6 Resultados da simulação

Neste capítulo, são mostrados os resultados do modelo e as análises realizadas com o modelo desenvolvido visando avaliar a capacidade produtiva do sistema e indicadores de desempenhos dos equipamentos. A utilização da pilha pulmão, a capacidade de descarga dos britadores, turnos de trabalho, atrasos operacionais devido ao abastecimento de combustível ou detonação, assim como programação de paradas programadas e não programadas são situações operacionais que afetam os resultados e foram modeladas.

6.1. Análise da capacidade produtiva do sistema

O nível de detalhamento do modelo permite a análise da quantidade de material minério e material estéril movimentado até os diferentes pontos de descarga e, assim, a capacidade produtiva da mina com a configuração de equipamentos considerados no cenário base.

A quantidade de material movimentado foi avaliada pela simulação de um mês de operação. Os resultados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Movimentação total de material mensal na mina

Movimentação total de material	
Movimentação Total (MT) (kt)	4.900,55
ROM (kt)	1.585,38
Mina-Britagem (kt)	1.280,95
Mina-Pilha Pulmão (kt)	304,42
Alimentação Usina (kt)	1.585,19
Movimentações (OM + MI) (kt)	577,22
Estéril (E) (kt)	2.737,96
REM (adm)	1,73

Fonte: Elaborado pela Autora

- Movimentação Total de ROM (MMR): será considerado como ROM todo tipo de minério tirado da mina e levado para o britador ou depósito de minério (pilha pulmão);

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

- Movimentação Total de Estéril (MME): este indicador mede a massa total de material estéril retirado das frentes e levado para as pilhas de material estéril;

- Relação Estéril/ Minério (%): permitirá analisar a relação entre a massa total de material minério e material estéril da mina.

6.2. Planejamento de lavra

A construção do plano de lavra, como já mencionado anteriormente, é um processo que envolve uma quantidade significativa de variáveis e regras operacionais. Muitas vezes este processo é realizado de forma manual, baseando-se na experiência dos trabalhadores e técnicos da área.

O modelo desenvolvido tem como objetivo ser útil na confecção do plano de lavra, possibilitando que a área de planejamento melhore a formulação do plano para um determinado mês, apresentando as diretrizes necessárias para garantir a movimentação de material a ser extraído e promover o desenvolvimento da mina com um eficiente uso dos equipamentos.

O modelo pode ser utilizado como ferramenta para auxílio a decisões no planejamento de lavra de curto prazo, com a determinação da quantidade de material movimentado e avaliação dos indicadores dos equipamentos a serem colocados em funcionamento, conforme observado nas Tabelas 17, 18, 19 e 20. A descrição desses indicadores de desempenho encontra-se no Apêndice II.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tabela 17: Indicadores das pás carregadeiras

	Distribuição Horas				Indicadores			
|Equipamentos	HC	HT	HM	HI	DF	UT	RO	PH(T/H)
Pá carregadeira 1	720	460,42	237,77	21,79	67%	95%	64%	1.775,00
Pá carregadeira 2	720	482,24	215,56	22,18	70%	96%	67%	1.809,28
Média	**720**	**471,33**	**226,66**	**21,98**	**69%**	**96%**	**0,65**	**1.792,14**

Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 18: Indicadores das escavadeiras

	Distribuição horas				Indicadores			
Equipamentos	HC	HT	HM	HI	DF	UT	RO	PH(T/H)
Escavadeira 1	720	519,52	176,97	23,49	75%	96%	72%	2.686,03
Escavadeira 2	720	557,30	136,75	25,85	81%	96%	77%	2.713,29
Média	**720**	**538,41**	**156,86**	**24,67**	**78%**	**96%**	**0,75**	**2.699,66**

Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 19: Indicadores do britador

	Distribuição horas				Indicadores			
Equipamentos	HC	HT	HM	HI	DF	UT	RO	PH
Britador	720	623,68	81,89	12,46	88,63%	97,74%	86,62%	4.040,01
Média	**720**	**623,68**	**81,89**	**12,46**	**0,94**	**0,98**	**0,87**	**4.040,01**

Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 20: Indicadores dos caminhões

	Indicadores dos equipamentos de transporte																	
	Mina	Equipamentos	Distribuição Horas			Índices			Indicadores						Velocidade			PH
		HC	HT	HM	HI	DF	UT	RO	KmCH/Vz	Fila Brit	Fila Esc	Carreg	Basculo	Carga Média	cheio	vazio	média	Produção (t)
Caminhões	1	720	507,40	177,18	31,04	75%	93%	70%	0,26	1,81	4,51	3,72	1,65	0,00	17,28	14,00	15,64	432,92
	2	720	600,66	81,65	36,76	89%	94%	83%	0,29	2,81	4,20	3,71	1,65	0,00	17,24	14,00	15,62	430,18
	3	720	498,88	178,31	31,24	75%	92%	69%	0,29	1,04	4,59	3,70	1,66	0,00	17,00	14,00	15,50	429,51
	4	720	533,46	148,10	31,27	79%	93%	74%	0,33	2,05	7,97	3,73	1,64	0,00	16,44	14,00	15,22	391,70
	5	720	548,99	138,34	32,59	81%	94%	76%	0,30	1,75	8,24	3,67	1,64	0,00	15,74	14,00	14,87	387,83
	6	720	556,25	125,07	32,78	83%	93%	77%	0,30	3,42	5,14	3,71	1,66	0,00	17,78	14,00	15,89	413,53
	7	720	568,48	100,76	37,34	86%	92%	79%	0,29	3,10	4,48	3,72	1,66	0,00	15,98	14,00	14,99	424,02
	8	720	610,11	73,47	36,22	90%	94%	85%	0,28	0,40	6,17	3,70	1,65	0,00	16,65	14,00	15,32	411,87
	9	720	524,22	156,17	28,90	78%	93%	73%	0,34	3,45	8,44	3,69	1,66	0,00	16,98	14,00	15,49	371,71
	10	720	483,82	198,56	31,30	72%	93%	67%	0,29	0,92	4,87	3,68	1,64	0,00	14,67	14,00	14,34	429,99
	11	720	510,75	167,45	31,93	77%	92%	71%	0,29	1,47	8,78	3,69	1,63	0,00	17,68	14,00	15,84	385,33
	12	720	529,82	150,85	31,28	79%	93%	74%	0,34	2,65	6,60	3,72	1,64	0,00	16,87	14,00	15,44	395,86
	13	720	599,95	77,87	36,50	89%	93%	83%	0,29	2,19	5,23	3,73	1,66	0,00	17,70	14,00	15,85	420,33
	14	720	630,95	52,46	36,56	93%	95%	88%	0,27	2,67	6,45	3,71	1,65	0,00	18,22	14,00	16,11	400,15
	15	720	471,76	198,58	31,44	72%	90%	66%	0,28	2,85	5,34	3,67	1,64	0,00	15,93	14,00	14,97	411,53
	16	720	558,77	115,42	33,79	84%	92%	78%	0,31	2,46	6,61	3,75	1,65	0,00	18,49	14,00	16,25	401,37
	17	720	497,20	167,47	32,78	77%	90%	69%	0,27	1,68	3,58	3,72	1,64	0,00	17,06	14,00	15,53	436,18
	18	720	595,92	71,62	38,04	90%	92%	83%	0,29	0,70	4,17	3,71	1,65	0,00	17,07	14,00	15,54	436,02
	19	720	528,34	155,70	32,50	78%	94%	73%	0,28	2,01	5,98	3,70	1,64	0,00	17,02	14,00	15,51	401,58
	20	720	456,91	235,60	27,44	67%	94%	63%	0,29	2,72	9,28	3,71	1,64	0,00	16,56	14,00	15,28	371,43
	21	720	589,24	87,83	36,07	88%	93%	82%	0,31	1,01	5,54	3,69	1,66	0,00	16,82	14,00	15,41	417,23
	22	720	560,42	125,40	34,14	83%	94%	78%	0,28	1,34	7,10	3,68	1,65	0,00	15,82	14,00	14,91	404,45
	Média	720	**520,19**	**135,63**	**33,27**	**0,82**	**0,89**	**0,72**	**0,29**	**2,02**	**6,06**	**3,70**	**1,65**	**0,00**	**16,86**	**14,00**	**15,43**	**409,31**

Fonte: Elaborado pela Autora

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

6.3. Análise da frota de equipamentos

O problema de dimensionamento da frota foi modelado conforme os dados e o modelo computacional apresentado no capítulo 4.

