se observar através da Tabela 5.1 que a segunda causa que mais contribui é “outras perdas” e, dentro dela existem uma série de pequenas causas (34), isso pode demonstrar problemas de gerenciamento no apontamento da árvore de causas. Erros de apontamento também ocorreram quando se apontou mais de um tipo de causa para uma mesma causa. Por exemplo, para a causa “falta de operador” foi necessário agrupá-la com outras duas causas (“liberado pela manut” e “disponível para operar”) já que elas representam um mesmo motivo. Embora “outras perdas” seja o tipo de causa que “mais contribuiu” para a o número de horas totais de PO, a contribuição individual dos diferentes tipos de causas que compõe este grupo, é insignificante em relação aos demais tipos de causa.

É importante se atentar também para causas que apresentem um número baixo de ocorrências e um alto impacto no número de horas de PO por ocorrências. Nesse sentido, embora a troca do martelo por desgaste apareça em 10º lugar de horas de perdas operacionais absolutas, essa causa apresenta o segundo menor número de ocorrências (26) e o maior impacto de horas perdidas por ocorrência (5,07). Essa causa chama a atenção, pois caso o número de ocorrências não seja alto, o impacto nas horas pode ser alto. Deve-se tomar cuidado aos

parâmetros operacionais utilizados como percussão, rotação e avanço que devem ser adotados na máquina durante a operação. Essa análise pode ser estendida para troca de haste e bit.

A última coluna da Tabela 5.2 corresponde ao tempo gasto em minutos por cada ocorrência de um determinada causa por perfuratriz. Por exemplo, a cada detonação que ocorre cada perfuratriz aguarda, aproximadamente 27 minutos.

Tabela 5.2 - Fonte de dados para análise de Pareto resumida da frota de perfuratrizes.

	<b>TIPO DE PERDA</b>	<b>PO (h)</b>	<b>Nº de ocorrências</b>	<b>Impacto de PO (h) /ocorrência</b>	<b>Impacto de min perdidos/ocorrência (por perfuratriz)</b>
1	FALTA DE OPERADOR	2494	1068	2.34	23.35
2	OUTRAS PERDAS	323	400	0.81	8.06
3	LOCOMOCAO LONGA	286	226	1.27	12.65
4	CONTROLE DE RUIDOS	276	56	4.93	49.33
5	AG ACERTO DE PRAÇA	253	88	2.87	28.74
6	REFEICAO	216	111	1.94	19.43
7	TROCA DE TURNO	208	293	0.71	7.11
8	MAT DESG TROCA BIT	207	182	1.14	11.40
9	AG DETONACAO	176	65	2.71	27.06
10	MAT DESG TROCA MARTELO	132	26	5.07	50.73
11	ABASTECENDO	79	228	0.35	3.46
12	MAT DESG TROCA HASTE	59	18	3.26	32.62
	<b>TOTAL</b>	<b>4709</b>	<b>2761</b>	<b>1.71</b>	<b>17.05</b>

### 5.1.2 Interferência de uma causa de perda operacional na entrega de massas

Normalmente a equipe de perfuração elabora um plano de perfuração visando a obediência de uma meta de produção enviada pelo planejamento. Quando essa meta não é atingida nem toda massa de minério prevista para dar prosseguimento ao processo é transformada em produto no período desejado. Isso provoca demora na entrega desse produto até o cliente. Quanto maior é o adiamento, maior a massa que é deixada ser entregue. Além dos impactos produtivos serem maiores, valiosas oportunidades de negócios podem ser descartadas e contratos podem ser quebrados.

É interessante associar as causas de perdas que impactam em uma quantidade de massa que deixou de ser entregue. A fim de ilustrar a importância prática da análise de perdas operacionais e demonstrar a contribuição em massa que deixou de ser entregue (perfurada) ao carregamento vamos supor que tenha ocorrido um atraso na execução de um plano de perfuração. Considerando as mesmas contribuições das perdas operacionais utilizadas na Tabela 5.1, uma dada taxa de penetração e uma DF, é possível calcular a contribuição da massa (t) perdida devida a cada tipo de causa de PO em relação à perda da massa total devido ao atraso na execução do plano de perfuração. O tempo de carregamento de explosivos e detonação foram desconsiderados.

O planejamento prevê que, a partir do dia (4/5/2018 às 16:00), data de liberação dos trabalhos infraestrutura na área, uma massa de 150.000 t deve ser perfurada (4.741 m) para entregar ao carregamento e ser entregue no dia (14/5/2018 às 16:23). Esse prazo equivale a 10,02 dias (240,38 h), período que a perfuração deve efetuar os 4741 m (431 furos). Foi considerado o comprimento do furo de 11 m e a massa produzido por furo de 348 t.

Foi feito um plano para que esse prazo fosse cumprido, porém, verificou-se, durante a execução do plano, que nessa data pretendida, o que tinha sido perfurado foram 2.950,46 m, 268 furos o que representa 93.341 t. Conforme a Tabela 5.3, esses números correspondem a 62,23% da realização do plano na data pretendida.

Tabela 5.3 - Dados referentes a realização do plano de perfuração no prazo pretendido.

<b>Executado (em 10,02 dias)</b>		<b>un.</b>
Data de início	4/5/18 16:00	
Duração (dias)	10.02	dias
Data do prazo	14/5/18 16:23	
Metros realizados (m)	2950.46	m
Nº furos realizados	268.22	
Massa realizada	93341.70	t
% concluída do plano	62.23	%

Portanto, na data do prazo, ficou faltando, 1790,92 m (162 furos) a serem perfurados e uma massa perdida (massa que deixou de ser entregue na data prevista) de 56.658,3 t. Conforme a Tabela 5.4, 37,77% do plano deixou de ser realizada na data pretendida.

Continuou-se perfurando e o plano foi concluído em 16,10 dias conforme a Tabela 5.5.

Tabela 5.4 - Dados referentes a parte não concluída do plano de perfuração na data prevista.

<b>Diferença</b>		<b>un.</b>
Tempo faltante (dias)	6.08	dias
Tempo faltante (h)	145.91	horas
Metros perdidos (m)	1790.92	m
Furos perdidos	162.81	
Massa perdida (t)	56658.30	t
% restante do plano	37.77	%

Tabela 5.5 - Dados referentes ao plano executado concluído em atraso.

<b>Executado (até o fim)</b>		<b>un.</b>
Data de início	4/5/18 16:00	
Duração (dias)	16.10	dias
Duração (horas)	386.30	h
Data de término	20/5/18 18:17	
Metros realizados	4741.4	m
Nº de furos realizados	431	furos
Massa realizada	150000	t
% concluída do plano	100	%

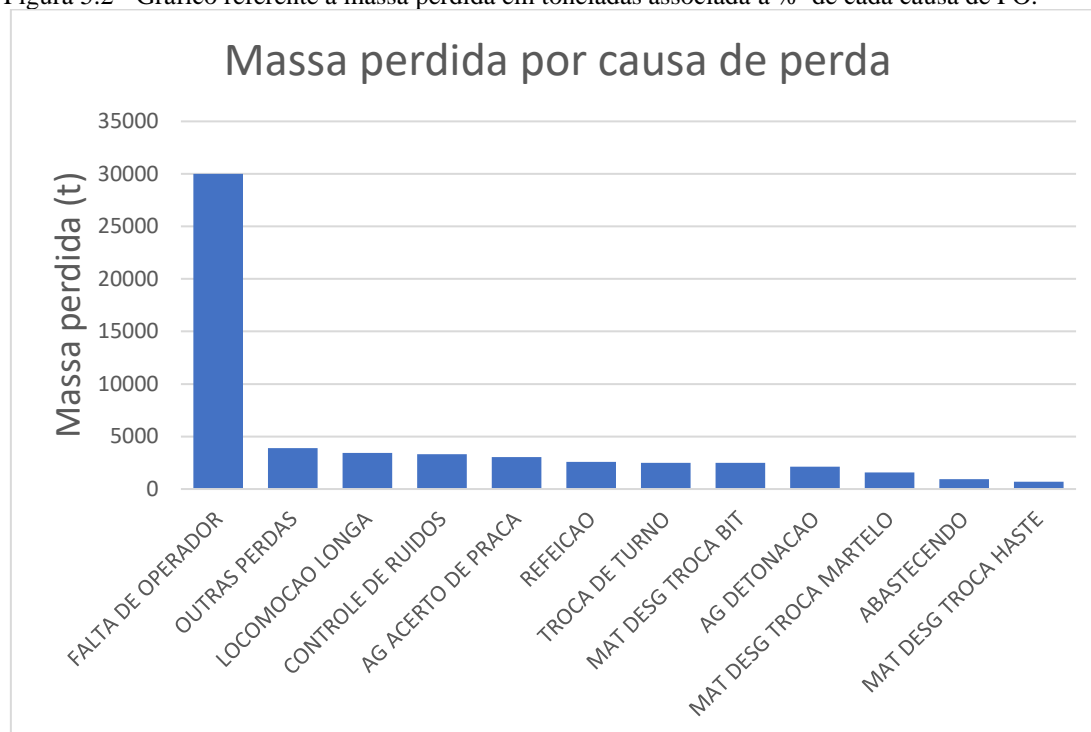
Averiguou-se que o total de horas de perdas operacionais, ao longo da execução dos 16,10 dias, implicou em uma perda de massa de 56.658,30 t conforme a Tabela 5.4 e, cada causa contribuiu com uma percentagem dessa massa perdida que se encontra na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Dados referentes a % de PO de cada causa e a respectiva massa perdida em toneladas.

	<b>CAUSAS DE PERDAS</b>	<b>% PO</b>	<b>Massa perdida (t)</b>
1	FALTA DE OPERADOR	52.97	30013
2	OUTRAS PERDAS	6.85	3881
3	LOCOMOCAO LONGA	6.07	3440
4	CONTROLE DE RUIDOS	5.87	3324
5	AG ACERTO DE PRACA	5.37	3044
6	REFEICAO	4.58	2595
7	TROCA DE TURNO	4.43	2507
8	MAT DESG TROCA BIT	4.41	2496
9	AG DETONACAO	3.74	2117
10	MAT DESG TROCA MARTELO	2.80	1587
11	ABASTECENDO	1.67	948
12	MAT DESG TROCA HASTE	1.25	706
	<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>56658</b>

Aplicando esses percentuais a massa total perdida chegou-se à contribuição de que cada causa de perda influenciou na perda de massa total do plano. A Figura 5.2 ilustra a massa perdida (t) por causa de PO.

Figura 5.2 - Gráfico referente a massa perdida em toneladas associada a % de cada causa de PO.



A perda por falta de operador foi a causa de perda que mais afetou a entrega de massa de minério (30.013 t) em um período de 16,10 dias. A perda de massa devido a “falta de operador” é muito maior do que o restante das causas de perdas. A soma da massa perdida devido o restante das causas no período executado é igual a 26.646 t (47,02% de toda massa perdida), o que ainda não chega à massa perdida por falta de operador. O impacto dessas massas que deixaram de ser entregues refletem no fluxo de caixa da empresa, visto que cada tonelada produzida tem um valor de venda.

### 5.1.3 Influência da DF no número de horas de PO devido a uma dada causa

Antes de se verificar se o número de horas de perdas operacionais (PO) associada a uma determinada causa apresenta alguma relação com os meses ou com o tipo de perfuratriz,

procurou-se estudar se as PO devidas a diferentes tipos de causas estavam correlacionadas, com o número total de horas de perdas por manutenção corretiva e preventiva, ou seja, se as PO referentes a um tipo de causa estavam relacionadas com as DF das perfuratrizes obtidas nos meses de abril, maio e junho.

A princípio é de se esperar que para alguns tipos de causa exista uma relação entre as PO e as disponibilidades físicas, pois quanto maior a DF maior será o número de horas disponíveis e, provavelmente maiores devem ser as horas de perdas operacionais.

Para cada tipo de perda, foram calculados os coeficientes de correlação linear (coeficiente de Pearson) entre os valores das PO e as DF de todas as perfuratrizes obtidos nos meses de abril, maio e junho, totalizando 18 valores, 3 valores para cada uma das 6 perfuratrizes.

Embora, a PF0121 seja operada quase sempre só no turno administrativo, sua DF tende a ser alta, pois é considerada que ela está fisicamente disponível nos outros dois turnos em que normalmente ela não trabalha, a não ser que ela esteja em manutenção preventiva ou corretiva. Isto vai implicar em menos horas eficientes em relação às outras perfuratrizes e, provavelmente, em menos horas de PO associadas a cada tipo de causa.

Com o intuito de verificar a “contaminação” da PF0121 na análise da relação entre as PO por tipo de causa e as DF, o coeficiente de correlação de Pearson foi calculado também excluindo-se os dados da PF0121. Neste caso foram utilizados 15 valores ao invés de 18.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados dos coeficientes de correlação entre as horas de PO para os diferentes tipos de causas e as DF considerando as seis perfuratrizes e excluindo a PF0121.

Tabela 5.7 - Comparação dos coeficientes de correlação entre as PO (h) e as DF(%).

CAUSAS	Coeficiente de Pearson	
	Sem a PF0121	Com a PF0121
FALTA DE OPERADOR	-10.62%	52.50%
LOCOMOCAO LONGA	-0.64%	7.80%
CONTROLE DE RUIDOS	43.62%	24.41%
AG ACERTO DE PRACA	9.89%	-10.46%
REFEICAO	28.03%	8.17%
TROCA DE TURNO	54.62%	7.80%
MAT DESG TROCA BIT	32.75%	2.26%
AG DETONACAO	43.71%	36.04%
MAT DESG TROCA MARTELO	-14.18%	-33.39%
ABASTECENDO	51.89%	-2.05%
MAT DESG TROCA HASTE	-6.56%	-11.71%
OUTRAS PERDAS	15.42%	5.03%

Nos cálculos envolvendo a PF0121, observa-se que o maior valor do coeficiente de correlação ocorre para falta de operador, 52.50%, bem diferente de -10.62%, valor correspondente quando se retira a PF0121 do cálculo. Isto é devido ao fato de que o tempo correspondente aos turnos em que ela não é operada é considerado uma PO devido à falta de operador. A princípio, o número de PO devido à falta de operador deveria apresentar uma correlação baixa com a DF.

Nota-se também nos cálculos que incluem a PF0121, valores bem mais baixos de coeficientes de correlação associados às causas refeição, abastecendo, troca de turno, controle de ruídos e aguarda detonação quando comparados com os valores obtidos somente com as outras cinco perfuratrizes. Isto se deve ao fato de que a PF0121 sofre menos os efeitos dessas causas pois trabalha normalmente somente em um turno. A análise, portanto, das relações entre as PO devido às diferentes causas e as DF devem ser realizadas não se levando em conta os dados da PF0121.