Para tanto, adotou-se uma frota homogênea com 22 caminhões chegando aos pontos de carregamento em tempo regido pela distribuição exponencial, com média de 5 minutos e tempo de carregamento caracterizado por uma distribuição erlang de 1,5+ ERLA(0,87;3) minutos para as pás carregadeiras e uma distribuição exponencial de 2+EXPO(0,798) para as escavadeiras. Já o processo de descarregamento foi definido com uma distribuição normal com tempo médio de 1,65 com desvio padrão de 0,117 minutos; os tempos de deslocamento dos equipamentos de transporte para a análise de dimensionamento da frota de equipamentos será considerado como uma distribuição normal, o deslocamento vazio dos caminhões seguirá uma distribuição normal de 6,5 minutos com um desvio padrão de 0,65 e o tempo de deslocamento cheio seguirá uma distribuição normal de 7,5 minutos com um desvio padrão de 0,75.

Foram realizadas 30 replicações com horizonte de um turno de trabalho de 8 horas a fim de comparar os resultados obtidos com o modelo de reparação de máquina.

Inicialmente foram configurados 3 cenários. Foi definida a utilização de 2 equipamentos de carga para o cenário 1, aumentando esse número para 3 no cenário 2 e para 4 no cenário 3.

A fim de avaliar a frota de caminhões, foram analisados os cenários 1, 2 e 3 variando o número de caminhões de 1 a 22 caminhões. A Figura 20 e a Figura 21 apresentam a produção (t/h) para os equipamentos de carga e transporte para cada cenário.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

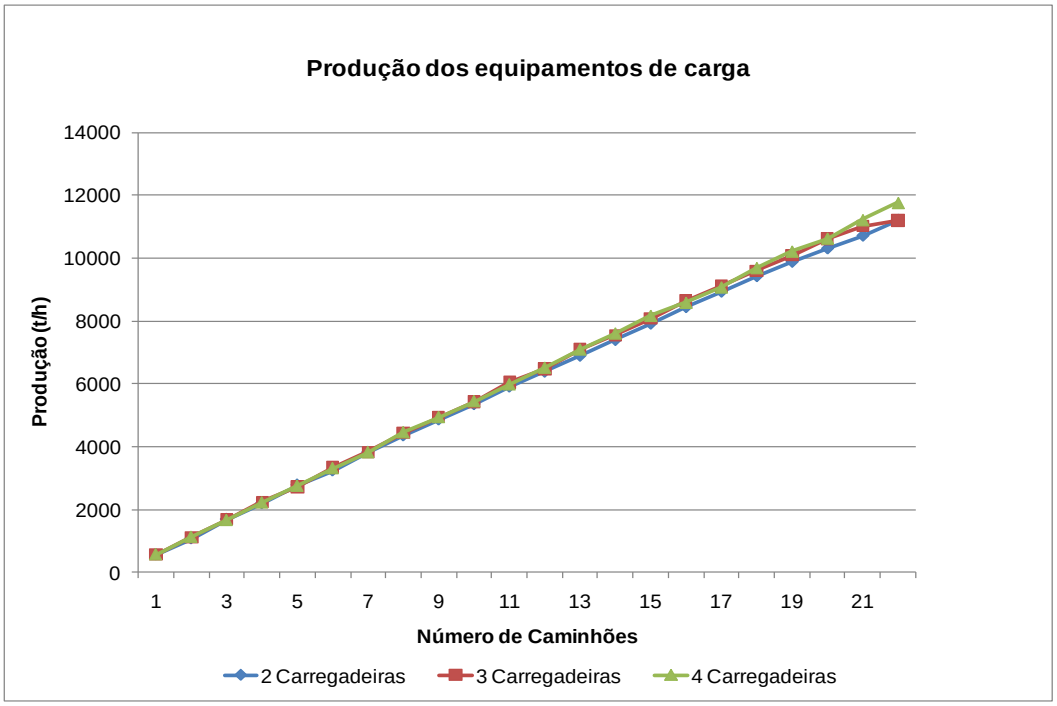

Figura 20: Produção (t/h) por carregadeira para cada um dos cenários simulados
Fonte: Elaborado pela Autora

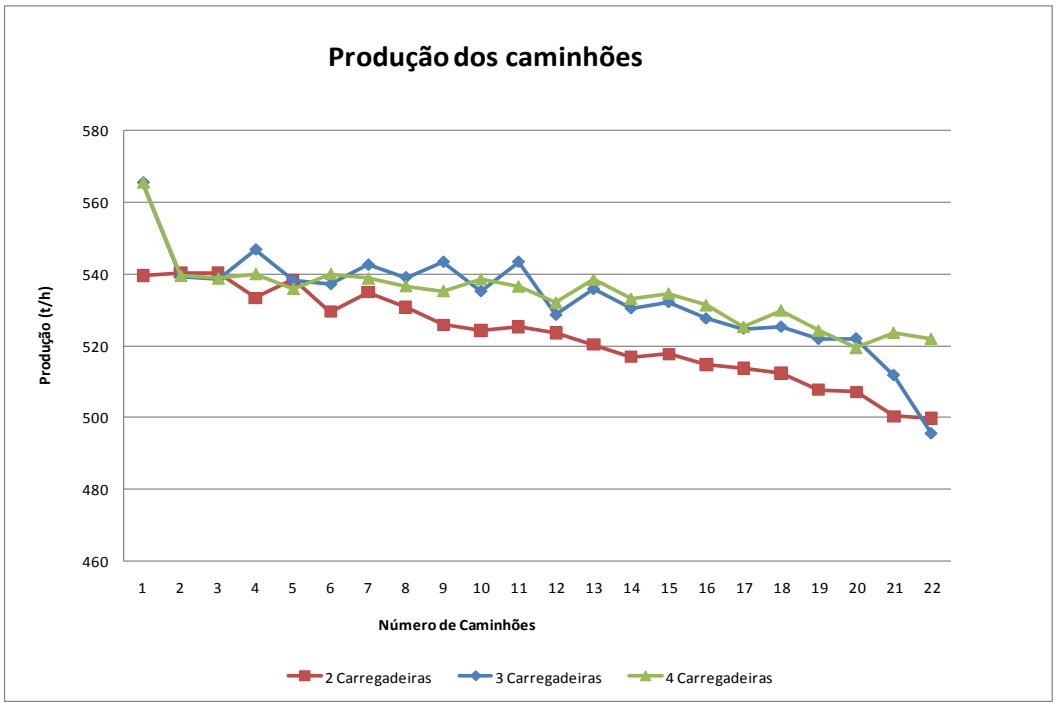

Figura 21: Produção (t/h) por caminhão, para cada um dos cenários simulados
Fonte: Elaborado pela Autora

Os resultados apresentados na Figura 20 mostram que, ao aumentar o número de caminhões nos cenários 1, 2 e 3, a produção dos equipamentos de carga também se incrementa. Ao contrário, com os equipamentos de transporte ao aumentar o número de caminhões em cada um dos cenários a produção em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

toneladas por hora dos caminhões diminui, como mostra a Figura 21. Isto porque à medida que se aumenta caminhões no sistema eles começam a formar fila de espera dos pontos de carregamento o que ocasiona uma diminuição da produção por caminhão.

Ao avaliar a produção (t/h) dos equipamentos de carga, pode-se observar no cenário 1 um aumento na produção dos equipamentos de carga proporcional ao aumento do número de caminhões até 19. Nota-se, porém, uma evolução pouco expressiva quando o dimensionamento varia de 19 para 22 caminhões. De forma similar, para o cenário 2 existe uma evolução proporcional da produção dos equipamentos de transporte quando se varia de 1 a 20 caminhões, mas a produção dos equipamentos de carga permanece constante quando se passou de 20 a 22 caminhões. Para o cenário 3 vemos que não se chega a uma saturação da produção dos equipamentos de carga.

Para avaliar a eficiência do sistema em função do número de equipamentos de carga e transporte, foram analisadas as seguintes medidas de desempenho: movimentação total de material, taxa de utilização dos equipamentos de carga, tempo médio de espera e o número de caminhões em fila nos pontos de carregamento e descarregamento para cada um dos cenários descritos anteriormente.