Observando-se os valores dos coeficientes sem a PF0121, nota-se valores positivos relativamente maiores para as causas ABASTECENDO, TROCA DE TURNO, e um pouco menor para Refeição. Isto era esperado, pois para uma maior DF, maior tempo de operação e maiores horas de PO devido a estas causas devem ocorrer. Esses tipos de causas devem ocorrer praticamente em todos os dias para todas as perfuratrizes que estiverem em operação.

Nota-se também um valor positivo moderado para a causa devido a troca de bits por desgaste. Quanto maior for o tempo de operação das perfuratrizes, maiores serão as chances de ocorrerem trocas de bits por desgaste.

Outros valores relativamente elevados são observados para CONTROLE DE RUIDOS e Aguarda DETONACAO. Quando estes tipos de perdas operacionais ocorrem, elas afetam ao mesmo tempo todas as perfuratrizes que estiverem em operação.

Valores baixos para LOCOMOCAO LONGA, troca de haste e troca de martelo ocorrem com menor frequência (conferir as frequências de ocorrência na Tabela 5.2), não afetam todas as perfuratrizes ao mesmo tempo e, portanto, podem ser explicadas talvez pelo fato de que os valores de DF utilizados nos cálculos se referem ao período de um mês e por perfuratriz.

#### ***5.1.4 Análise da influência de uma perfuratriz ou de um mês no número de horas de PO devido a uma dada causa***

Se uma dada perfuratriz influencia um determinado tipo de causa, esta influência ou tipo de comportamento deveria ser observado nos três meses de abril, maio e junho. Para se fazer esta análise procurou-se verificar para cada tipo de causa, para quais perfuratrizes o número de horas de PO foi maior ou menor em cada um dos meses. Por outro lado, se um dado mês influencia um determinado tipo de causa, esta influência ou tipo de comportamento deveria ser observado em todas as seis perfuratrizes. Para se fazer esta análise procurou-se verificar para cada tipo de causa, em quais meses o número de horas de PO foi maior ou menor para cada perfuratriz.

Foi montada então uma Tabela 5.8 onde se colocou para cada tipo de causa de PO, o número de horas de PO para cada perfuratriz e para cada mês. Para a análise da influência da perfuratriz, marcou-se então para cada mês nas cores de amarelo e azul, as células onde ocorreram os menores e maiores valores de PO, respectivamente.



Tabela 5.8 - Influência da perfuratriz sobre as PO.

FALTA DE OPERADOR			
PF	abril	maio	junho
PF0121	480,87	373,73	438,07
PF1108	40,45	65,06	130,15
PF1110	77,07	72,46	59,34
PF4501	62,01	69,09	49,72
PF7115	176,28	144,45	96,56
PF22057	58,65	53,30	47,01

OUTRAS PERDAS			
PF	abril	maio	junho
PF0121	4,66	40,48	0,00
PF1108	11,20	17,64	20,73
PF1110	35,59	7,26	20,03
PF4501	13,06	25,55	30,40
PF7115	13,36	12,56	15,52
PF22057	3,56	37,18	13,79

LOCOMOÇÃO LONGA			
PF	abril	maio	junho
PF0121	13,36	28,69	11,42
PF1108	11,90	7,06	15,73
PF1110	23,55	16,98	19,56
PF4501	13,07	16,37	27,80
PF7115	16,08	9,65	29,09
PF22057	6,30	9,41	9,91

CONTROLE DE RUÍDOS			
PF	abril	maio	junho
PF0121	13,13	19,47	0,00
PF1108	33,24	19,00	7,34
PF1110	17,33	23,37	9,21
PF4501	26,81	5,99	1,30
PF7115	24,75	1,11	22,67
PF22057	21,15	26,43	3,97

AG ACERTO DE PRACA			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	6,44	0,14
PF1108	6,13	6,27	11,42
PF1110	8,39	14,89	30,87
PF4501	12,95	2,57	17,48
PF7115	30,29	4,05	72,56
PF22057	5,85	7,93	14,72

REFEICAO			
PF	abril	maio	junho
PF0121	8,49	3,48	0,81
PF1108	11,09	18,35	7,56
PF1110	4,79	4,51	40,57
PF4501	12,41	5,74	5,62
PF7115	9,36	2,76	1,36
PF22057	15,38	13,63	6,73

TROCA DE TURNO			
PF	abril	maio	junho
PF0121	2,97	8,06	2,51
PF1108	21,05	18,61	10,70
PF1110	14,27	13,46	8,59
PF4501	19,38	9,13	7,62
PF7115	20,30	7,75	3,86
PF22057	12,43	20,18	7,50

MAT DESG TROCA BIT			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	14,06	0,00
PF1108	21,52	13,50	24,33
PF1110	7,46	24,98	13,00
PF4501	7,18	17,20	6,80
PF7115	5,73	0,47	9,95
PF22057	6,14	10,02	25,11

AG DETONACAO			
PF	abril	maio	junho
PF0121	16,43	7,10	7,95
PF1108	27,33	9,75	9,78
PF1110	15,09	5,87	4,23
PF4501	11,93	4,58	10,62
PF7115	19,54	0,00	1,87
PF22057	13,37	3,22	7,23

MAT DESG TROCA MARTELO			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	0,00	0,00
PF1108	15,58	4,67	5,41
PF1110	1,63	36,82	3,43
PF4501	0,00	0,79	3,87
PF7115	20,13	30,84	4,22
PF22057	0,00	0,00	4,50

ABASTECENDO			
PF	abril	maio	junho
PF0121	1,22	2,88	0,52
PF1108	5,26	8,42	6,27
PF1110	5,45	4,57	6,26
PF4501	3,30	5,05	4,25
PF7115	4,43	0,88	2,70
PF22057	5,46	6,34	5,54

MAT DESG TROCA HASTE			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	1,18	12,27
PF1108	3,06	1,69	0,58
PF1110	3,52	7,63	0,30
PF4501	0,00	0,00	20,60
PF7115	0,00	0,00	6,21
PF22057	0,93	0,00	0,74

Uma outra Tabela 5.9, com os mesmos dados da Tabela 5.8, foi utilizada para analisar a influência dos meses, onde se marcou para cada perfuratriz nas cores de amarelo e azul, as células onde ocorreram os menores e maiores valores de PO, respectivamente.

Tabela 5.9 - Influência do mês sobre as PO.

FALTA DE OPERADOR			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	480,87	373,73	438,07
PF1108	40,45	65,06	130,15
PF1110	77,07	72,46	59,34
PF4501	62,01	69,09	49,72
PF7115	176,28	144,45	96,56
PF22057	58,65	53,30	47,01

OUTRAS PERDAS			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	4,66	40,48	0,00
PF1108	11,20	17,64	20,73
PF1110	35,59	7,26	20,03
PF4501	13,06	25,55	30,40
PF7115	13,36	12,56	15,52
PF22057	3,56	37,18	13,79

LOCOMOÇÃO LONGA			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	13,36	28,69	11,42
PF1108	11,90	7,06	15,73
PF1110	23,55	16,98	19,56
PF4501	13,07	16,37	27,80
PF7115	16,08	9,65	29,09
PF22057	6,30	9,41	9,91

CONTROLE DE RUIDOS			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	13,13	19,47	0,00
PF1108	33,24	19,00	7,34
PF1110	17,33	23,37	9,21
PF4501	26,81	5,99	1,30
PF7115	24,75	1,11	22,67
PF22057	21,15	26,43	3,97

AG ACERTO DE PRACA			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	0,00	6,44	0,14
PF1108	6,13	6,27	11,42
PF1110	8,39	14,89	30,87
PF4501	12,95	2,57	17,48
PF7115	30,29	4,05	72,56
PF22057	5,85	7,93	14,72

REFEICAO			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	8,49	3,48	0,81
PF1108	11,09	18,35	7,56
PF1110	4,79	4,51	40,57
PF4501	12,41	5,74	5,62
PF7115	9,36	2,76	1,36
PF22057	15,38	13,63	6,73

TROCA DE TURNO			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	2,97	8,06	2,51
PF1108	21,05	18,61	10,70
PF1110	14,27	13,46	8,59
PF4501	19,38	9,13	7,62
PF7115	20,30	7,75	3,86
PF22057	12,43	20,18	7,50

MAT DESG TROCA BIT			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	0,00	14,06	0,00
PF1108	21,52	13,50	24,33
PF1110	7,46	24,98	13,00
PF4501	7,18	17,20	6,80
PF7115	5,73	0,47	9,95
PF22057	6,14	10,02	25,11

AG DETONACAO			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	16,43	7,10	7,95
PF1108	27,33	9,75	9,78
PF1110	15,09	5,87	4,23
PF4501	11,93	4,58	10,62
PF7115	19,54	0,00	1,87
PF22057	13,37	3,22	7,23

MAT DESG TROCA MARTELO			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	0,00	0,00	0,00
PF1108	15,58	4,67	5,41
PF1110	1,63	36,82	3,43
PF4501	0,00	0,79	3,87
PF7115	20,13	30,84	4,22
PF22057	0,00	0,00	4,50

ABASTECENDO			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	1,22	2,88	0,52
PF1108	5,26	8,42	6,27
PF1110	5,45	4,57	6,26
PF4501	3,30	5,05	4,25
PF7115	4,43	0,88	2,70
PF22057	5,46	6,34	5,54

MAT DESG TROCA HASTE			
PERFURAT	abril	maio	junho
PF0121	0,00	1,18	12,27
PF1108	3,06	1,69	0,58
PF1110	3,52	7,63	0,30
PF4501	0,00	0,00	20,60
PF7115	0,00	0,00	6,21
PF22057	0,93	0,00	0,74

Observando-se a Tabela 5.8, verificou-se que apenas a perfuratriz PF0121 apresentou em todos os meses os maiores valores de PO para a causa falta de Operador. Essa mesma perfuratriz também apresentou os menores valores de PO por troca de martelo, apresentando o valor zero em todos os meses, ou seja, não apresentou nenhuma troca de martelo.

A fim de verificar as PO por desgaste de ferramentas de forma global, ou seja, somando as PO por desgaste de bit, haste e martelo em uma causa (Desgaste de ferramentas), construiu-se a Tabela 5.10 da mesma forma que as Tabela 5.8 e 5.9. Observou-se, assim, que, a PF0121 nesse agrupamento de perda apresentou os menores valores em todos os meses. Os menores

valores apresentados pela PF0121 devido a troca de martelo e, também, por troca de ferramentas de perfuração de uma forma geral podem ser explicados por consequência do seu baixo “uso”. O fato de a PF0121, apresentar maiores valores de horas de PO devido à falta de operador já foi explicado pelo fato dela trabalhar em um turno.

Tabela 5.10 - PO para troca de bit, troca de martelo, troca de haste e desgaste de ferramentas.

MAT DESG TROCA BIT			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	14,06	0,00
PF1108	21,52	13,50	24,33
PF1110	7,46	24,98	13,00
PF4501	7,18	17,20	6,80
PF7115	5,73	0,47	9,95
PF22057	6,14	10,02	25,11

MAT DESG TROCA MARTELO			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	0,00	0,00
PF1108	15,58	4,67	5,41
PF1110	1,63	36,82	3,43
PF4501	0,00	0,79	3,87
PF7115	20,13	30,84	4,22
PF22057	0,00	0,00	4,50

MAT DESG TROCA HASTE			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	1,18	12,27
PF1108	3,06	1,69	0,58
PF1110	3,52	7,63	0,30
PF4501	0,00	0,00	20,60
PF7115	0,00	0,00	6,21
PF22057	0,93	0,00	0,74

DESGASTE DE FERRAMENTAS			
PF	abril	maio	junho
PF0121	0,00	15,25	12,27
PF1108	40,16	19,86	30,32
PF1110	12,61	69,43	16,73
PF4501	7,18	17,99	31,27
PF7115	25,86	31,32	20,39
PF22057	7,08	10,02	30,34

Para todos demais tipos de causas, os maiores e os menores valores de PO ocorreram para diferentes perfuratrizes, levando a supor que a perfuratrizes não chegam a influenciar um determinado tipo de causa de PO. Este resultado é de se esperar pois todas as perfuratrizes são do mesmo tipo, a não ser a PF0121, e supondo-se que trabalham nas mesmas áreas, perfuram com o mesmo diâmetro de furo, trabalham a mesma quantidade de turnos e devido a um eficiente programa de manutenção, devem possuir as mesmas condições operacionais. Apesar da PF0121 trabalhar algumas vezes nas mesmas áreas e ter um programa eficiente de manutenção ela perfura com diâmetros menores e trabalha uma quantidade de turnos menores que as outras cinco (perfura somente em áreas de *pushbacks* e limites de cava final).

A natureza de certos tipos de causas de PO não tem relação nenhuma com a operação efetiva de perfuração executada por qualquer perfuratriz, como por exemplo, TROCA DE TURNO, REFEIÇÃO, CONTROLE DE RUÍDOS e AGUARDA DETONAÇÃO.

A conclusão de que uma perfuratriz não influencia o número de horas de PO devido a um tipo de causa de PO seria a mesma se a análise fosse efetuada sem considerar a PF0121.

Observando-se a Tabela 5.9, verifica-se que todas as perfuratrizes apresentaram o menor número de horas de PO devido a troca de turno no mês de junho e maior número de horas de PO em abril associado à causa “Aguarda Detonação”. Não se pode considerar que este tipo de comportamento vá ocorrer nesses mesmos meses em diferentes anos. Provavelmente, no mês de abril, o número de detonações foi maior. Essa causa afeta simultaneamente todas as perfuratrizes em operação no momento da detonação, o que pode explicar este resultado.

### **5.1.5 Influência dos meses e das perfuratrizes nos rendimentos**

A fim de se verificar a influência dos meses nos rendimentos, multiplicou-se as DF e UT já calculadas de todos os meses de cada perfuratriz e construiu-se a Tabela 5.11.

A partir dos dados da Tabela 5.11 observou-se que os meses não influenciaram nos rendimentos. O mês de abril se sobressaiu apenas para a PF1108 e PF7115 sendo superado por outros meses nas outras quatro perfuratrizes. O mês de maio se sobressaiu apenas na PF22057 e na PF0121. E o mês de junho se sobressaiu apenas na PF4501 e PF1110, ou seja, nenhum mês se sobressaiu em todas as perfuratrizes.

Tabela 5.11 - Rendimentos de cada perfuratriz referentes aos meses de abril, maio e junho e dos meses compilados.

PF	DF x UT			meses comp.
	abr	mai	jun	
PF22057	0,31	0,48	0,47	0,42
PF1108	0,45	0,35	0,31	0,37
PF4501	0,33	0,23	0,37	0,31
PF1110	0,28	0,27	0,35	0,30
PF7115	0,31	0,05	0,16	0,18
PF0121	0,08	0,12	0,09	0,10

Já era de se esperar isso, pois o rendimento está diretamente ligado a utilização (UT) que, por sua vez, está associada às PO e à contribuição de cada tipo de causa (que já foi analisada). Como foi verificado que os meses não influenciaram no cálculo das PO das perfuratrizes para os diferentes tipos de causa, então eles não influenciaram também os rendimentos médios das perfuratrizes.

Para analisar a influência das perfuratrizes nos rendimentos foram construídas as Tabela 5.12, 5.13 e 5.14 onde estão representados os rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz para os meses abril, maio e junho, respectivamente.

Tabela 5.12 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente ao mês de abril.

<b>abril</b>				
<b>PF</b>	<b>PO (h)</b>	<b>DF x UT</b>	<b>DF</b>	<b>UT</b>
PF0121	541	0,08	0,83	0,10
PF7115	340	0,31	0,78	0,40
PF1110	214	0,28	0,57	0,48
PF1108	208	0,45	0,74	0,61
PF4501	182	0,33	0,58	0,57
PF22057	149	0,31	0,52	0,60

Tabela 5.13 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente ao mês de maio.

<b>maio</b>				
<b>PF</b>	<b>PO (h)</b>	<b>DF x UT</b>	<b>DF</b>	<b>UT</b>
PF0121	506	0,12	0,80	0,15
PF7115	215	0,05	0,34	0,16
PF1110	233	0,27	0,59	0,47
PF1108	190	0,35	0,61	0,58
PF4501	162	0,23	0,45	0,51
PF22057	188	0,48	0,73	0,66

Tabela 5.14 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente ao mês de junho.

<b>junho</b>				
<b>PF</b>	<b>PO (h)</b>	<b>DF x UT</b>	<b>DF</b>	<b>UT</b>
PF0121	474	0,09	0,75	0,12
PF7115	267	0,16	0,53	0,30
PF1110	215	0,35	0,65	0,54
PF1108	250	0,31	0,66	0,47
PF4501	186	0,37	0,63	0,59
PF22057	147	0,47	0,68	0,70

Analisando em conjunto os dados das Tabela 5.12, 5.13 e 5.14 concluiu-se que não existe uma situação em que uma perfuratriz apresenta um rendimento melhor do que outra consistentemente, ou seja, nenhuma perfuratriz apresentou para todos os meses um rendimento melhor do que as outras e tampouco, um rendimento pior do que as outras nos três meses. Os

dados da Tabela 5.15 em conjunto sintetiza então este comportamento através dos valores médios referentes aos 3 meses compilados de cada perfuratriz.

Tabela 5.15 - Rendimentos, UT, DF e PO por perfuratriz referente aos 3 meses compilados.

<b>meses compilados</b>				
<b>PF</b>	<b>PO (h)</b>	<b>DF x UT</b>	<b>DF</b>	<b>UT</b>
PF0121	1520	0,10	0,79	0,12
PF7115	821	0,18	0,55	0,32
PF1110	662	0,30	0,60	0,50
PF1108	648	0,37	0,67	0,56
PF4501	530	0,31	0,55	0,56
PF22057	484	0,42	0,64	0,66

O rendimento da PF0121 vai ser o menor de todos porque a sua UT é baixa, pois no seu cálculo é levado em conta todos os turnos embora ela opere somente em um. Sua alta DF, já que fica mecanicamente disponível em todos os turnos a não ser quando está em manutenção, não é suficiente para evitar que o seu rendimento seja baixo.

Pode-se dizer que as PF22057, PF1108 e PF4501 apresentaram um rendimento maior. E dentre as cinco, a que apresentou o rendimento aparentemente menor foi a PF7115. Só que essas observações não são significantes, pois essa análise foi baseada em apenas três meses e, mesmo assim, nenhuma perfuratriz apresentou um maior ou menor rendimento em todos os meses.

Mesmo a PF0121 tendo apresentado baixos rendimentos, baseando-se apenas nos três meses avaliados, sabe-se que, esse comportamento vai ocorrer também em outros meses por causa da forma de cálculo da sua DF.

Isso é um problema que se tem quando se adota as DF e UT médias da frota (considerando as seis perfuratrizes) para o cálculo do rendimento médio para se calcular uma previsão do tempo de término de um plano de perfuração. Na previsão do tempo necessário para se cumprir um plano de perfuração, a empresa utiliza os valores médios da DF e UT da frota (seis perfuratrizes) do mês anterior. Na maioria dos planos basicamente são utilizadas as outras perfuratrizes. A PF0121 apenas é usada em uma área próxima do pit final e dos *pushbacks*. Na maioria dos furos a serem executados utiliza-se as outras cinco perfuratrizes, portanto, não dever-se-ia adotar o rendimento médio da frota de seis perfuratrizes.

Em termos de rendimento das perfuratrizes que vão trabalhar no plano de perfuração esse rendimento médio da frota será subestimado. Da mesma forma, não se recomenda utilizar

o rendimento médio da frota para prever o tempo de execução de furos de pré-corte a serem realizados pela PF0121, pois nesse caso haveria uma superestimativa do rendimento da PF0121.

## 5.2 Ajustes das distribuições

Para executar modelo de simulação é necessário introduzir nele as distribuições de probabilidades que representam o comportamento probabilístico das variáveis DF, UT e Rendimento dependendo dos parâmetros usafrota e usarendimento.

Para a obtenção das funções de distribuição de probabilidades dos dados de entrada utilizou-se uma ferramenta fornecida pelo *software* ARENA, o *Input Analyzer*. Essa ferramenta sugere inicialmente uma distribuição de probabilidade teórica para o ajuste que apresentou o melhor resultado nas tentativas de ajustes baseado no ranqueamento do menor erro quadrático calculado para todos os modelos teóricos testados pelo programa. Embora haja este ranqueamento, a adoção de uma distribuição ajustada deve ser baseada nos valores dos *p-values* obtidos nos testes do qui-quadrado ou KS. É o *p-value* que vai indicar para um determinado nível de significância se uma determinada distribuição teórica pode se ajustar aos dados.

Foi adotado o valor de 5% para o nível de significância dos testes, portanto para considerar que uma dada distribuição “passou” no teste, o seu *p-value* deve ser no mínimo igual a 0,05.

Os dados disponibilizados e usados para o ajuste das distribuições se referem aos valores diários da disponibilidade física e utilização da frota de perfuratrizes durante os meses de abril e maio de 2018. Embora fossem conhecidos o número total de horas de perdas operacionais diárias de cada perfuratriz dos meses de abril, maio e junho de 2018, não foi possível se calcular a utilização diária por perfuratriz pois não se teve acesso os dados das disponibilidades físicas diárias por perfuratriz.

Embora o modelo de simulação desenvolvido permita que se entre com diferentes distribuições ajustadas de DF, UT e rendimento para cada perfuratriz, só foi possível se trabalhar com as distribuições relativas à frota de perfuratrizes.

A Tabela 5.16 apresenta os valores das DF e UT dadas em porcentagem e dos rendimentos diários para os meses de abril e maio de 2018, bem como suas médias, desvios padrão, coeficiente de variação (CV) e valores mínimos e máximos. Os valores de rendimento médio de um dia correspondem ao produto das DF e UT de um dado dia.

Tabela 5.16 - Valores das DF(%) e UT(%) e dos rendimentos diários para os meses de abril e maio de 2018 e suas médias, desvio padrão, mínimo, máximo e coeficiente de variação.

<b>Mês</b>	<b>Abril</b>			<b>Maior</b>		
<b>DIA</b>	<b>DF</b>	<b>UT</b>	<b>Rendimento</b>	<b>DF</b>	<b>UT</b>	<b>Rendimento</b>
01	64,90	41,43	0,2689	52,07	44,78	0,2331
02	57,22	41,60	0,2380	50,45	36,10	0,1821
03	72,34	35,93	0,2599	28,25	42,34	0,1196
04	67,53	39,15	0,2643	33,57	43,41	0,1457
05	50,26	36,75	0,1847	42,48	66,63	0,2831
06	51,28	35,55	0,1823	46,73	48,37	0,2261
07	59,80	48,35	0,2891	42,89	39,82	0,1708
08	60,28	54,69	0,3297	52,04	52,79	0,2748
09	62,85	41,43	0,2604	49,88	52,08	0,2598
10	45,54	43,49	0,1980	68,16	29,94	0,2041
11	37,39	76,99	0,2879	46,90	44,48	0,2086
12	27,07	88,92	0,2407	71,84	37,07	0,2663
13	53,71	27,08	0,1454	79,86	34,52	0,2757
14	97,49	34,12	0,3326	86,65	34,40	0,2981
15	91,86	33,18	0,3048	57,14	45,20	0,2583
16	81,17	14,44	0,1172	62,38	43,37	0,2706
17	83,82	26,46	0,2217	54,96	37,05	0,2036
18	66,37	44,19	0,2933	73,81	38,63	0,2852
19	67,24	59,88	0,4027	75,59	38,38	0,2901
20	71,59	47,65	0,3411	76,52	41,73	0,3193
21	74,94	52,02	0,3898	61,62	35,01	0,2157
22	87,88	57,88	0,5086	62,06	42,39	0,2631
23	89,57	50,49	0,4523	35,73	46,74	0,1670
24	87,08	39,99	0,3482	19,06	53,80	0,1025
25	84,61	35,24	0,2982	42,10	49,37	0,2078
26	77,27	38,36	0,2964	80,38	53,04	0,4263
27	64,38	53,73	0,3459	70,14	60,61	0,4251
28	73,91	49,20	0,3636	68,27	58,41	0,3987
29	48,50	75,54	0,3663	71,54	35,59	0,2546
30	57,20	46,57	0,2664	73,95	35,66	0,2637
31				80,87	38,82	0,3139
<b>Média</b>	67,17	45,68	0,2933	58,64	43,89	0,2520
<b>Desvio Padrão</b>	16,87	15,40	0,0862	17,24	8,66	0,0771
<b>Mínimo</b>	27,07	14,44	0,12	19,06	29,94	0,10
<b>Máximo</b>	97,49	88,92	0,51	86,65	66,63	0,43
<b>CV</b>	0,25	0,34	0,29	0,29	0,20	0,31

Procurou-se através do *Input Analyzer* verificar se alguma distribuição de probabilidade teórica se ajustava aos dados diários de DF, UT e rendimento da frota para os meses de abril, maio e abril e maio juntos. A Tabela 5.17 apresenta alguns parâmetros dos resultados das



tentativas de ajustes realizada pelo *Input Analyser*. Os resultados se referem às distribuições que obtiveram os melhores resultados segundo o ranqueamento baseado no erro médio quadrático.

Tabela 5.17 - Alguns parâmetros dos resultados das tentativas de ajustes realizada no *Input Analyser*.

Variável	Mês	Classes do teste qui-quadrado	Distribuição	<i>p-value</i> qui- quadrado	<i>p-value</i> KS
<b>DF</b>	abril	3	ERLA(0.048, 14)	< 0.005	> 0.15
<b>DF</b>	maio	3	TRIA(0.18, 0.684, 0.9)	0,468	> 0.15
<b>DF</b>	abril e maio	3	WEIB(0.707, 4.94)	< 0.005	> 0.15
<b>UT</b>	abril	2	ERLA(0.036, 13)	< 0.005	> 0.15
<b>UT</b>	maio	2	LOGN(0.439, 0.0826)	< 0.005	> 0.15
<b>UT</b>	abril e maio	4	LOGN(0.448, 0.126)	0,0191	> 0.15
<b>Rendimento</b>	abril	3	NORM(0.293, 0.0848)	< 0.005	> 0.15
<b>Rendimento</b>	maio	3	NORM(0.252, 0.0759)	< 0.005	> 0.15
<b>Rendimento</b>	abril e maio	4	NORM(0.272, 0.0823)	0,405	> 0.15

Pode-se observar através dos *p-values* que somente as distribuições ajustadas aos dados de DF de maio e do Rendimento de abril e maio juntos passaram em ambos os testes de aderência do  $\chi^2$  e KS para um nível de significância de 0,05. Provavelmente este resultado é um reflexo da pequena quantidade de dados utilizados nos ajustes que conduziram a um pequeno número de classes utilizado no cálculo do teste estatístico que dificulta o ajuste pelo método do qui-quadrado.

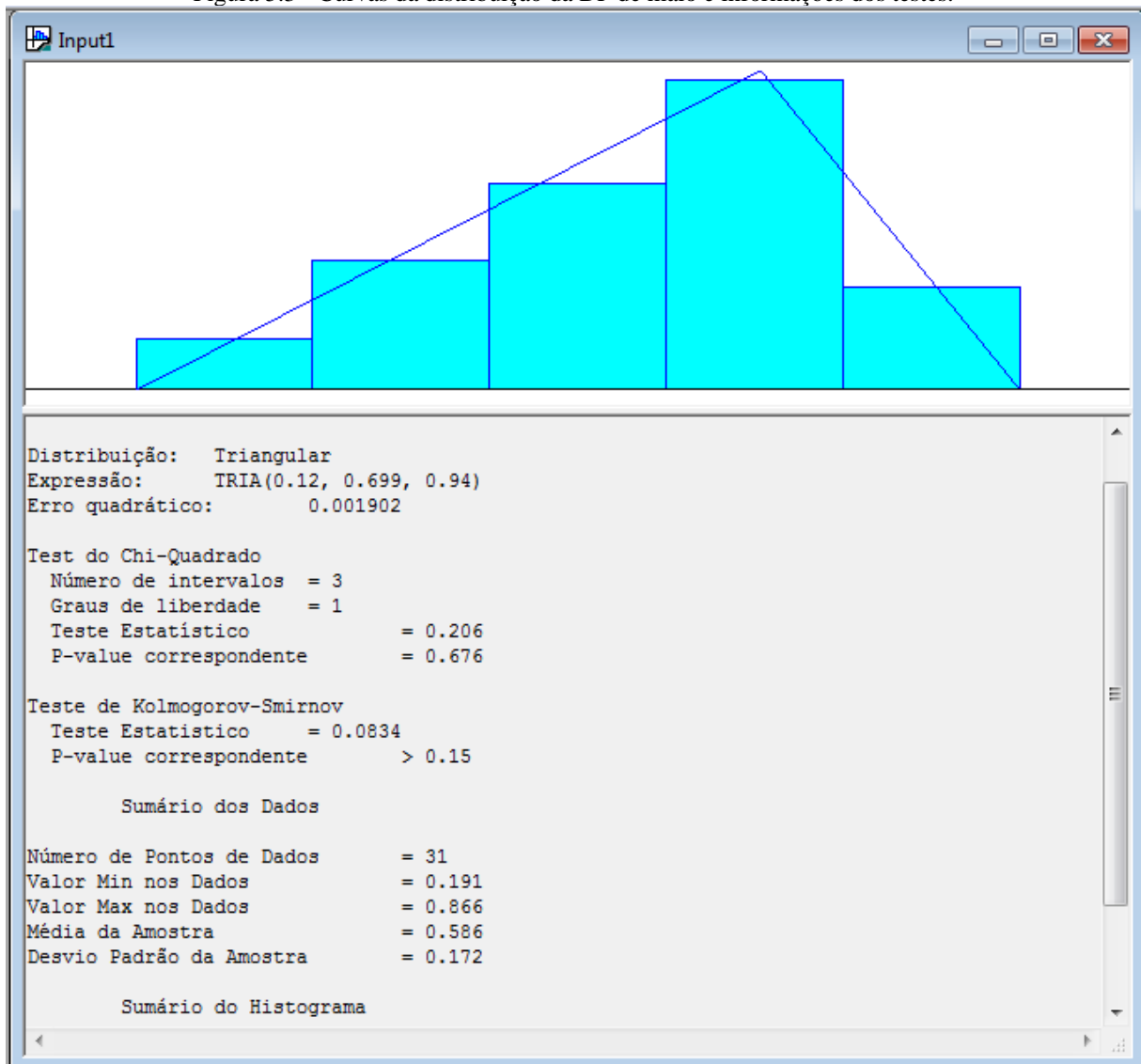
As Figura 5.3 e 5.4 respectivamente mostram as curvas das distribuições para a DF de maio e para o rendimento de abril junto com maio, bem como, outras informações do resultado dos testes.