6.3.1. Cenário 1

Ao avaliar a movimentação total de material minério e estéril, foi observada uma evolução na movimentação, Figura 22, quando se faz uso de uma pá carregadeira e uma escavadeira.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

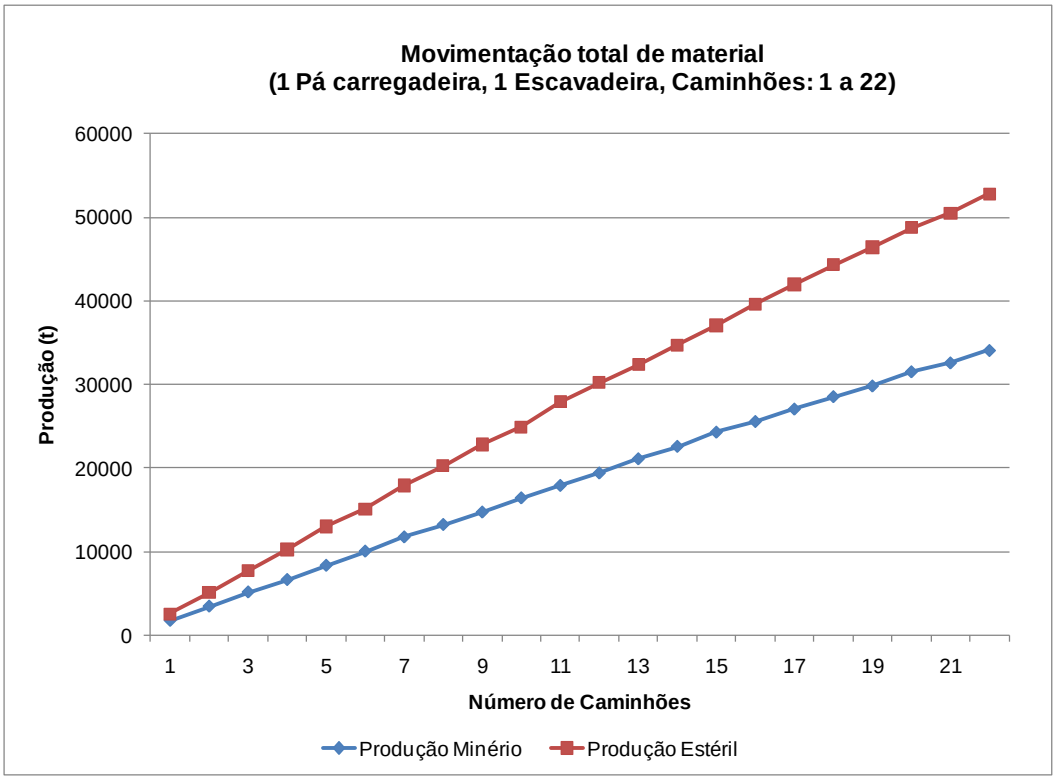

Figura 22: Movimentação total de material – Cenário 1
Fonte: Elaborado pela Autora

Assim também pode-se ver que a movimentação de material estéril é maior que a movimentação de minério, porque, como foi dito na descrição do sistema, as escavadeiras estarão alocadas nas frentes de lavra de material estéril e as pás carregadeiras nas frentes de lavra de material minério. Como as escavadeiras possuem um menor tempo de carga, a movimentação de material estéril será maior do que a quantidade de material minério a ser carregado pelas pás carregadeiras.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

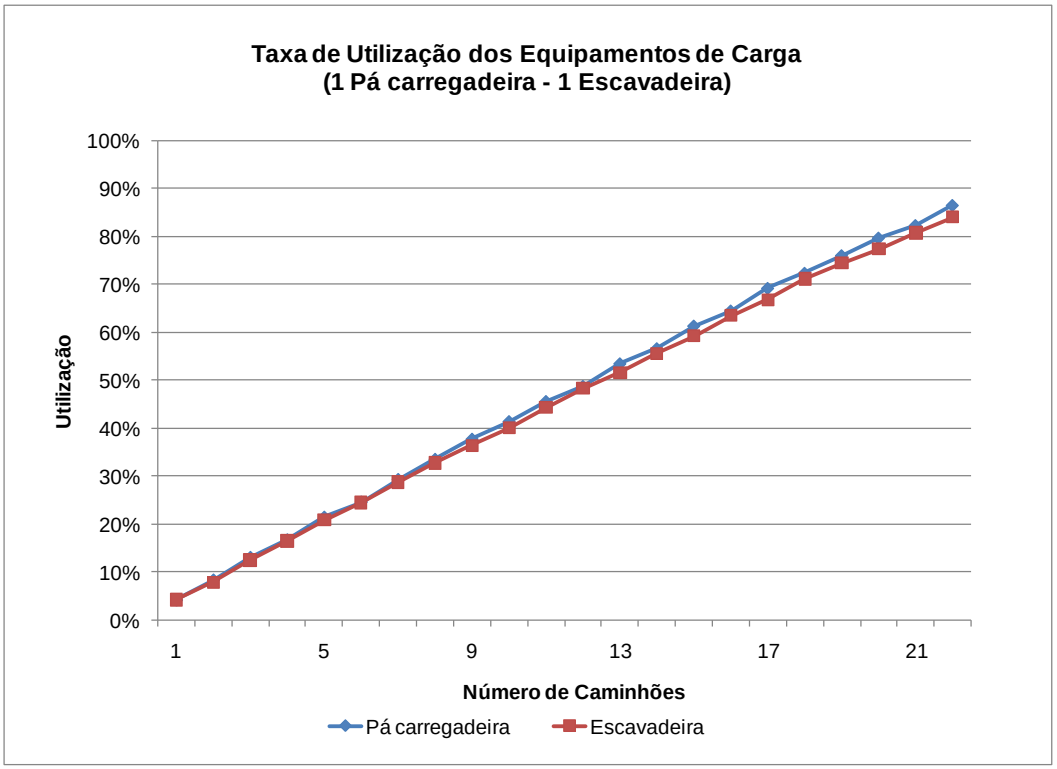

Figura 23: Taxa de utilização das carregadeiras – Cenário 1
Fonte: Elaborado pela Autora

Como o cenário a ser analisado considera apenas a utilização de dois equipamentos de carga, uma escavadeira e uma pá carregadeira, a taxa de utilização desses equipamentos cresce ao aumentar o número de caminhões no sistema como se mostra na Figura 23, variando de 4% a 87% para a pá carregadeira e de 4% a 84% para a escavadeira. O acrescimento da utilização dos equipamentos de carga de forma linear indica claramemte que, mesmo para 22 caminhões esses equipamentos não constituem gargalos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

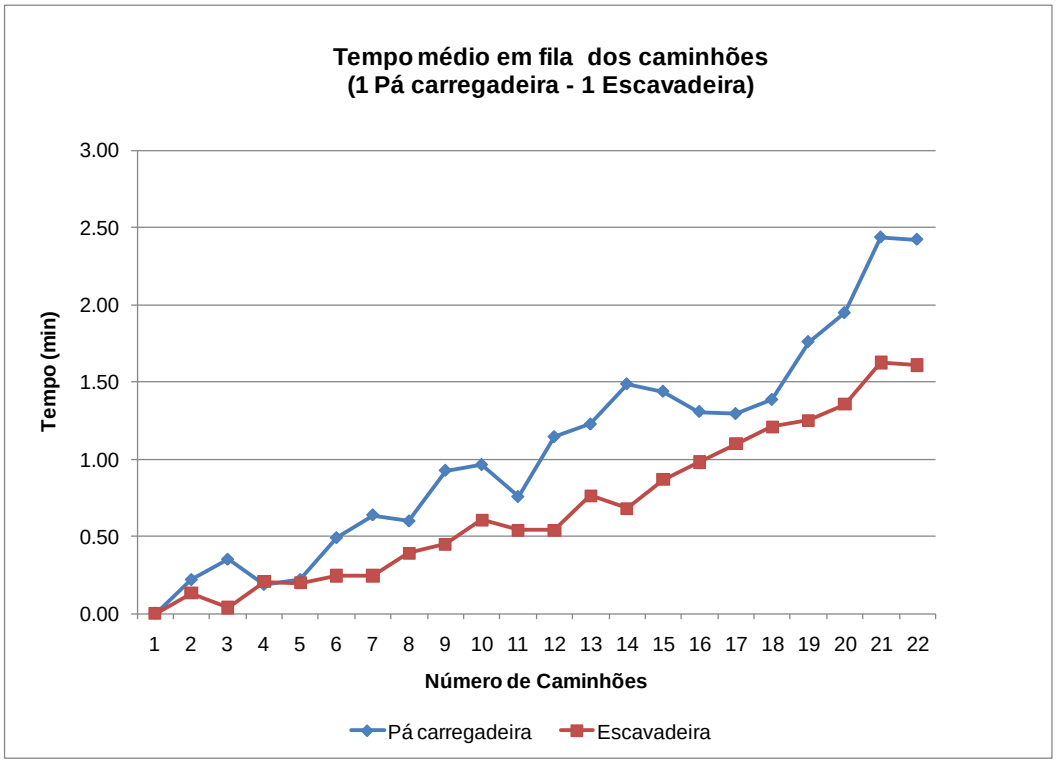

Figura 24: Tempo médio em fila dos caminhões nas carregadeiras – Cenário 1
Fonte: Elaborado pela Autora

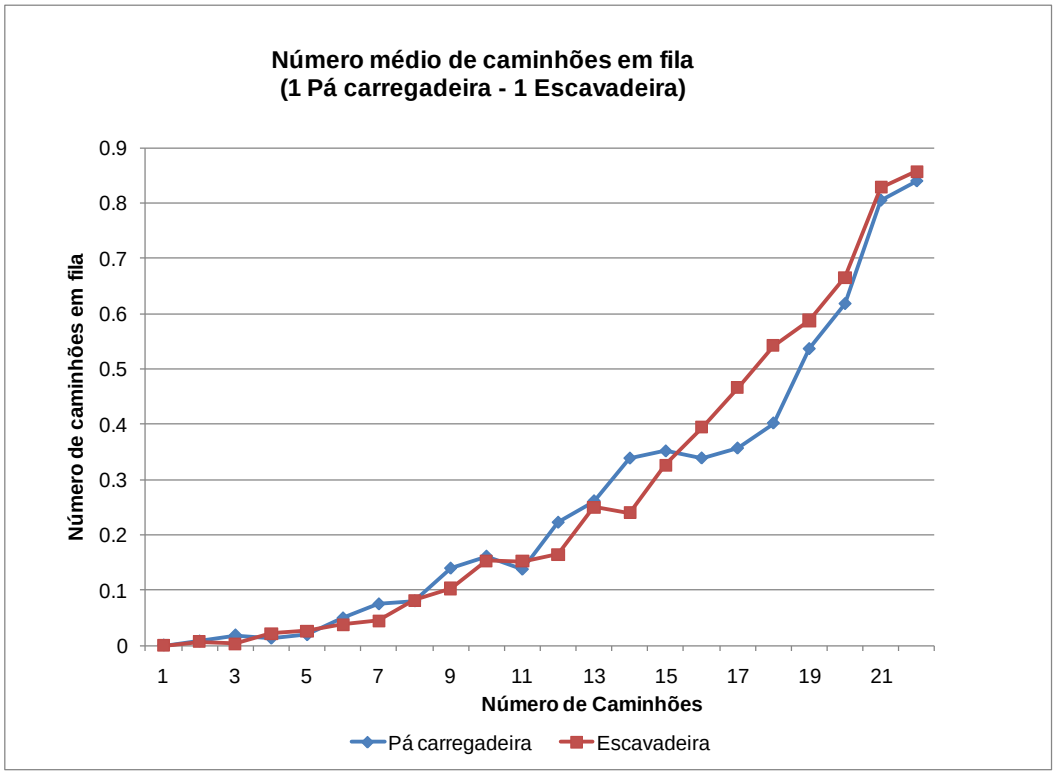

Figura 25: Número médio em fila dos caminhões nas carregadeiras – Cenário 1
Fonte: Elaborado pela Autora

Os resultados apresentados nas Figuras 24 e 25 mostram o tempo médio de espera e o número de equipamentos em fila na escavadeira e na pá carregadeira. Esses dois indicadores estão diretamente relacionados ao tempo de carga de cada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

tipo de equipamento de carga, portanto o tempo em que o caminhão permanece em fila é maior nas pás carregadeiras que nas escavadeiras, variando de 0,2 a 2,4 minutos nas pás carregadeiras e de 0,1 a 1,6 minutos nas escavadeiras. Outro ponto importante a ser considerado é que, quanto maior o tempo de espera dos caminhões nos pontos de carregamento, menos é a produção dos caminhões (Figura 26).

Dessa forma, pode-se concluir que o uso de 22 caminhões quando se faz uso de 1 escavadeira e 1 pá carregadeira, resulta ser um valor aceitável dado que o tempo máximo de espera dos caminhões seria de 2,4 minutos aproximadamente, que é um valor aceitável numa mina.

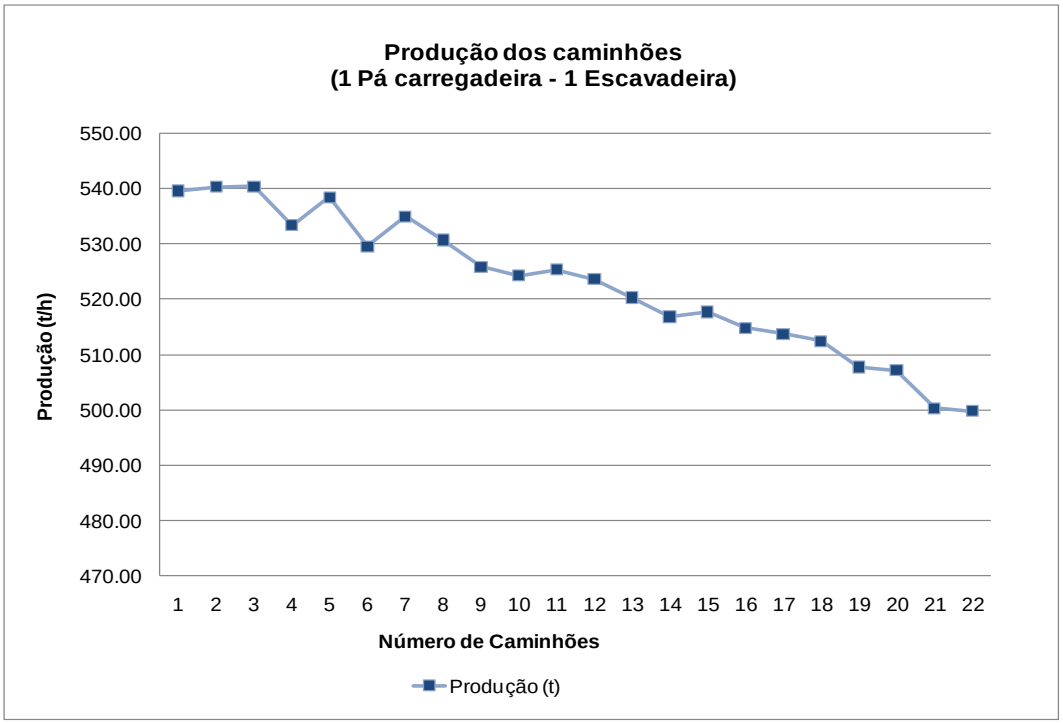

Figura 26: Produção dos caminhões – Cenário 1
Fonte: Elaborado pela Autora

6.3.2. Cenário 2

Este cenário considera a utilização de 2 pás carregadeiras e uma escavadeira. Como mostra a Figura 27, neste cenário a produção de minério é maior do que a produção de estéril porque se têm duas frentes sendo lavradas com duas pás carregadeiras e só uma frente lavrada por uma escavadeira.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