Quando nenhuma distribuição disponível do *Input Analyser* se ajusta aos dados, deve-se utilizar a “distribuição empírica”, ou seja, a distribuição acumulada crescente ou função de repartição estimada através do histograma acumulado crescente relativo para realizar a amostragem aleatória.

Diferentemente do Arena em que a distribuição empírica é calculada a partir de classes de mesmo tamanho, foi utilizado neste trabalho um histograma acumulado crescente relativo construído ponto a ponto para representar a distribuição empírica. Isto é obtido ordenando-se crescentemente os dados e associando a cada valor numérico de um dado que se encontra na i-

ésima posição do conjunto ordenado um valor de frequência acumulada relativa igual a  $\frac{i}{n+1}$ , onde  $n$  é o número de dados e  $i$  é a ordem ou posição do dado no conjunto ordenado. A distribuição acumulada crescente construída ponto a ponto representa melhor o comportamento probabilístico da variável quando comparada com a construída a partir de classes de mesmo tamanho, principalmente quando o número de dados ou classes são pequenos.

Figura 5.3 - Curvas da distribuição da DF de maio e informações dos testes.



Este procedimento aplicado, por exemplo, aos dados da DF do mês de abril, associaria ao menor valor de DF igual a 0.2707, uma frequência acumulada correspondente a  $1/31$ , ao segundo valor no conjunto ordenado, DF igual a 0.3739 seria associado uma frequência relativa correspondente a  $2/31$  e assim sucessivamente até se chegar ao maior valor de DF que receberia um valor de frequência igual a  $30/31$ .

A Figura 5.5 apresenta a distribuição empírica para a DF de abril para um número de classes igual a 7, bem como a sua expressão.

A Figura 5.6 ilustra como ficaria a distribuição empírica calculada ponto a ponto para a DF de abril.

A Tabela 5.18 contém as expressões das distribuições empíricas que serão utilizadas no modelo de simulação.

Figura 5.4 - Curvas da distribuição do rendimento de abril junto com maio e informações dos testes.

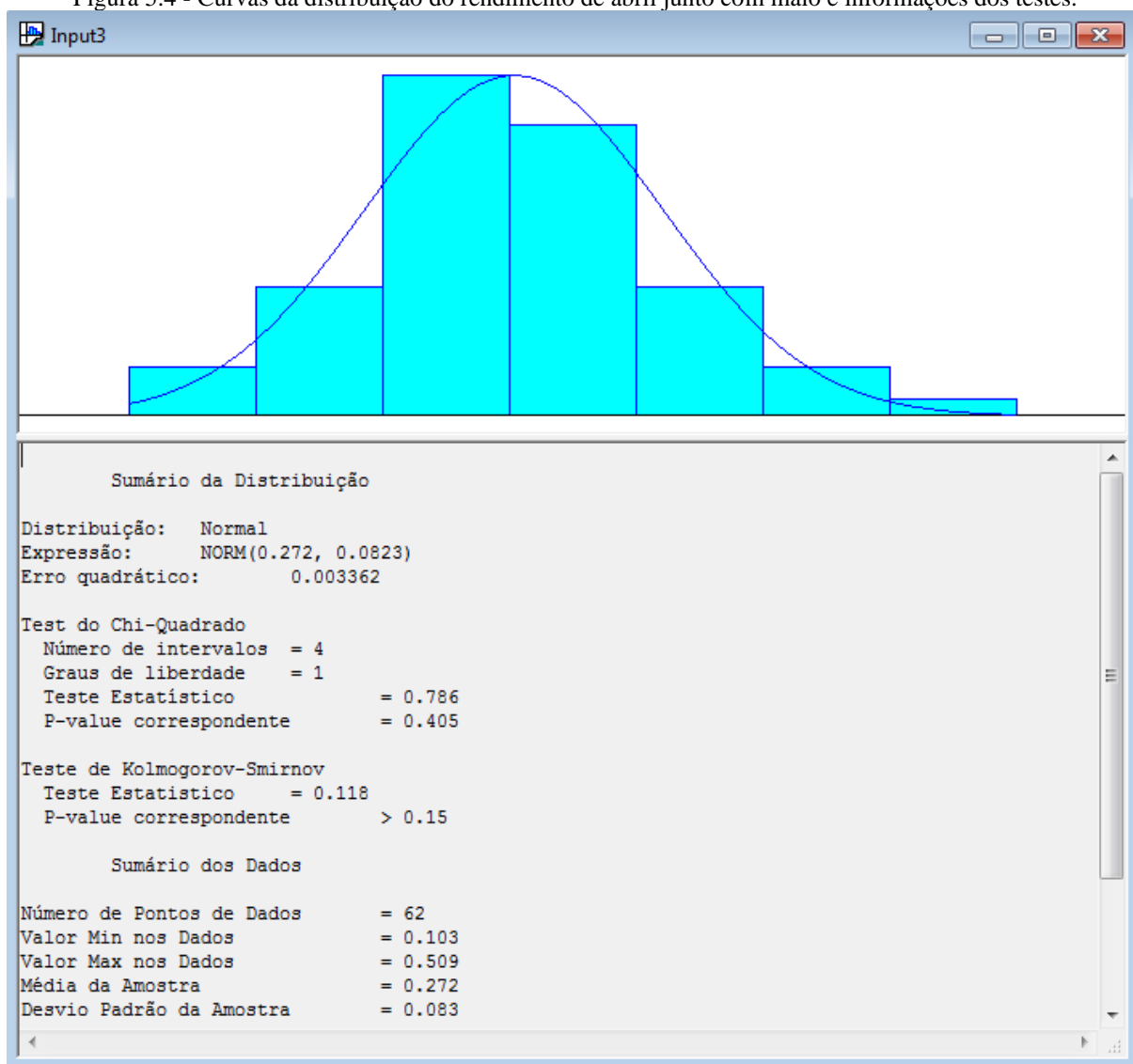


Figura 5.5 - Distribuição empírica para a DF de abril para um número de classes igual a 7, bem como a sua expressão.

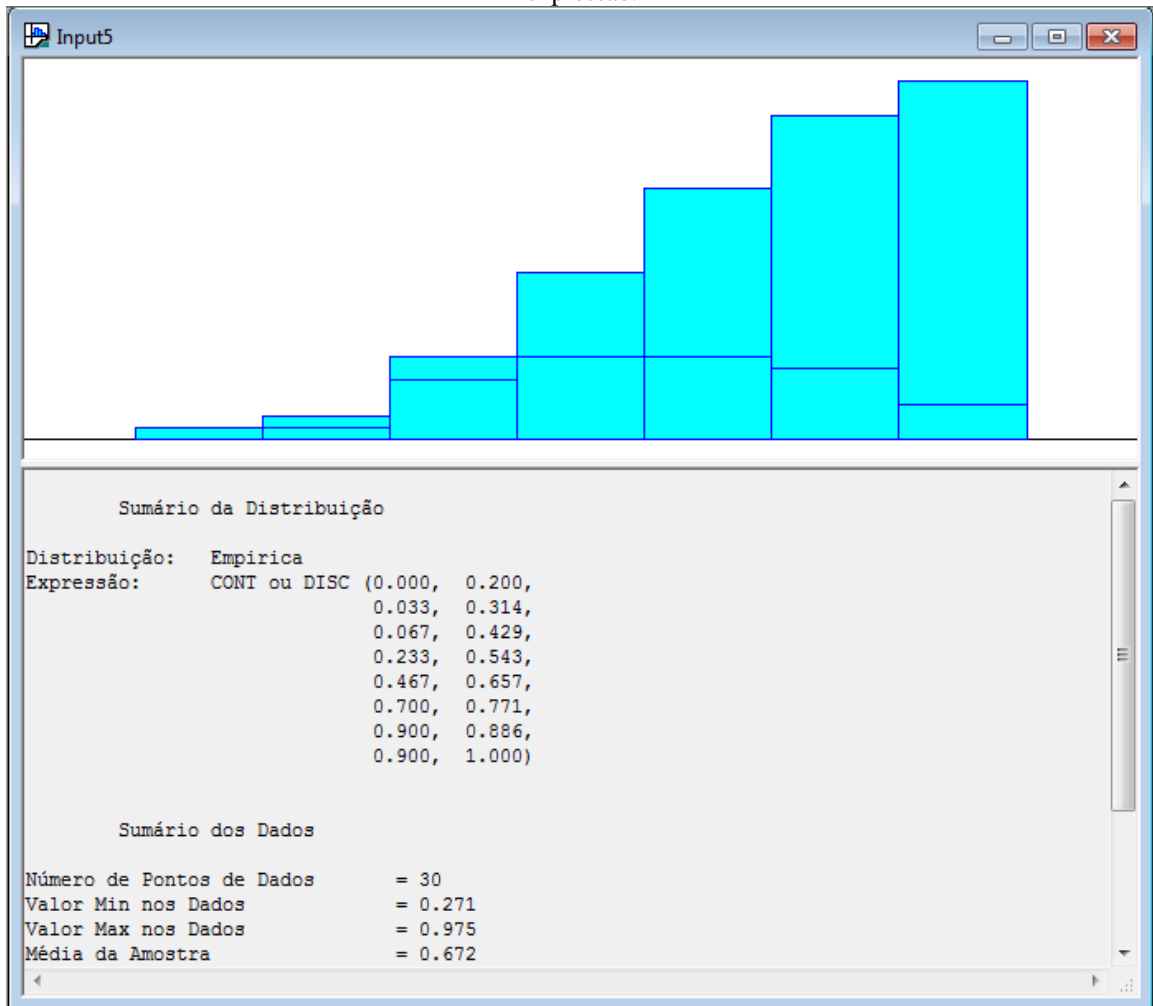


Figura 5.6 - Distribuição empírica calculada ponto a ponto para a DF de abril.

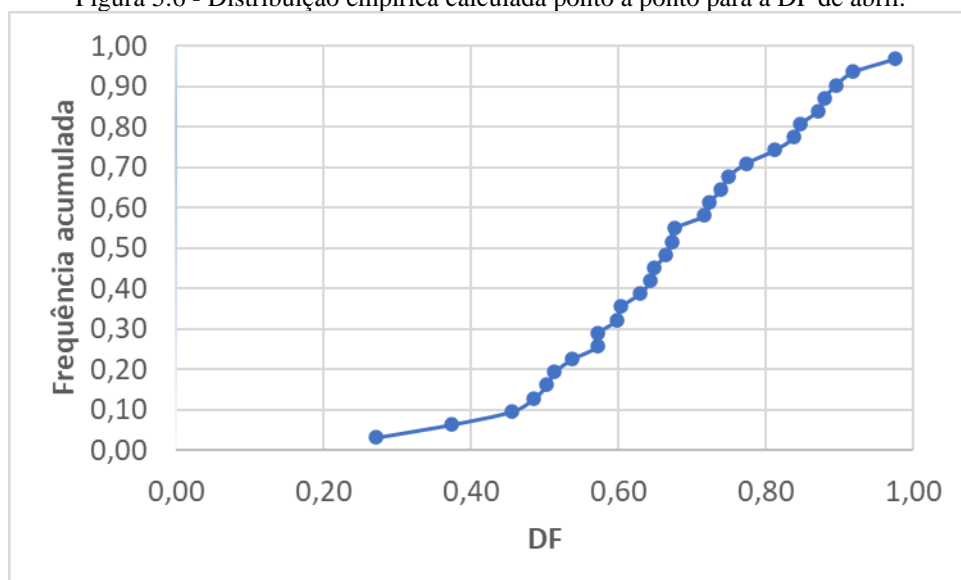


Tabela 5.18 - Expressões das distribuições empíricas que serão utilizadas no modelo de simulação.

DISTRIBUIÇÕES EMPÍRICAS												
DISPONIBILIDADE FÍSICA - MÊS DE ABRIL												
CONT(0.000, 0.260, 0.032, 0.271, 0.065, 0.374, 0.097, 0.455, 0.129, 0.485, 0.161, 0.503, 0.194, 0.513, 0.226, 0.537, 0.258, 0.572, 0.290, 0.572, 0.323, 0.598, 0.355, 0.603, 0.387, 0.629, 0.419, 0.644, 0.452, 0.649, 0.484, 0.664, 0.516, 0.672, 0.548, 0.675, 0.581, 0.716, 0.613, 0.723, 0.645, 0.739, 0.677, 0.749, 0.710, 0.773, 0.742, 0.812, 0.774, 0.838, 0.806, 0.846, 0.839, 0.871, 0.871, 0.879, 0.903, 0.896, 0.935, 0.919, 0.968, 0.975, 1.000, 0.980)												
UTILIZAÇÃO - MÊS DE ABRIL												
CONT(0.000, 0.140, 0.032, 0.144, 0.065, 0.265, 0.097, 0.271, 0.129, 0.332, 0.161, 0.341, 0.194, 0.352, 0.226, 0.355, 0.258, 0.359, 0.290, 0.368, 0.323, 0.384, 0.355, 0.391, 0.387, 0.400, 0.419, 0.414, 0.452, 0.414, 0.484, 0.416, 0.516, 0.435, 0.548, 0.442, 0.581, 0.466, 0.613, 0.476, 0.645, 0.484, 0.677, 0.492, 0.710, 0.505, 0.742, 0.520, 0.774, 0.537, 0.806, 0.547, 0.839, 0.579, 0.871, 0.599, 0.903, 0.755, 0.935, 0.770, 0.968, 0.889, 1.000, 0.890)												
RENDIMENTO - MÊS DE ABRIL												
CONT(0.000, 0.118, 0.032, 0.117, 0.065, 0.145, 0.097, 0.182, 0.129, 0.185, 0.161, 0.198, 0.194, 0.222, 0.226, 0.238, 0.258, 0.241, 0.290, 0.260, 0.323, 0.260, 0.355, 0.264, 0.387, 0.266, 0.419, 0.269, 0.452, 0.288, 0.484, 0.289, 0.516, 0.293, 0.548, 0.296, 0.581, 0.298, 0.613, 0.305, 0.645, 0.330, 0.677, 0.333, 0.710, 0.341, 0.742, 0.346, 0.774, 0.348, 0.806, 0.364, 0.839, 0.366, 0.871, 0.390, 0.903, 0.403, 0.935, 0.452, 0.968, 0.509, 1.000, 0.510)												
RENDIMENTO - MESES DE ABRIL E MAIO												
CONT (0.000, 0.265, 0.016, 0.269, 0.032, 0.238, 0.048, 0.26, 0.065, 0.264, 0.081, 0.185, 0.097, 0.182, 0.113, 0.289, 0.129, 0.33, 0.145, 0.26, 0.161, 0.198, 0.177, 0.288, 0.194, 0.241, 0.21, 0.145, 0.226, 0.333, 0.242, 0.305, 0.258, 0.117, 0.274, 0.222, 0.29, 0.293, 0.306, 0.403, 0.323, 0.341, 0.339, 0.39, 0.355, 0.509, 0.371, 0.452, 0.387, 0.348, 0.403, 0.298, 0.419, 0.296, 0.435, 0.346, 0.452, 0.364, 0.468, 0.366, 0.484, 0.266, 0.5, 0.233, 0.516, 0.182, 0.532, 0.12, 0.548, 0.146, 0.565, 0.283, 0.581, 0.226, 0.597, 0.171, 0.613, 0.275, 0.629, 0.26, 0.645, 0.204, 0.661, 0.209, 0.677, 0.266, 0.694, 0.276, 0.71, 0.298, 0.726, 0.258, 0.742, 0.271, 0.758, 0.204, 0.774, 0.285, 0.79, 0.29, 0.806, 0.319, 0.823, 0.216, 0.839, 0.263, 0.855, 0.167, 0.871, 0.103, 0.887, 0.208, 0.903, 0.426, 0.919, 0.425, 0.935, 0.399, 0.952, 0.255, 0.968, 0.264, 0.984, 0.314, 1.000, 0.315)												