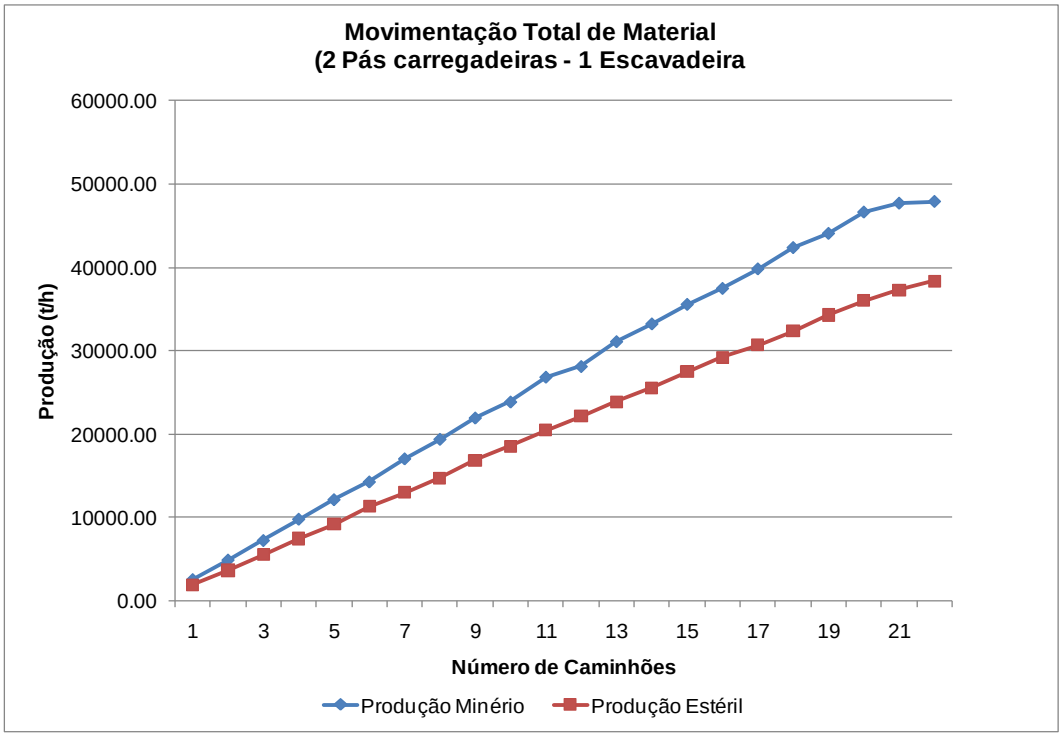

Figura 27: Movimentação total de material – Cenário 2

Fonte: Elaborado pela Autora

Assim, também pode-se observar uma evolução na movimentação de material quando se varia o número de caminhões de 1 para 20.

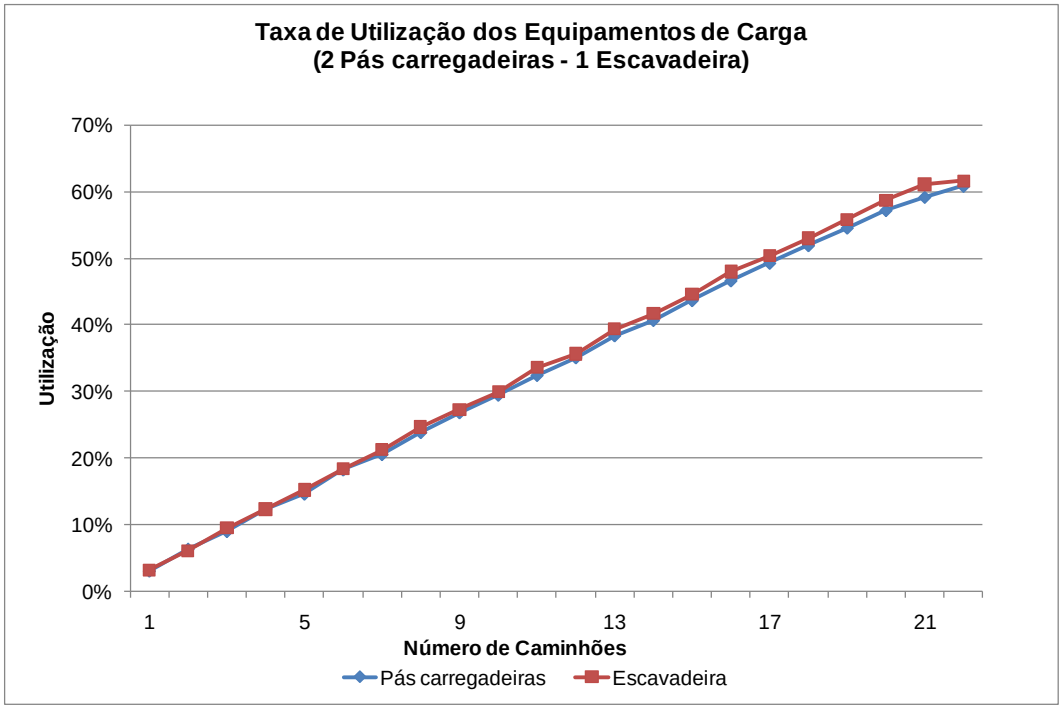

Figura 28: Taxa de utilização das carregadeiras – Cenário 2

Fonte: Elaborado pela Autora

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

A taxa de utilização desses três equipamentos de carga cresce ao aumentar o número de caminhões no sistema como se mostra na Figura 28, variando quase proporcionalmente de 3% para 61% nas pás carregadeiras e de 3% para 62% na escavadeira. Apenas quando se passa a 22 caminhões o crescimento parece saturar.

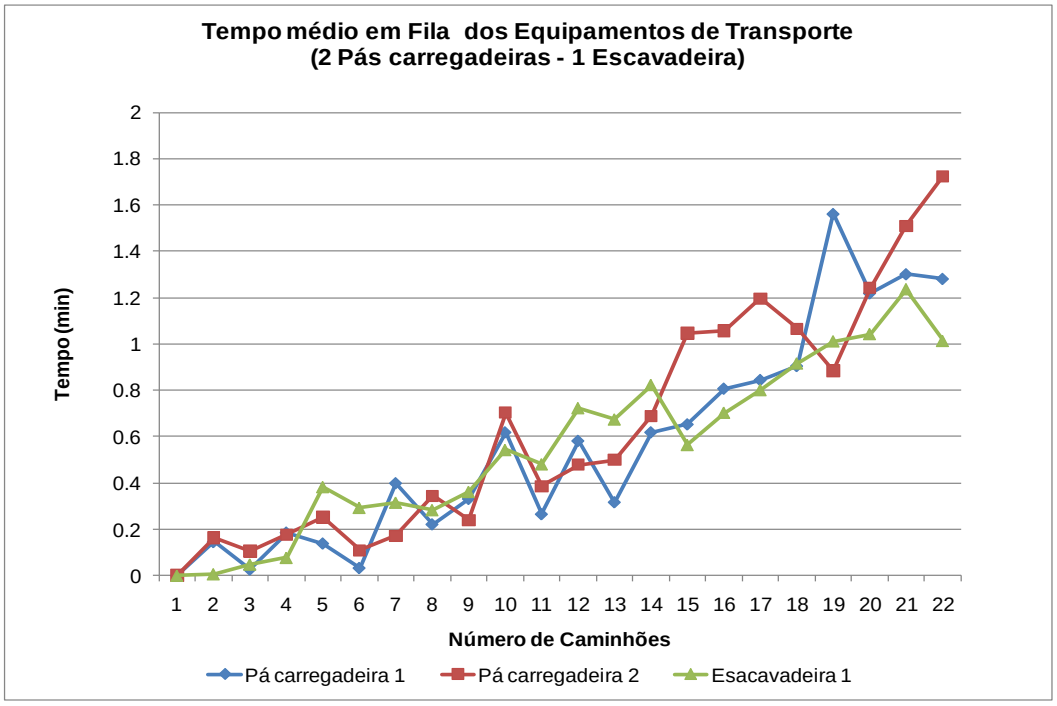

Figura 29: Tempo médio em fila dos caminhões nas carregadeiras – Cenário 2
Fonte: Elaborado pela Autora

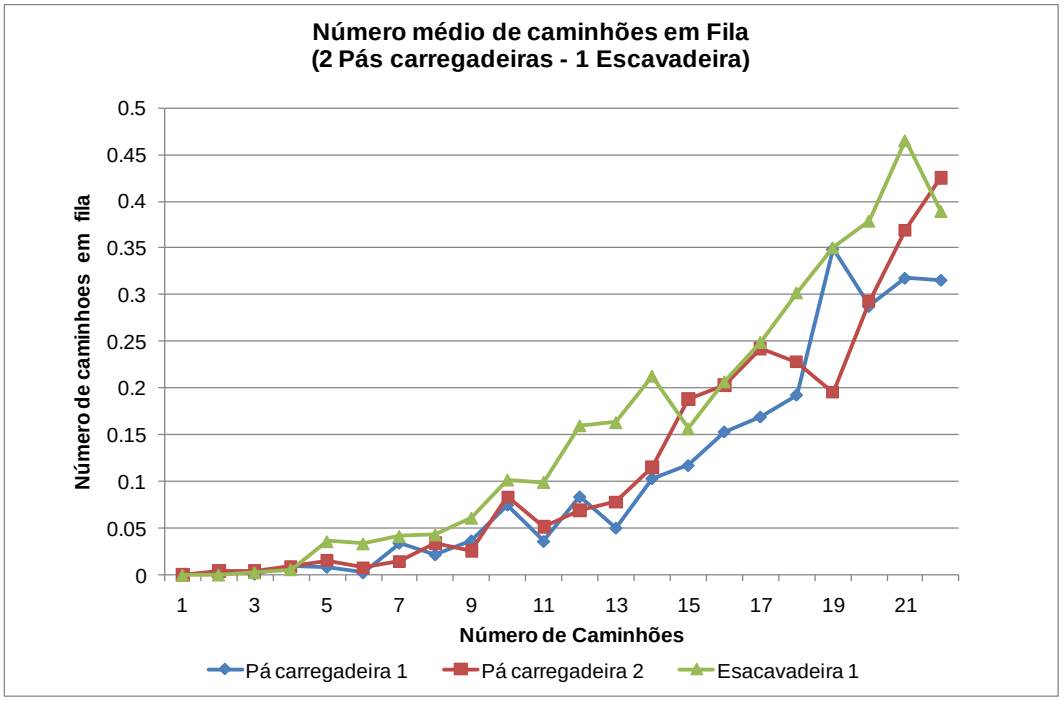

Figura 30: Número médio em fila dos caminhões nas carregadeiras – Cenário 2
Fonte: Elaborado pela Autora

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

O tempo de permanência em fila nas pás carregadeiras, assim como o número de caminhões em fila é maior para as escavadeiras apesar de o sistema considerar a utilização de duas pás carregadeiras e 1 escavadeira, como indicam as Figuras 29 e 30. No presente cenário, o tempo máximo de espera em fila dos equipamentos de transporte nas pás carregadeiras é 1,7 minutos e de 1,01 minutos nas escavadeiras. Para esse cenário pode-se concluir que o 22 caminhões parece ser um valor adequado para o sistema com três carregadeiras, dado que o tempo de espera em fila e o número de caminhões em fila tem valores muito baixos.

6.3.3. Cenário 3

Em relação ao cenário 2, o acréscimo de uma escavadeira tem o efeito de aumentar substancialmente a remoção de estéril às custas de uma drástica redução na produção de minério.

No presente cenário, tem se a mesma quantidade de material minério e estéril movimentado como se mostra na Figura 31.

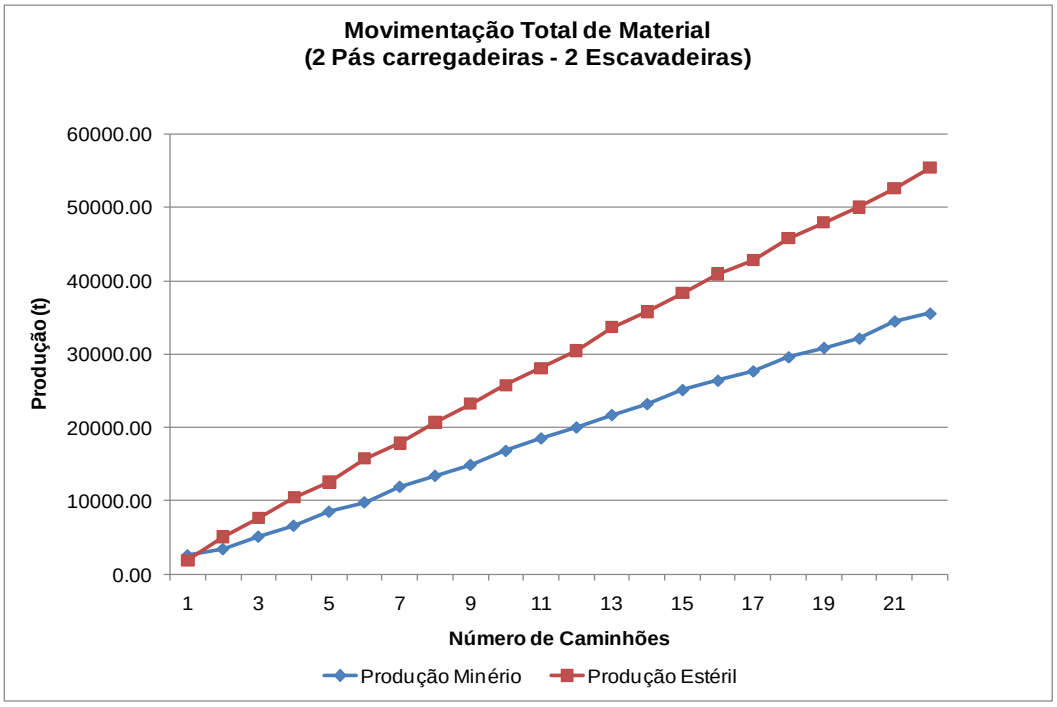

Figura 31: Movimentação total de material – Cenário 3

Fonte: Elaborado pela Autora

Pode-se observar uma evolução proporcional na movimentação de material minério e estéril quando se varia o número de caminhões de 1 a 22, em contraste com os cenários 1 e 2, neste cenário não existe saturação, i.e., um

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

número de caminhões a partir do qual a movimentação de material permanece constante. Também vemos uma maior produção de estéril em relação ao cenário 2 dado que a produção das escavadeiras (removedoras de estéril) é maior que as pás carregadeiras, motivo pelo qual a produção de estéril é maior. Entretanto, como a produção das pás carregadeiras (removedoras de minério) compete com as escavadeiras pelos caminhões, sua produção é reduzida. A taxa de utilização destes quatro equipamentos se apresenta na Figura 32, na qual os valores variam de 2% a 45% para as pás carregadeiras e de 2% a 44% para as escavadeiras. Os valores das taxas de utilização das carregadeiras no presente cenário são muito baixas comparadas com os cenários anteriores.