### 5.3 Resultados da simulação

O modelo de simulação foi utilizado para simular o tempo de execução do plano de perfuração descrito no item 4.2 para diferentes situações de amostragem aleatória das variáveis DF e UT ou do rendimento O tempo simulado se refere somente à perfuração, não sendo

considerado o tempo para carregamento de explosivos, detonação e liberação da área desmontada. Os resultados foram comparados com os calculados pela planilha, levando-se em conta os valores médios das variáveis DF e UT ou do rendimento relativos ao mês de abril, anterior ao mês de execução do plano de perfuração.

Segundo o plano, devem ser usadas 3 perfuratrizes para executarem 431 furos de 11 metros com uma taxa de penetração ou produtividade média constante de 17 m/h. No modelo de simulação o que foi chamado de produtividade corresponde a taxa de penetração. O modelo foi alimentado com todas essas informações, além das distribuições de probabilidade das DF, UT e rendimento.

Como mencionado no item 4.2 foram usados dados médios diários da frota, embora o modelo permita que se entre com informações diferentes para cada perfuratriz desde que elas estejam disponíveis.

Diferentes simulações foram realizadas de acordo com as variáveis amostradas e a forma de utilização delas para o cálculo das produtividades efetivas e conseqüentemente do tempo de execução do plano completo.

Diferentes cenários de simulação foram realizados considerando que num dado dia as produtividades efetivas de cada perfuratriz podem ser diferentes ou serem as mesmas (situação do exemplo do item 4.2), e que as produtividades efetivas das perfuratrizes podem ser calculadas utilizando os valores da DF e UT amostrados independentemente (valor da variável usarendimento = 0) ou então utilizando-se os valores amostrados do rendimento (valor da variável usarendimento = 1).

Em todas as simulações o sistema e as estatísticas foram inicializados entre cada réplica. Foram realizadas também 50 réplicas.

### **Cenário 1 – DF e UT amostrados e produtividades efetivas iguais para todas as perfuratrizes**

Foram usadas as distribuições empíricas referentes ao mês de abril de 2018. Os resultados se encontram na Tabela 5.19.

Para o tempo de perfuração as colunas denominadas “Média Global”, “Média Mínima” e “Média Máxima”, apresentam respectivamente o valor médio, o menor e o maior valor do tempo de perfuração total do plano das 50 réplicas.

Para cada réplica da simulação foram gerados via amostragem aleatória vários valores de DF e UT para serem calculadas as produtividades efetivas. Para cada par de valores de DF e UT gerados, calculou-se o Rendimento multiplicando-se DF por UT.

Tabela 5.19 - Resultado da simulação para DF e UT amostrados e produtividade efetiva iguais para todas as perfuratrizes.

Variáveis	Média Global	Metade de IC - 95%	Média Mínima	Média Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	302.74	10.68	236.58	388.66
Disponibilidade Física (DF)	0.6793	0.01	0.5978	0.8075
Utilização (UT)	0.4575	0.01	0.3457	0.5592
Rendimento (DF x UT)	0.3116	0.01	0.2392	0.3929

Os parâmetros estatísticos que aparecem na Tabela 5.19 para as variáveis DF, UT e Rendimento se referem aos valores médios destas variáveis em cada simulação. Dessa forma, na coluna “Média Global” se tem a média dos valores médios amostrados dessas variáveis e nas colunas “Média Mínima” e “Média Máxima” se tem respectivamente, o menor e o maior valor médio calculado entre as 50 simulações realizadas. A metade do intervalo de confiança de 95% para cada uma das variáveis se encontra na coluna chamada de “Metade de IC - 95%”.

Ao se comparar o valor do tempo de perfuração médio obtido via simulação, com o valor de 303 calculado no item 4.2 por meio da planilha, verifica-se que os valores são praticamente iguais. A vantagem da simulação neste caso ficaria por conta do intervalo de confiança que estabelece uma faixa de valores em que o tempo de perfuração verdadeiro poderia se encontrar com uma certa probabilidade ou confiança, que no caso é de 95%. Neste cenário o intervalo de confiança (IC) seria dado por (292,06;313,42).

Comparando-se os valores médios de DF e UT, presentes na coluna “Média Global” da Tabela 5.19, com os valores médios dos dados do mês de abril da Tabela 5.16, verificou-se que a amostragem aleatória reproduziu bem o comportamento probabilístico dos dados pelo menos em termos de média. Os valores médios verdadeiros estão dentro dos seus intervalos de confiança, ou seja, (0.6693; 0.6893) e (0.4475; 0.4675) respectivamente para DF e UT. Não se pode tirar a mesma conclusão para a variável rendimento.

Admitindo-se que a produtividade efetiva de todas as perfuratrizes possa ser representada pela produtividade efetiva da frota, a estimativa do tempo de perfuração feita através dos valores médios de DF e UT do mês de abril será considerada boa se a média das produtividades efetivas da frota que realmente ocorrerem durante o período em que o plano for realizado estiver próximo da produtividade efetiva calculada através dos valores médios de DF e UT do mês de abril.

No caso da simulação se o comportamento probabilístico dos pares de valores de DF e UT gerados aleatoriamente forem representativos dos pares de valores de DF e UT que realmente ocorrerem durante a execução do plano, é esperado que o tempo de perfuração esteja dentro do IC estimado pela simulação.

No exemplo do item 4.2 é previsto que a perfuração se inicie no dia 4/5/18 às 16:00. Como foram disponibilizados os dados diários de DF e UT do mês de maio de 2018 e admitindo-se que a produtividades efetivas das perfuratrizes sejam bem representadas pela produtividade efetiva da frota, pode-se ter uma ideia de quando a perfuração terminou. Os cálculos estão apresentados na Tabela 5.20.

Na Tabela 5.20, os valores que aparecem nas colunas “DF” e “UT” são os valores médios da DF e UT da frota que ocorreram no dia especificado na coluna “Dia”. A produtividade efetiva da frota, PDE, foi calculada a partir destes valores para cada dia. Com o valor de PDE, o número de furos e metros executados em um dia são calculados e abatidos respectivamente nas colunas “NF restantes” e “metros faltantes” no início de cada dia. Este processo se repete até que todos os furos sejam executados. Dessa forma, o tempo de execução do plano teria sido de 371.73 horas, ou 14,49 dias, bem acima do estimado no item 4.2 e fora do IC sugerido pela simulação. Uma análise mais detalhada para se explicar esta diferença será apresentada mais à frente.

Não foi possível fazer a comparação dos valores estimados via simulação e através das DF e UT médias do mês de abril com o tempo realmente gasto na execução do plano, pois não se tinha esta informação.



Tabela 5.20 - Descrição diária de um plano de perfuração executado por três perfuratrizes utilizando os valores de DF e UT da frota realizado no mês de maio.

	Dia	NF restantes	metros restantes	TP (m/h)	DF (%)	UT (%)	PDE (3 perf.)	metros executados
<b>Início</b>	<b>4/5/18 16:00</b>	431.0	4741.0	17	33.6	43.4	7.43	59.4
	5/5/18 0:00	425.6	4681.6	17	42.5	66.6	14.44	346.5
	6/5/18 0:00	394.1	4335.1	17	46.7	48.4	11.53	276.7
	7/5/18 0:00	368.9	4058.4	17	42.9	39.8	8.71	209.1
	8/5/18 0:00	349.9	3849.3	17	52.0	52.8	14.01	336.3
	9/5/18 0:00	319.4	3513.0	17	49.9	52.1	13.25	318.0
	10/5/18 0:00	290.5	3195.0	17	68.2	29.9	10.41	249.8
	11/5/18 0:00	267.7	2945.2	17	46.9	44.5	10.64	255.4
	12/5/18 0:00	244.5	2689.9	17	71.8	37.1	13.58	326.0
	13/5/18 0:00	214.9	2363.9	17	79.9	34.5	14.06	337.4
	14/5/18 0:00	184.2	2026.5	17	86.6	34.4	15.20	364.9
	15/5/18 0:00	151.1	1661.6	17	57.1	45.2	13.17	316.2
	16/5/18 0:00	122.3	1345.4	17	62.4	43.4	13.80	331.2
	17/5/18 0:00	92.2	1014.3	17	55.0	37.0	10.38	249.2
	18/5/18 0:00	69.6	765.1	17	73.8	38.6	14.54	349.0
	19/5/18 0:00	37.8	416.0	17	75.6	38.4	14.80	355.1
	20/5/18 0:00	5.5	60.9	17	76.5	41.7	16.29	60.9
<b>Término</b>	<b>20/5/18 3:44</b>							
<b>Total (horas)</b>	<b>371.73</b>							

### **Cenário 2 – DF e UT amostrados e produtividades efetivas diferentes para as perfuratrizes**

Sabe-se que as produtividades efetivas podem variar com as perfuratrizes. Se a DF diária de cada perfuratriz fosse conhecida, poder-se-ia através de amostragens aleatórias sobre distribuições ajustadas de DF, UT e rendimento para cada perfuratriz simular os valores das produtividades efetivas diárias específicas das perfuratrizes selecionadas para executar o plano de perfuração.

Na falta dessas informações, uma alternativa que se adotou para considerar diferentes produtividades efetivas diárias para diferentes perfuratrizes foi realizar no início de um dia uma amostragem diferente dos valores de DF, UT e rendimento para cada perfuratriz, considerando as distribuições relativas à frota. No cenário 2, bem como no cenário 1, somente valores de DF e UT foram amostrados. O rendimento foi calculado através da multiplicação de DF por UT.

Os resultados provenientes das 50 réplicas simuladas são apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Resultado da simulação para DF e UT amostrados e produtividade efetiva iguais para todas as perfuratrizes.

Variáveis	Média	Metade de	Média	Média
	Global	IC - 95%	Mínima	Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	305	6.35	253.63	354.83
Disponibilidade Física (DF)	0.6646	0.01	0.5715	0.7771
Utilização (UT)	0.4653	0.01	0.3808	0.6815
Rendimento (DF x UT)	0.3088	0.01	0.2389	0.4316

Os resultados são parecidos com os do cenário 1. O tempo total de simulação foi de 305 horas com um IC de (298.65; 311.35). Em relação ao cenário 1 o tempo médio de perfuração do cenário 2, foi maior em apenas 3 e apresentou um IC mais apertado. Provavelmente o IC associado ao valor do tempo de perfuração tenha sido menor no cenário 2, devido ao maior número de amostragens realizados na simulação deste cenário.

Os valores médios de DF e UT do mês de abril da Tabela 5.16 estão dentro dos seus respectivos IC (0.6546; 0.6746) e (0.4553; 0.4753) obtidos a partir dos dados da Tabela 5.21. Já o valor médio do rendimento se encontra fora do IC (0.2988; 0.3188).

### **Cenário 3 – Rendimento amostrado e produtividades efetivas iguais para as perfuratrizes**

Ao se multiplicar os valores médios da DF e UT da Tabela 5.16 referentes ao mês de abril observa-se que o resultado não é igual ao rendimento médio deste mês. O mesmo acontece com os valores para o mês de maio, mas com uma diferença menor. Isto é indício de que DF e UT não são independentes, portanto, não deveriam ser amostrados separados de forma independente. A utilização depende das horas mecanicamente disponíveis (HD) que por sua vez são dependentes da DF.

A Figura 5.7 apresenta a nuvem de correlação entre os valores de DF e UT diários da frota referentes ao mês de abril, bem como a reta de tendência ou regressão. O valor do coeficiente de correlação de Pearson é de - 53,78% o que comprova juntamente com a Figura 5.7 que os valores de DF e UT estão correlacionados.

Essa correlação ocorre também para o mês de maio. A Figura 5.8 apresenta a nuvem de correlação entre DF e UT e a reta de regressão para o mês de maio. O coeficiente de correlação de Pearson é de - 36,84%.

Figura 5.7 - Nuvem de correlação entre os valores de DF e UT da frota referentes ao mês de abril.