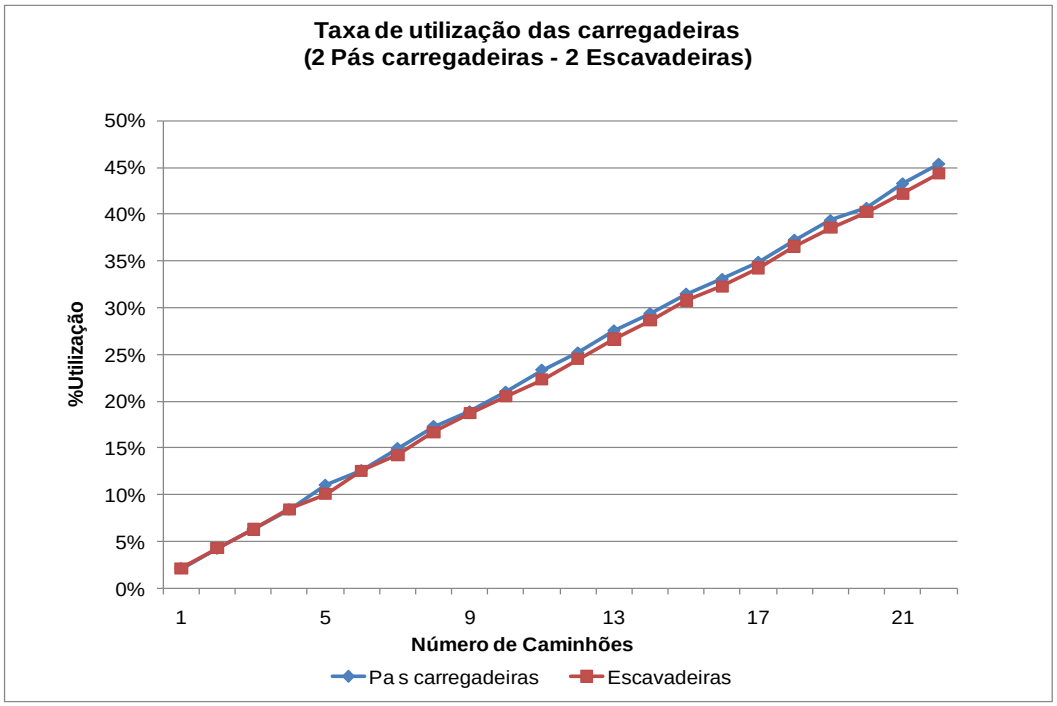

Figura 32: Taxa de utilização das carregadeiras – Cenário 3

Fonte: Elaborado pela Autora

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

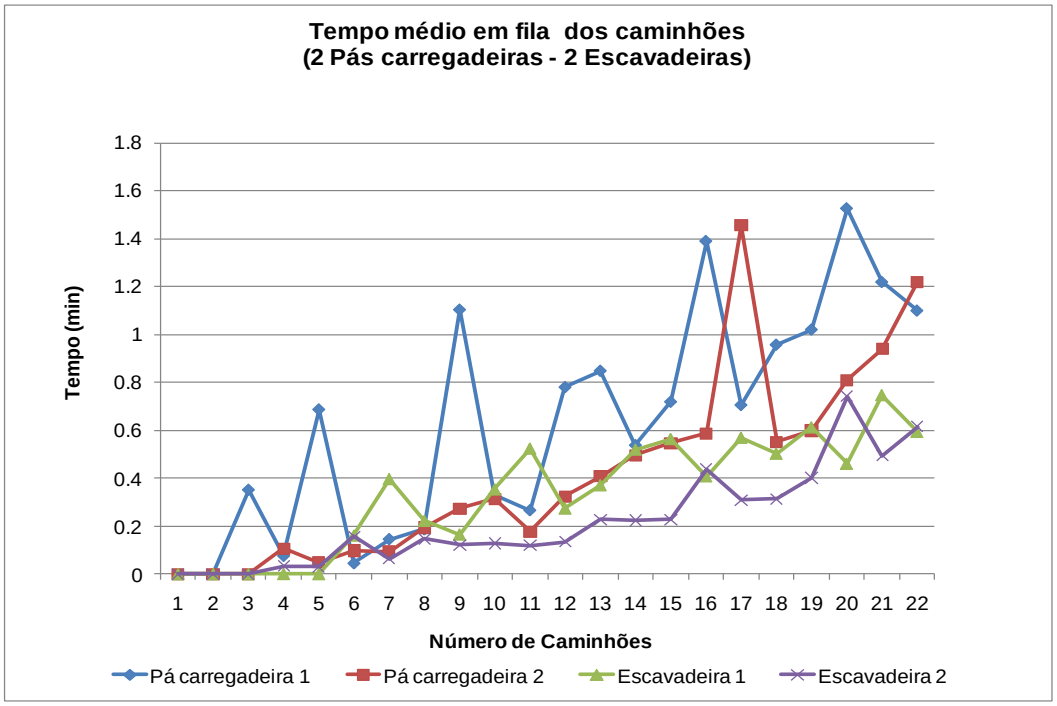

Figura 33: Tempo médio em fila dos caminhões nas carregadeiras – Cenário 3
Fonte: Elaborado pela Autora

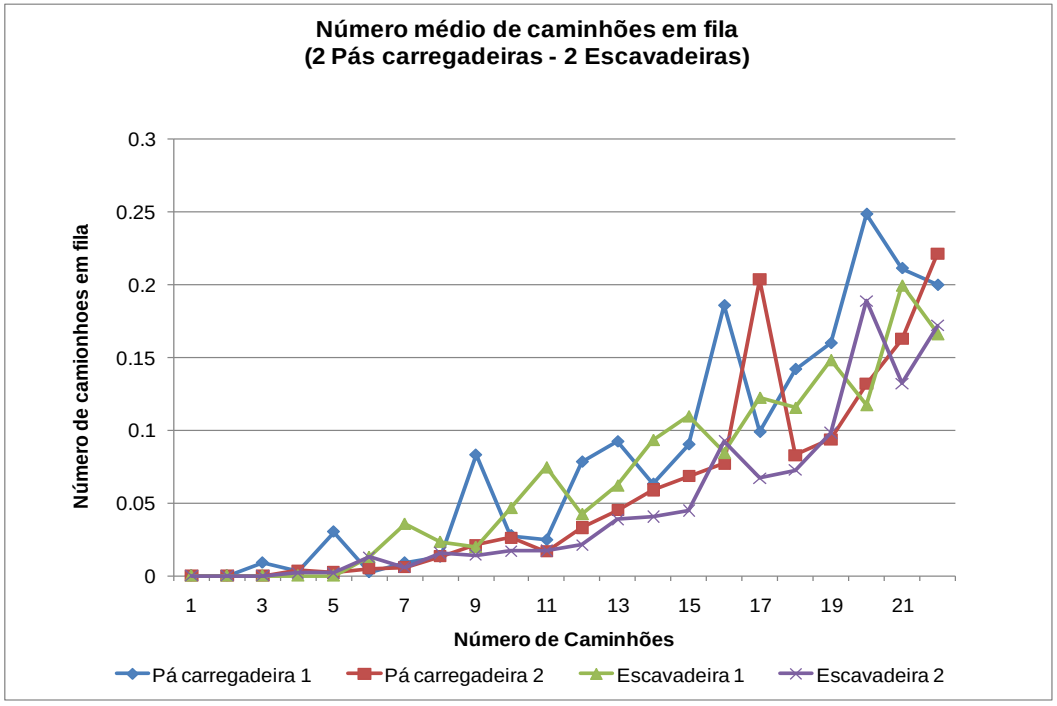

Figura 34: Número médio em fila dos caminhões nas carregadeiras – Cenário 3
Fonte: Elaborado pela Autora

Para este cenário, vemos que o tempo máximo de espera em fila nas pás carregadeiras é de 1,5 minutos; para as escavadeiras temos que o tempo máximo de espera em fila varia é de 0,6 minutos, neste cenário as pás carregadeiras assim como as escavadeiras não apresentam equipamentos em fila. Como resultado do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

presente cenário, podemos concluir que os quatro equipamentos de carga podem tornar o sistema mais eficiente reduzindo o número de caminhões em fila, assim como o tempo de espera em fila, mas isso também provoca ociosidade ao sistema, considerando uma taxa de utilização de apenas 45 %, que é um valor muito baixo. A Figura 35 apresenta uma comparação entre os três cenários, analisando a taxa de utilização dos equipamentos de carga para cada cenário, onde se pode observar como a utilização dos equipamentos de carga no cenário 3 com 4 carregadeiras se reduz em comparação com os outros 2 cenários de 2 e 3 pás carregadeiras.

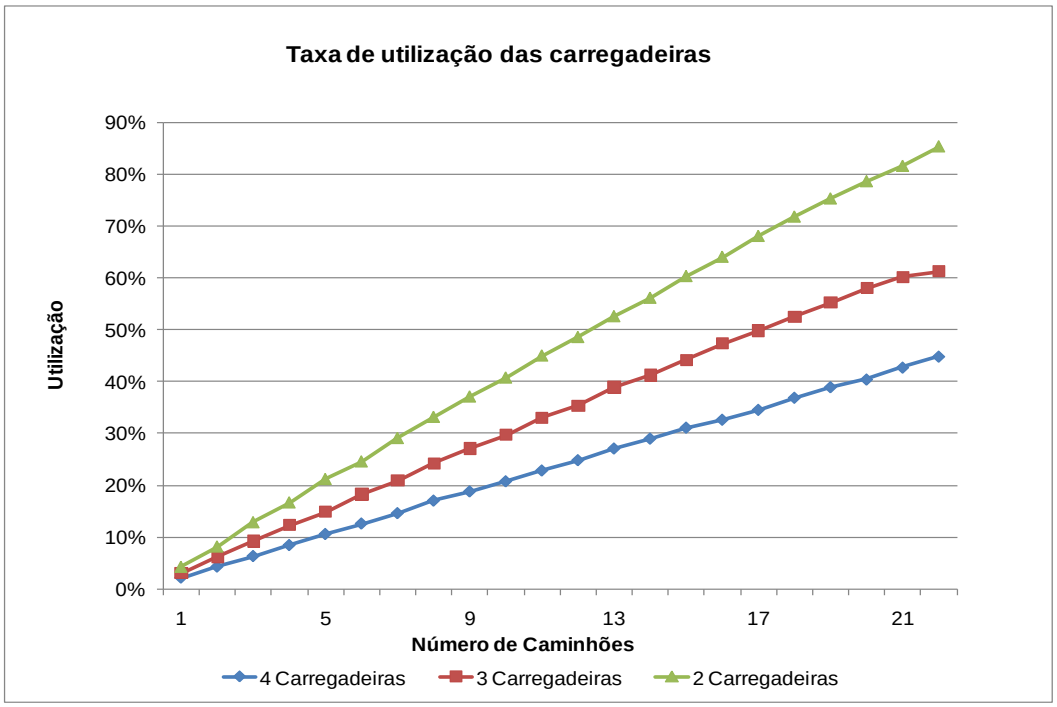

Figura 35: Taxa de utilização das carregadeiras para cada um dos cenários simulados
Fonte: Elaborado pela Autora

6.4. Análise de melhorias no sistema através do Modelo de Reparação de Máquina

O Modelo de Reparação de Máquina foi utilizado com o objetivo de apresentar informações preliminares de operação e permitir analisar determinados parâmetros, tais como: o número e o tempo médio de caminhões em fila de espera no ponto de carga e descarga assim como a probabilidade dos equipamentos estiverem desocupados, baseado no funcionamento planejado da mina.