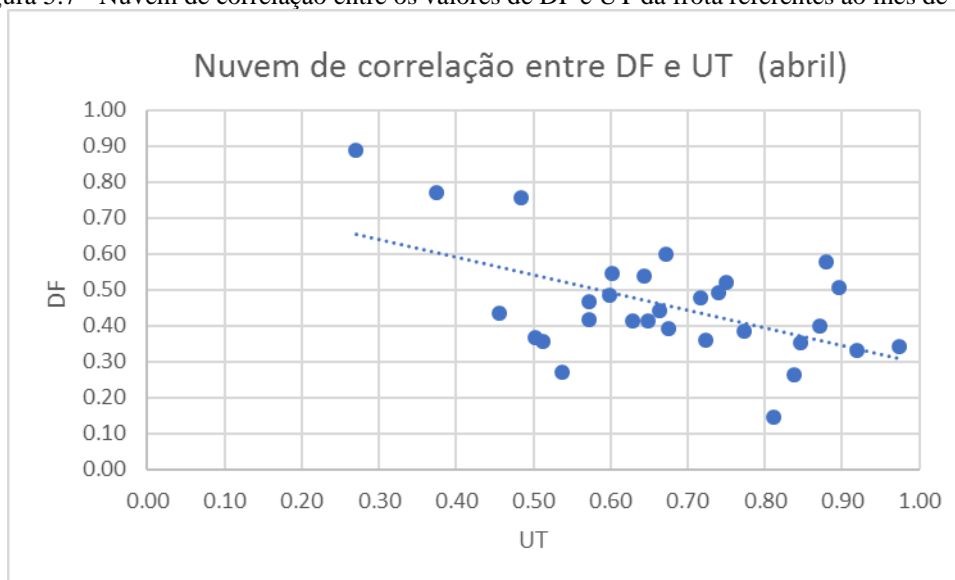
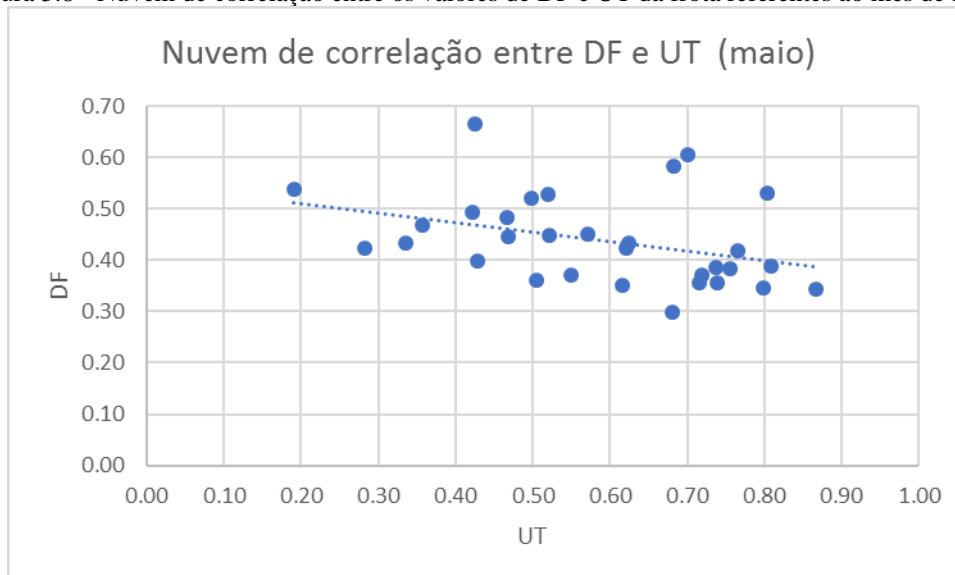


Figura 5.8 - Nuvem de correlação entre os valores de DF e UT da frota referentes ao mês de maio.



No cenário 3 essa correlação será levada em conta no cálculo das produtividades efetivas através da amostragem aleatória dos valores de rendimento realizada diretamente na distribuição dos valores do rendimento diários da frota do mês de abril.

Nesse cenário a amostragem do valor do rendimento em cada dia é feito somente uma vez e será considerado para o cálculo da produtividade efetiva de todas as perfuratrizes.

Os resultados provenientes das 50 réplicas simuladas do cenário 3 são apresentados na Tabela 5.22.

O valor do tempo total de perfuração 317.86 horas já é bem diferente dos obtidos nos cenários 1 e 2. O seu IC é de (310.69; 325.03). O valor do rendimento médio do mês de abril da Tabela 5.16 agora se encontra dentro do IC dado por (0.2842; 0.3042).

Tabela 5.22 - Resultado da simulação referentes ao rendimento amostrado e produtividade efetiva iguais para as perfuratrizes.

Variáveis	Média	Metade de	Média	Média
	Global	IC - 95%	Mínima	Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	317.86	7.17	263.18	392.05
Rendimento	0.2942	0.01	0.2371	0.3532

Por causa da correlação entre DF e UT, na estimativa do tempo de perfuração realizado via planilha, como mostrado no item 4.2, deveria ser utilizado também o valor do rendimento médio do mês de abril igual a 0.2933 ao invés dos valores médios de DF e UT que são multiplicados para o cálculo das produtividades efetivas das perfuratrizes.

Efetuiu-se um novo cálculo com o valor médio do rendimento da frota do mês de abril e o obteve-se o valor de 316,89 horas para o tempo total de perfuração via planilha. Este valor está bem próximo do valor obtido pela simulação, mas bem aquém ainda do valor de 371.73 horas calculado pela Tabela 5.20.

#### **Cenário 4 – Rendimento amostrado e produtividades efetivas diferentes para as perfuratrizes**

Neste cenário será considerado que perfuratrizes diferentes podem apresentar produtividades efetivas diferentes para um mesmo dia. Tal como no cenário 2 no início de cada dia, para cada perfuratriz será feita uma amostragem aleatória só que neste caso sobre a distribuição dos rendimentos do mês de abril. No cenário 2 as amostragens eram sobre as distribuições de DF e UT.

Os resultados provenientes das 50 réplicas simuladas do cenário 4 são apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 - Resultado da simulação referentes ao rendimento amostrado e produtividade efetiva diferentes para as perfuratrizes.

Variáveis	Média	Metade de	Média	Média
	Global	IC - 95%	Mínima	Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	316.33	4.16	287.28	347.18
Rendimento (DF x UT)	0.3001	0.01	0.2343	0.3603

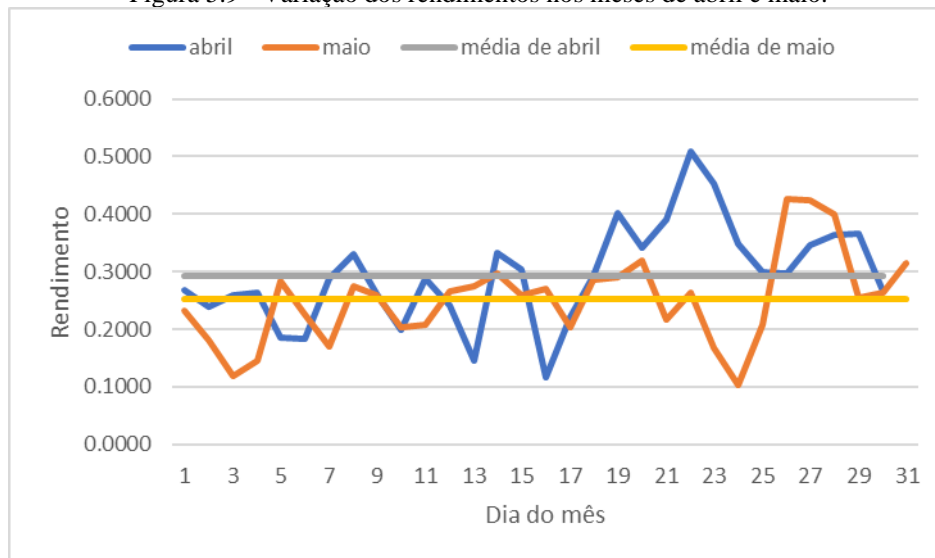
Os resultados são parecidos com os do cenário 3. O tempo total de simulação foi de 316.33 horas com um IC mais apertado de (298.65; 311.35) quando comparado com o do cenário 3. A diferença entre os valores médios do tempo de perfuração foi só de 1,53 horas. Provavelmente o IC associado ao valor do tempo de perfuração tenha sido menor no cenário 4, devido ao maior número de amostragens de rendimento realizadas na simulação deste cenário.

Tal como no cenário 3, o valor do rendimento médio do mês de abril da Tabela 5.16 ficou dentro do IC dado por (0.2901; 0.3101).

Uma análise dos resultados dos tempos de perfuração previstos no cenário 4 e via planilha através do rendimento médio do mês de abril em relação ao provável tempo de execução do plano será feita, admitindo-se que as produtividades efetivas diárias das perfuratrizes durante a execução do plano sejam representadas pelas produtividades efetivas diárias da frota calculadas a partir dos rendimentos diários da frota.

A Figura 5.9 mostra como o rendimento da frota variou diariamente durante os meses de abril e maio de 2018 e os seus valores médios em cada mês.

Figura 5.9 - Variação dos rendimentos nos meses de abril e maio.



Inicialmente nota-se na Figura 5.9 que a média de abril é maior do que a média de maio. Segundo a Tabela 5.20, a perfuração do plano se iniciou no dia 04.05.2018 às 16h e terminou no dia 20.05.2018 às 03:44. Pode-se observar que no período do dia 04 de maio até o dia 20 de maio, somente nos dias 14 e 20 os rendimentos ficaram acima do valor médio dos rendimentos do mês de abril. Embora durante a simulação possam ser gerados valores que estejam abaixo do rendimento médio do mês de maio, já que os valores gerados tendem a reproduzir a distribuição dos rendimentos do mês de abril e de fato isto ocorre com os valores de rendimentos de abril, na maioria das vezes os valores gerados estão acima. Por isso, o tempo previsto para a perfuração é bem menor do que o “executado” de acordo com as premissas assumidas.

Admitindo-se que para qualquer plano de perfuração a ser executado em maio, a previsão pela planilha use a média dos rendimentos de abril (mês anterior) e a previsão através da simulação utilize a distribuição dos rendimentos de abril, as previsões seriam as mesmas qualquer que fosse o dia de início do mesmo plano de perfuração considerado neste trabalho.

Trabalhando com os mesmos dados do plano de perfuração e variando-se somente a data de início, de forma semelhante à apresentada na Tabela 5.20 foram calculados os tempos de execução do plano e os rendimentos médios referentes aos diferentes períodos de execução do plano. Os resultados se encontram na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 - Resultados do tempo de execução do plano e os rendimentos médios para diferentes datas de início.

início	término	tempo	rendimento médio
04/mai	20/mai	371.73	0.2494
05/mai	20/mai	367.40	0.2559
06/mai	21/mai	366.92	0.2517
07/mai	22/mai	366.62	0.2540
08/mai	22/mai	358.20	0.2595
09/mai	24/mai	380.60	0.2430
10/mai	26/mai	386.10	0.2507
11/mai	26/mai	373.58	0.2536
12/mai	27/mai	361.33	0.2672
13/mai	27/mai	352.37	0.2672
14/mai	28/mai	344.45	0.2754
15/mai	29/mai	339.75	0.2725
16/mai	30/mai	339.97	0.2729
17/mai	31/mai	339.85	0.2758

A Figura 5.10 apresenta a comparação entre o rendimento previsto (média de abril) e executados para diferentes datas de início em maio do plano de perfuração. A Figura 5.11 apresenta a comparação entre o tempo de execução previsto e executados para diferentes datas de início em maio do plano de perfuração.

Figura 5.10 - Comparação do rendimento previsto com executado para diferentes datas de início do plano de perfuração.

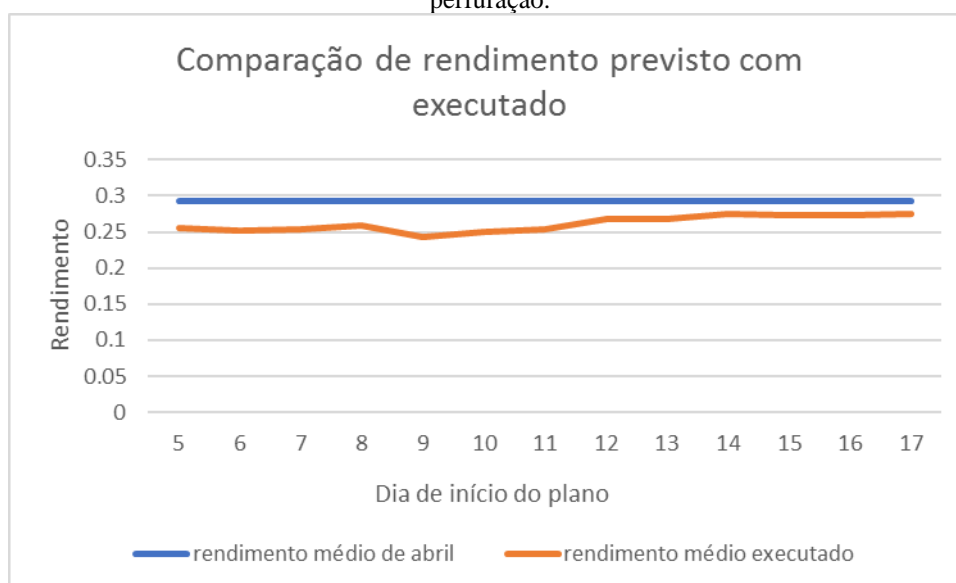
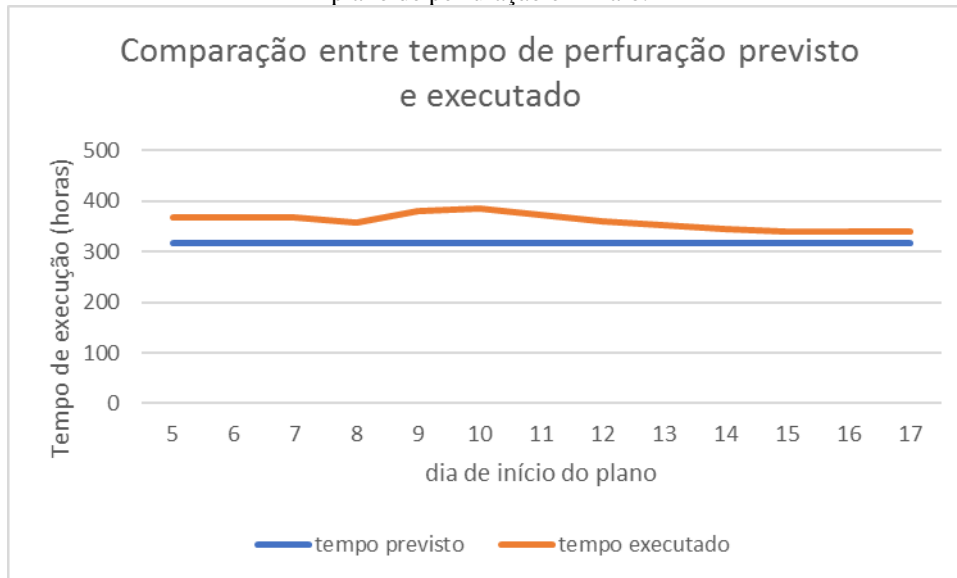


Figura 5.11 - Comparação entre o tempo de execução previsto e executado para diferentes datas de início do plano de perfuração em maio.



Através dessas figuras verifica-se que independentemente do dia de maio de início do plano de perfuração, o tempo previsto para execução do plano através do rendimento médio do mês de abril sempre seria menor do que o realizado. Quando o rendimento médio do executado se aproxima do rendimento médio de abril a previsão se aproxima do executado.

Pelo menos para o plano em estudo e com os poucos dados disponíveis, a qualidade da previsão está diretamente ligada às informações que se tem antes do começo do plano e quais serão utilizadas.

#### **Cenário 5 - Rendimento amostrado da frota usando ajuste empírico e produtividades efetivas diferentes para as perfuratrizes**

Foram feitas também via simulação e através do rendimento médio outras estimativas para o plano de perfuração com início em 04.05.2018, mas usando informações referentes aos últimos 30 dias antes do início do plano.

Para essa situação, o rendimento médio calculado entre os dias 04 de abril e 03 de maio foi de 0.2856 que gerou um tempo estimado de perfuração igual a 325,52 horas.

Uma distribuição de probabilidade empírica para os rendimentos da frota para o período de 04 de abril a 03 de maio foi ajustada e usada no modelo de simulação. Neste cenário, denominado cenário 5, foi considerado que as produtividades diárias de cada perfuratriz podem ser diferentes. Os resultados das 50 réplicas são apresentados na Tabela 5.25.



Tabela 5.25 - Resultado da simulação da frota referentes ao rendimento amostrado de uma distribuição empírica para o período de 4 de abril a 3 de maio com as produtividades diárias diferentes.

Variáveis	Média Global	Metade de IC - 95%	Média Mínima	Média Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	324.01	4.72	293.4	356.23
Rendimento (DF x UT)	0.2932	0.01	0.2314	0.3567

A média dos tempos de execução de todas as réplicas foi de 324.01 horas, bem próximo do valor gerado pela planilha (325,52 horas) considerando o rendimento médio dos últimos 30 dias. O IC do tempo de execução foi de (319.29; 328.73). Este valor se aproximou um pouco mais do executado (371.73 horas) devido ao fato de incorporar a queda de rendimento que ocorreu nos três primeiros dias de maio. A diferença, porém, é ainda alta entre previsto e executado.

Admitindo-se tal como na Tabela 5.24 diferentes dias para o início do plano de perfuração, realizou-se previsões para o tempo de execução do plano utilizando-se as médias móveis dos rendimentos dos 30 dias anteriores ao início do plano. Os resultados são apresentados na Tabela 5.26.

Tabela 5.26 - Previsões para o tempo de execução do plano utilizando-se as médias móveis dos rendimentos dos 30 dias anteriores ao início do plano.

início	término	tempo previsto	tempo executado	rendimento médio 30 dias	rendimento médio executado
04/mai	20/mai	325.52	371.73	0.2856	0.2494
05/mai	20/mai	330.14	367.4	0.2816	0.2559
06/mai	21/mai	326.32	366.92	0.2849	0.2517
07/mai	22/mai	324.72	366.62	0.2863	0.254
08/mai	22/mai	329.21	358.2	0.2824	0.2595
09/mai	24/mai	331.32	380.6	0.2806	0.243
10/mai	26/mai	331.44	386.1	0.2805	0.2507
11/mai	26/mai	331.20	373.58	0.2807	0.2536
12/mai	27/mai	334.30	361.33	0.2781	0.2672
13/mai	27/mai	333.22	352.37	0.2790	0.2672
14/mai	28/mai	328.16	344.45	0.2833	0.2754
15/mai	29/mai	329.56	339.75	0.2821	0.2725
16/mai	30/mai	331.32	339.97	0.2806	0.2729
17/mai	31/mai	325.41	339.85	0.2857	0.2758

Os resultados da Tabela 5.26 melhoram um pouco mais a previsão pois passam a incorporar valores de rendimentos mais baixos que ocorrem no mês de maio, mas os rendimentos médios dos últimos 30 dias antes do início do dia de execução do plano são todos menores do que os rendimentos médios que ocorreram durante cada período de execução do plano.

É importante ressaltar novamente que para a comparação entre previsto e executado, supõe-se que o “tempo real de execução” possa ser calculado através dos valores dos rendimentos diários da frota relativos aos dias de duração de execução do plano de perfuração completo, já que não se tem o tempo que realmente foi gasto na execução de todos os furos previstos no plano.

Nestas condições, a diferença entre executado e previsto “através de planilha” vai depender da proximidade entre o rendimento médio dos dias em que o plano foi executado e o rendimento médio do mês ou dos 30 dias que antecedem à data de início de execução do plano.

Se a previsão for feita via modelo de simulação, quanto mais a amostragem sobre distribuição dos rendimentos baseada nos rendimentos do mês ou dos 30 dias que antecedem à data de início de execução do plano conseguir reproduzir os rendimentos médios diários da frota que ocorrerem durante o período de execução do plano, maiores serão as chances de o tempo de execução real estar dentro do IC do tempo previsto de execução fornecido pela simulação.

#### **Cenários 6 e 7 - Rendimento amostrado como no cenário 4, porém utilizando dados para diferentes períodos**

Para se tentar comprovar esta afirmação, foram simulados mais dois cenários de simulação com as mesmas condições do cenário 4, mas com distribuições de rendimentos médios diários da frota ajustadas aos dados de diferentes períodos.

No cenário 6 foi considerada uma distribuição ajustada aos dados dos rendimentos da frota referentes aos meses de abril e maio de 2018.

No cenário 7 foi considerada uma distribuição ajustada aos dados dos rendimentos da frota referentes somente ao mês de maio de 2018.

Na realidade estes cenários não seriam possíveis pois não se teria os valores dos rendimentos médios da frota relativos à data em que o plano não foi iniciado ainda.

Os resultados do cenário 6 para as 50 simulações estão na Tabela 5.27.

Tabela 5.27 - Resultado da simulação considerando os dados de rendimento amostrado sobre os meses de abril e maio de 2018.

Variáveis	Média	Metade de	Média	Média
	Global	IC - 95%	Mínima	Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	344.49	3.75	322.18	378.56
Rendimento (DF x UT)	0.2698	<0.01	0.234	0.3061

O tempo médio previsto pela simulação foi de 344,49 horas com um IC em horas de (340,74; 348.24) já está mais próximo do tempo de execução de 371,73 horas. O rendimento médio da simulação está mais próximo também do rendimento médio do período de execução do plano que é de 0,2494.

O rendimento médio da frota considerando os meses de abril e maio é de 0,2725. Usando este valor para fazer a previsão pela planilha obteve-se um tempo de execução previsto de 341.17 horas, valor próximo à média calculada pela simulação.

Os resultados do cenário 7 para as 50 simulações estão na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 - Resultado da simulação considerando a distribuição ajustada aos dados dos rendimentos da frota referentes somente maio de 2018.

Variáveis	Média	Metade de	Média	Média
	Global	IC - 95%	Mínima	Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	368.62	4.97	332.2	402.51
Rendimento (DF x UT)	0.2569	0.01	0.2067	0.3062

O tempo médio previsto pela simulação foi de 368,62 horas com um IC em horas de (363.65; 373.75) dentro do qual se encontra o tempo de execução de 371,73 horas. O rendimento médio do período de execução do plano (0,2494) se encontra também dentro do IC (0,2469; 0,2669) fornecido pela simulação.

O rendimento médio da frota considerando o mês de maio é de 0,2520.

Usando este valor para fazer a previsão pela planilha obteve-se um tempo de execução previsto de 368,92 horas, valor próximo à média calculada pela simulação e bem próximo também do tempo de execução de 371,73 horas.

O resultado do cenário 7 é o reflexo de se ter utilizado nas previsões via planilha e simulação somente os dados do mês de maio, mês de execução do plano, situação que não ocorre na prática.

Para se avaliar a proximidade dos resultados do tempo médio de perfuração fornecido pela simulação e do tempo previsto através da planilha, simulou-se novo cenário para um plano com menos furos.

**Cenário 8 - Rendimento amostrado nas mesmas condições do cenário 4, porém com um plano de 300 furos**

Criou-se então o cenário 8 que tem as mesmas condições do cenário 4, só que para um plano de perfuração com 300 furos ao invés de 431 furos.

Para esta situação, o tempo de execução do plano calculado através de uma sequência de cálculos tais como os apresentados na Tabela 5.20 foi de 264,75 horas com um rendimento médio de 0,2393.

Os resultados da simulação baseados em 50 réplicas estão apresentados na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 - Resultado da simulação nas condições do cenário 4 com 300 furos ao invés de 431.

Variáveis	Média	Metade de	Média	Média
	Global	IC - 95%	Mínima	Máxima
Tempo de Perfuração (horas)	220.09	3.26	195.79	244.53
Rendimento (DF x UT)	0.2978	0.01	0.2235	0.3642

A previsão do tempo de execução do plano “via planilha” utilizando o rendimento médio do mês de abril (0,2933) foi de 220,61 horas praticamente o mesmo valor do tempo médio de execução previsto pela simulação.

Com os dados disponíveis e as premissas adotadas no modelo de simulação, os resultados indicam que os valores do tempo médio de execução previsto pela simulação e através da planilha, que utiliza o valor do rendimento médio do mês de abril, são próximos mesmo para diferentes quantidades de furos a serem realizados.

Observou-se o mesmo para um total de furos do plano iguais a 100 e a 531.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi desenvolvido um modelo de simulação que faz a previsão do tempo de execução de um plano de perfuração através do cálculo de produtividades efetivas tomando como base distribuições de probabilidades das disponibilidades físicas (DF), utilização (UT) ou rendimento diários médios de uma frota de perfuratrizes ou de cada perfuratriz separada.

Esse modelo foi aplicado a um estudo de caso (plano de perfuração) de uma empresa de mineração e os seus resultados foram comparados com o resultado da prática comum de previsão da empresa, tomando como base o tempo “real” gasto para se completar o plano proposto.

É importante ressaltar que as conclusões a que se chegou se aplicam, a princípio, especificamente ao contexto no qual está inserido o estudo de caso, cujos principais aspectos relacionados à previsão do tempo de execução do plano são apresentados a seguir.

- Os dados diários de DF, UT e rendimentos utilizados na previsão se referem aos valores médios da frota de seis perfuratrizes para os meses de abril e maio de 2018.
- A frota é constituída por cinco perfuratrizes idênticas responsáveis pela execução de furos de produção que trabalham em três turnos e por uma perfuratriz para executar furos de pré-corte que trabalha somente em um turno.
- O estudo foi baseado em um único plano de perfuração proposto para se iniciar em maio de 2018 do qual não se sabia o valor real do tempo gasto na sua execução.
- Foi considerado que todos os furos do plano eram de produção.
- Como não se sabia qual foi o tempo real de execução do plano, este foi estimado pelo número de furos executados diariamente por meio do cálculo da produtividade efetiva das perfuratrizes considerando os valores médios diários de DF e UT da frota desde o início até o instante em que todos os furos tivessem sido executados.
- Na previsão do tempo de execução através da simulação foi considerado que, em um mesmo dia, as produtividades efetivas de cada uma das três perfuratrizes usadas no plano poderiam ser diferentes tomando como base diferentes amostragens realizadas nas distribuições de probabilidades dos rendimentos diários médios da frota.
- A prática comum da empresa para a previsão do tempo de execução de um plano de perfuração estava baseada no cálculo em planilha das produtividades efetivas das perfuratrizes por meio dos valores médios de DF e UT do mês anterior ao da execução do plano.

Com base nessas considerações são apresentadas a seguir as principais conclusões referentes ao estudo.

Foi verificado que existe correlação entre os dados diários de DF e UT da frota nos meses de abril e maio, não sendo recomendado, portanto, o uso de valores separados de DF e UT nos cálculos das produtividades efetivas para as previsões de tempo de execução do plano de perfuração via planilha (prática da empresa) ou através de simulação. No caso da planilha deveria ser utilizado o valor médio do rendimento do mês de abril (produto entre as médias de DF e UT). Na simulação as produtividades efetivas deveriam ser calculadas a partir dos valores amostrados na distribuição dos rendimentos diários da frota, como foi considerado acima. A partir desta constatação, o valor médio do rendimento da frota do mês anterior a execução do plano foi utilizado na previsão via planilha dos tempos de perfuração do plano que foram comparados com as previsões realizadas através do modelo de simulação.

Os valores do tempo médio de execução do plano previsto através da simulação estiveram sempre muito próximos dos valores previstos via simulação. A vantagem no caso da simulação é que ela fornece um intervalo de confiança (IC) para a estimativa do tempo médio. Essa constatação foi verificada mesmo variando-se o número de furos do plano ou quando se utilizou os dados de rendimentos referentes a 30 dias da data de início do plano, ou os dados de maio ou de abril e maio juntos para se fazer as previsões.

Os valores dos tempos de perfuração previstos através da planilha e simulação ficaram bem abaixo do tempo real gasto na execução do plano estimado através dos rendimentos médios dos dias em que o plano era executado. O rendimento médio do mês de abril é bem superior à média dos rendimentos diários do período em que supostamente o plano foi executado. A distribuição dos rendimentos diários da frota no mês de abril não incorpora a variabilidade dos rendimentos diários durante o período de execução do plano.

A diferença entre os valores previstos do tempo de perfuração e os valores dos tempos reais de execução do plano diminui à medida que o rendimento médio utilizado na previsão através da planilha se aproxima da média dos rendimentos diários dos dias gastos na execução do plano, ou quando a distribuição dos rendimentos diários da frota usada na simulação consegue reproduzir mais os valores dos rendimentos dos dias em que o plano é realmente executado.

Recomenda-se que este estudo seja aplicado a outros planos de perfuração executados em diferentes épocas e com informações dos tempos reais de execução.

Na presença de mais informações relativas à DF diária de cada perfuratriz, recomenda-se fazer um estudo da variação diária das DF e UT, e conseqüentemente do rendimento, de cada perfuratriz. Na previsão, poder-se-ia utilizar, então, as informações individuais de cada perfuratriz selecionada para executar o plano ao invés da frota. Os resultados assim obtidos poderiam ser comparados com aqueles encontrados considerando os dados médios da frota.

Pelo menos, os dados referentes à perfuratriz de pré-corte deveriam ser considerados separadamente e utilizados somente na previsão do tempo de perfuração dos furos de pré-corte de um plano, já que se trata de perfuratriz diferente das demais, podendo apresentar comportamento diferente em relação à taxa de penetração, DF e UT quando comparado com as demais perfuratrizes, já que ela trabalha somente em um turno. O menor rendimento da perfuratriz de pré-corte, faz com que as produtividades efetivas das outras perfuratrizes sejam subestimadas na perfuração dos furos de produção, ao mesmo tempo que superestima o tempo de realização dos furos de pré-corte ao se utilizar dados médios da frota considerando as seis perfuratrizes.

Com informações referentes a outros meses e de outros planos poder-se-ia tentar estudar a influência na qualidade da previsão, do tamanho do período de dados antes do início da execução do plano que serviria de base para o cálculo dos rendimentos diários nas estimativas do tempo de execução do plano, ou seja, se seria de 15, 30, 45 ou mais dias.

O modelo de simulação utilizado é relativamente bem simples. A partir dele, outros modelos poderão ser construídos para considerar a execução de mais de um plano de perfuração ao mesmo tempo, inclusive podendo simular durante a execução dos mesmos um remanejamento de uma perfuratriz de um plano para o outro durante um certo tempo. Embora no modelo não tenha sido levado em conta o tempo adicional para o carregamento dos furos, desmonte e liberação da área, este tempo pode ser facilmente incluído no modelo.

Modelos mais elaborados poderiam ser construídos para integrar as operações de lavra ou carregamento de uma área já desmontada com as operações de perfuração, para se analisar a sincronicidade entre ambas as operações e a capacidade da frota dos equipamentos de perfuração de atender as necessidades de operação de carregamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, H.; DREBENSTEDT, C.; BADRODDIN, M.; MAGHAMINIK, A. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling. **International journal of mining science and technology**, [Amsterdam], v. 28, n. 6, p. 839-848, 2018.

AGYEI, G.; ASAMOAH I.; A selection of drill rigs using overall equipment efficient approach. **Journal of science and technology research**. [Gwagwalada], v. 1, n. 2, p. 41-52, 2019.

ALONSO, J. B. Comparación entre los distintos sistemas de perforación. **Revista de obras públicas**, Madrid, v. 135, n. 3270, p. 685 - 690, jul. 1988.

ALONSO, J. B.; GÓMEZ, J. C.; HERBERT, J. H. **Perforación y voladura de rocas en minería**. Universidad Politécnica de Madrid - Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas – Laboratório de tecnología Mineras, Madrid, 2013. 1 apostila.

AL-SHALAB, H. S. H.; **Reliability and life cycle cost modelling of mining drilling rigs**. 2014. Doctoral theseis, Division of Operation, Maintenance and Acoustics - Luleå University of Technology, [Luleå], 2014.

ÁLVAREZ, D. S.; IBÁÑEZ, D. L.; BERLANGA, F. A. Influencia de la perforación en los resultados de una voladura en banco y su impacto en los costes. **Ingeopres: Ingeniería civil, hidráulica, urbana, geológico-minera y medioambiental – Perforación y Voladuras**, Madrid, n. 206, p. 12-15, ago. 2011.

ANANI, A.; AWUAH-OFFEI, K. Incorporating cycle time dependency in truck-shovel modeling. *In: SME ANNUAL MEETING; CMA NATIONAL WESTERN MINING CONFERENCE: MINING: IT'S ABOUT THE PEOPLE*, 115, 2013, Denver. **Anais [...]**. Denver: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2013. p. 1-5.

ASTM. D7625-10. **Standard test for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method**. West Conshohocken, ASTM International. 2010. Designation: D7625-10, p. 1-6.

ATLAS COPCO DRILLING SOLUTIONS. **Workshop on technology development & mechanisations on mines**. New Delhi: AtlasCopco, 20th Jan. 2015. 1 fôlder.

BANKS J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. 5th edition, Upper Saddle River: Pearson Education, 2010.

BANKS J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. 5th edition (new international edition), Harlow: Pearson Education Limited, 2014.

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. 4th edition, [Hoboken]: Prentice Hall, 2004.



BASU, A. J.; BAAFI, E. Y.; Discret event simulation of mining systems: current practice in Australia. **International journal of surface mining: reclamation and environment**, [London], v.13, n. 2 p. 79-84, 1999.

BRADY, B.H.G.; BROWN, E.T. **Rock mechanics for underground mining**. 3rd edition, New York: Kluwer academic publishers, 2005.

BRULAND, A. **Hard rock tunnel boring**. Doctoral theses – Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. 2000.

CABRERO, D.G. **Evaluación de los parâmetros de perforación em barrenos y correlación con la geología del terreno**. 2016. Proyecto fin de grado (Grado em ingeniería de los recursos energéticos, combustibles y explosivos) – Escuela técnica superior de ingenieros de minas y energia, [s.l.], 2016.

CHINBAT, U.; TAKAKUWA, S. Using simulation analysis for mining Project risk management. *In: PROCEEDINGS OF THE 2009 WINTER SIMULATION CONFERENCE*, 41., 2009, Austin. **Anais [...]**. Austin: Winter Simulation Conference (WSC), 2009. p. 2612 - 2623.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**, 4. ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

COSTA, S. S. *et al.* **Estatística Básica**, Manaus: [s.n.], 2012.

DAHL, F.; BRULAND, A.; JAKOBSEN, P. D.; NILSEN, B.; GRØV, E.; Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. **Tunnelling and Underground Space Technology**. [Amsterdam], v.28, p. 150-158, 2012.

DESTRO, E. **Software para planejamento operacional de lavra, simulação e despacho de caminhões visando ao atendimento das metas de produção e qualidade da mistura de minérios**. 2015. Tese de doutorado (Engenharia de materiais) – Universidade federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

ELEVLI, S.; ELEVLI B.; Performance measurement of mining equipment by utilizing OEE. **Acta montanística slovacca**. [Kosice], v. 15, n. 2, p. 95-101, 2010.

ERSOY, A.; WALLER, M. D. Textural Characterization of Rocks. **Engineering geology**, [Amsterdam], v. 39, n. 3-4, p. 123-136, Jan. 1995.

FARIAS, A. A.; SOARES, J. F.; CÉZAR C. C. **Introdução à estatística**, 2. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2003.

FERNANDES, F. S. **Testes de ajuste a distribuições estatísticas e métodos para estimação dos parâmetros em análises de fiabilidade**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), 2013.

FISHMAN, G. S. **Discret-event simulation: modeling, programming, and analysis**. New York: Springer, 2001.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **CURSO DE ESTATÍSTICA**. 6. ed., São Paulo: Editora Atlas S.A., 2011.

FOURIE, H. Improvement in the overall efficiency of mining equipment: a case study. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION (MPES)*, 23rd, 2015, Johannesburg. **The journal of the southern african institute of mining and Metallurgy**. Johannesburg: Southern african institute of mining and metallurgy (SAIMM), 2016. p. 275-281.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Florianópolis: Visual Books Editora, 2001.

GOKHALE, B.V. **Rotary drilling and blasting in large surface mines**. Boca Raton, CRC Press, 2011.

HALL, R. A.; DANESHMEND, L. K. Reliability Modelling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methodologies. **International journal of surface mining, reclamation and environment**, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 139-155, 2003.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. Hoboken, Pearson Prentice Hall, 2004.

HOOD, M. C.; ROXBOROUGH, F. F. Rock breakage: mechanical. *In: HARTMAN H. L.* (Senior editor). **SME Mining Engineering Handbook**. 2nd edition. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 1992. v. 1, cap. 9.1, p. 680-721.

HOSEINIE, S. H.; ATAEL, M.; AGHABABAIE, A.; A laboratory study of rock properties affecting the penetration rate of pneumatic top hammer drills. **Journal of mining & environment**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 25-34, Apr. 2014.

HOSEINIE, S. H.; ATAEL, M.; OSANLOO, M. A new classification system for evaluating rock penetrability. **International journal of rock mechanics and mining sciences**, [Amsterdam], v. 46, n. 8, p. 1329 – 1340, 2009.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. **Open Pit Mine Planning & Design**. 3rd Edition, Boca Raton: CRC Press, 2013.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; CARCEDO, F. J. A. **Drilling and blasting of rocks**. London, Taylor & Francis Group, 2006.

KABA, F. A.; TEMENG, V. A.; ESHUN, P. A. Application of discrete event simulation in mine production forecast. **Ghana mining journal**. [Tarkwa], v. 16, n. 1, p. 40-48. 2016.

KABA, F. A.; TEMENG, V. A.; ESHUN, P. A. Prediction of mining production using arena simulation. *In: UMaT BIENNIAL INTERNATIONAL MINING AND MINERAL CONFERENCE*, 3rd, Tarkwa, 2014. **Bienais** [...]. Tarkwa: University of mines and technology (UMaT), 2014. p.169-177.

KAHRAMAN, S.; BALCI, C.; YAZICI, S.; BILGIN, N. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index. **International journal of rock mechanics and mining sciences**, [Amsterdam], v. 37, n. 5, p. 729-743, 2000.

KANSAKE, B. A.; SUGLO, R. S. Impact of availability and utilization of drill rigs on production at kanjole minerals limited. **International journal of science, environment and technology**, [Índia], v. 4, n. 6, p. 1524-1537, 2015.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation with arena**. 2nd edition, Boston, Mc Graw Hill, 2001.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; ZUPICK, N. B. **Simulation with arena**. 6th edition, New York, Mc Graw Hill education, 2015.

KULLH, A. **Efficiency and productivity improvements at a platinum concentrator: management tool to measure and monitor OEE and process pain**. 2013. Master of Science Thesis in Quality and Operations Management, Mechanical Engineering - Department of Product and Production Development, Chalmers University of Technology, Suécia, 2013.

LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. 5th edition, New York, Mc Graw Hill education, 2015.

LIMA, R. Z.; SOUZA, A. D. C.; ARAÚJO, L. C. **Manual do Arena 9.0**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), [2006?]. 1 apostila.

MAGALHÃES, M. N; LIMA, A. C. P. **Noções de probabilidade e estatística**. 7. ed., São Paulo: Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2015.

MONTEIRO, M. D.; ROCHA, H. C. A abrasividade de rochas nos estudos do metrô de São Paulo: ensaios, classificações, influência do grau de alteração e considerações sobre o consumo de ferramentas de corte em escavações subterrâneas. **Revista brasileira de geologia de engenharia e ambiental**, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 71-86, 2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER G. C.: **Applied statistics and probability for engineers**. 3rd edition. [Hoboken]: Wiley, 2003.

PAONE, J.; MADSON, D.; BRUCE, W. E.; **Drillability studies – Laboratory percussive drilling, Washington, U. S.** Dept. of the Interior - Bureau of Mines, [1969]. Disponível em: <https://play.google.com/books/reader?id=C1UKhvwSY7AC&hl=en&pg=GBS.PP3>, Acesso em: 16 Ago. 2021.

PARAGON. **Treinamento: introdução à simulação com Arena**. 3. ed., São Paulo, Paragon Decision Science, [2006?]. 1 apostila.

PARK, J. **Estimation of rock cominution characteristics by using drill penetration rates**. 2016. Marter of science (with a major in mining, geological, and geophysical engineering) – The University of Arizona, [Tucson], 2016.

PERSSON, *et al.* **Rock Blasting and Explosives Engineering**, CRC Press: Boca Raton, 1994.

PIAZZETTA, G. R.; FIGUEIRA I. F. R.; MUNCH D. *et al.* **Ensaio de abrasividade em rocha como dsuporte para previsão do consumo das ferramentas de perfuração – Revisão do método CERCHAR e considerações iniciais**, 2017.

PIDD, M. **Computer simulation in management science**. 5th edition, Chichester: Wiley, 2004.

PINTO, L. R. **Curso de pesquisa operacional aplicada à mineração: programação matemática, teoria das filas e simulação**, Universidade federal de Ouro Preto – Escola de minas – Departamento de engenharia de minas, Ouro Preto, 2002. 1 apostila.

POP-ANDONOV, G.; MIRAKOVSKI, D.; DESPOTOV, Z. Simulation modeling and analyzing in underground haulage systems with arena simulation software. 2012. Disponível em: <https://eprints.ugd.edu.mk/589/2/za%20AutoMoto%20%2C%20PDF.pdf>. Acesso em: 20 Ago. 2021.

PRADO, D. **Usando o arena na simulação**. 4. ed., Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2010.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**, 4. ed., Porto Alegre: Bookman, 2006.

RAJ, M. G.; VARDHAN, H.; RAO, Y. V. Production optimization using simulation models in mines: a critical review. **International journal of operational research**, [Genova], Inderscience publishers, v. 6, n. 3, p. 330 - 359, 2009.

RAMOS NETO, A. N.; PINTO, L. R. *Template* do programa Arena para simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto. **Revista escola de minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 1, p. 65-69, 2004.

REYES, R.; RYZYM, I.; RANA, P. S.; MOLGAARD, J.; BUTT, S. D. Cuttings Analysis for Rotary Drilling Penetration Mechanisms and Performance Evaluation. *In: US ROCK MECHANICS/ GEOMECHANICS SYMPOSIUM*, 49th, 2015, San Francisco. **Anais [...]**, 2015. San Francisco: American Rock Mechanics Association – ARMA, 2015.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação: Terraplenagem e escavação de rocha**, 3. ed. São Paulo: Pini, 2007.

ROSSETI, M. D. **Simulation modeling and arena**<sup>®</sup>. 2nd edition. Hoboken: Wiley, 2016.

SAEIDI, O.; TORABI, S. R.; ATAEI, M.; ROSTAMI, J. A stochastic penetration rate model for rotary drilling in surface mines. **International journal of rock mechanics and mining Sciences**, [Amsterdam], v. 68, p. 55-65, 2014.

SAKURADA, N. E MIYAKE, D. I. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços, **Gest. Prod.**, São Carlos, v.16, n. 1, p. 25-43, 2009.

SCHEAFFER, R.L. **Probability and Statistics for Engineers**. 5. ed., Boston, Richard Stratton, 2010.

SGARBI, G. N. C. Rochas Sedimentares *In: SGARBI G. N. C. (Organizador) Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Parte 4

SGARBI, P. B. A. Rochas magmáticas *In: SGARBI G. N. C. (Organizador) Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Parte 3

- SILVA, V. C. **Desmonte de rochas**. São Paulo: Oficina de Textos. 2019. *E-book*.
- SILVA, V.C. **Curso MIN 112: Operações mineiras**. [Ouro Preto]: Departamento de engenharia de minas – Escola de minas de UFOP. 2014.
- SOUZA, T. F. **A simulação a eventos discretos como ferramenta de apoio a tomada de decisão em empresas do ramo de mineração**: aplicação em uma unidade da Yamana Gold. Dissertação de mestrado (em engenharia mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- STURGUL, J. R. **Mine design**: examples using simulation. Littleton: Society for mining, metallurgy, and exploration (SME), 2000.
- SU, O. Performance Evaluation of Button Bits in Coal Measure Rocks by Using Multiple Regression Analyses. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [s.l.], v. 49, p. 541-553, Feb. 2016.
- SWEIGARD, R. J. Materials handling: loading and haulage. *In*: HARTMAN H. L. (Senior editor) **SME Mining Engineering Handbook**. 2nd edition. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 1992. v. 1, cap. 9.3, p. 761-782.
- TANDANAND, S.; UNGER, H. F. **Drillability determination – a drillability index for percussion drills**. Washington: U. S. Bureau of mines, 1975.
- TOUWEN, F. H.; JOUGHIN, N. C. The simulation of underground stoping and transport operation in gold mining. p. 231-236. [1972?]. Disponível em: <http://saimm.org.za/Conferences/Apcom72/231-Touwen.pdf>. Acesso em: 18 Ago. 2021.
- TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**: atualização da tecnologia. 11. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- YENICE, H. Determination of drilling rate index based on rock strength using regression analysis. **Anais da academia brasileira de ciências**, Rio de Janeiro, v. 91, n. 3, p. 1-10, 2019.
- ZHANG, Z. **Rock Fracture and Blastings**: theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 2016.