A adequação do Modelo de Reparação de Máquina para simular as operações de lavra em minas a céu aberto foi proposta por Krause e Musingwini (2007), Najor e Hagan (2006) partindo do princípio de que este tipo de sistema

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

comporta-se como um sistema de recursos finitos com uma determinada população a ser atendida, no qual a taxa de chegadas depende do estado do sistema. A Tabela 21 amostra a adaptação do modelo de reparação de máquina apresentada por Krause e Musingwini (2007) para avaliar o processo de carregamento e transporte.

Tabela 21: Analogia entre o Processo de carregamento e transporte e o Modelo de Reparação de Máquina

Notação	**Modelo de Reparação de Máquina**	**Adaptação do Modelo de Reparação para o Processo de carregamento e transporte**
	Descrição	
L	Número médio de caminhões no sistema (em fila e atendimento)	Número médio de caminhões nos pontos de carga ou descarga (em fila e atendimento)
Lq	Número médio de caminhões em fila na estação de Reparação	Número médio de caminhões em fila nos pontos de carga ou descarga
W	Tempo médio que o equipamento permanece em reparação	Tempo médio que o caminhão permanece no ponto de carga ou descarga
Wq	Tempo médio em espera na estação de reparação	Tempo médio que o caminhão permanece em fila no ponto de carga e/ou descarga

Fonte: Elaborado pela Autora.

O modelo de reparação de máquina considera K máquinas e R servidores que podem atender às máquinas quando elas quebram. O Modelo de Reparação de Máquina pode ser descrito na notação de Kendall como um sistema do tipo M / M / R / GD / K / K, em que o primeiro M indica que as chegadas seguem um processo Markoviano, o segundo M representa a taxa de serviço que também segue um processo Markoviano, o R refere-se ao número de servidores em paralelo, GD representa a disciplina de serviço, por fim, assume a capacidade máxima do sistema restrita a K usuários, incluindo aqueles em serviço, (Winston, 2004).

O problema em análise diz respeito a um número de K caminhões em funcionamento que são enviados a um determinado ponto de carga ou descarga a uma taxa λ caminhões/hora. Para tal existe um número de equipamentos de carga ou britadores com uma determinada taxa de carregamento individual μ caminhões/hora. Se algum destes equipamentos de carga ou britadores estiverem desocupados o caminhão é imediatamente atendido, caso contrário terá que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

esperar na fila de espera. Após carregamento ou descarregamento o caminhão é colocado em circulação.

O objetivo é o de analisar um conjunto de indicadores de serviço associados a determinadas configurações do sistema em causa (fazendo variar o número de caminhões, equipamentos de carga e britadores), com vista à tomada de decisão sobre os valores das variáveis envolvidas.

Para a modelagem da fila de caminhões nos pontos de carga e descarga na mina, fez-se necessário calcular su ritmo de chegada λ e de serviço μ, estabelecer o número de equipamentos de carga e descarga disponíveis assim com a ordem de carga e descarga (geralmente do tipo primeiro a chegar, primeiro a ser atendido).

Os dados que consistem em entradas do modelo são os seguintes:

- *K:* Número de caminhões no sistema;
- *R*: Número de equipamentos de carga ou descarga;
- T_s : Tempo médio de ciclo do caminhão em minutos;
- T_1 : Tempo médio de carga ou descarga do caminhão em minutos;
- $\mu = \frac{60}{T_1}$: Ritmo médio de atendimento de cada equipamento de carga ou descarga por hora;
- $\lambda = \frac{60}{T_s}$: Ritmo de chegada dos caminhões por hora;
- $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$:Taxa de utilização dos equipamentos de carga ou descarga;

A Tabela 22 apresenta os dados de saída a serem considerados, e as fórmulas matemáticas empregadas para representar o sistema:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tabela 22: Fórmulas matemáticas empregadas no Modelo de Reparação de Máquina

Notação	Fórmula	Descrição
π_j	$\pi_j = \binom{K}{j}\rho^j \pi_0$ *para:* $(j = 0,1,...,R)$ (6.1) $\pi_j = \dfrac{\binom{K}{j}\rho^j j!\pi_0}{R!R^{j-R}}$ *para:* $(j = R+1, R+2,..., K)$ (6.2) *onde* $\binom{K}{j} = \dfrac{K!}{j!(k-j)!}$	Probabilidade de *j* caminhões estarem sendo atendidos ou aguardando atendimento no ponto de carga ou descarga.
ρ	$\rho = \dfrac{\lambda}{\mu}$ (6.3)	Corresponde ao fator de utilização dos equipamentos de carga ou descarga, ou seja, a fração de tempo esperada em que os servidores estão ocupados.
L	$L = \sum_{j=0}^{j=K} j\pi_j$ (6.4)	Número esperado de caminhões no sistema de fila aguardando atendimento ou sendo atendido no ponto de carga ou descarga.
L_q	$L_q = \sum_{j=R}^{j=K} (j-R)\pi_j$ (6.5)	Número esperado de caminhões na fila no ponto de carga ou descarga.
$\overline{\lambda}$	$\sum_{j=0}^{j=K} \pi_j \lambda_j = \sum_{j=0}^{j=K} \lambda(K-j)\pi_j = \lambda(K-L)$ (6.6)	Número de caminhões que chegam no ponto de carga ou descarga por unidade de tempo.
W	$W = \dfrac{L}{\overline{\lambda}}$ (6.7)	Tempo de espera dos caminhões no ponto de carga ou descarga.
W_q	$W_q = \dfrac{L_q}{\overline{\lambda}}$ (6.8)	Tempo de espera exclusivamente na fila no ponto de carga ou descarga.
P	$P = \mu * \pi_j * C$ (6.9) onde C: Capacidade de carga	Taxa de Produção no ponto de carga, fórmula proposta por Najor e Hagan (2006).

Fonte: Elaborado pela Autora.

Com base nos dados de entrada considerados para o modelo de simulação apresentados na Tabela 23 pôde-se compor a Tabela 24, que apresenta as taxas de chegadas λ e de serviço μ por hora de trabalho para cada tipo de equipamentos de carga (carregadeiras) e descarga (britador). Para todos os casos, foi considerado que o processo de chegada é o de Poisson e o tempo de serviço está de acordo com a distribuição exponencial.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tabela 23: Parâmetros de entrada para o Modelo de Reparação de Máquina

Parâmetros para o Modelo de Reparação de Máquina		
Parâmetro	**Unidade**	**Valor médio**
Tempo médio de viagem vazio	Min	8,19
Tempo médio de viagem cheio	Min	10,14
Tempo médio de descarga	Min	1,63
Tempo médio de carga	Min	2,05
Tempo médio de ciclo	Min	22,41
Capacidade de carga	T	213,0

Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 24: Taxas de chegada e de serviço por hora para os equipamentos

	Carregadeiras	**Britador**
λ	2,68	2,68
μ	29,27	36,81

Fonte: Elaborado pela Autora.

A fim de avaliar como o sistema reage frente a diferentes configurações os valores atribuídos às variáveis foram definidos de forma a que possibilitassem uma visão de certa forma abrangente do problema e que ao mesmo tempo retratassem as situações mais habituais dentro da mina.

Tabela 25: Valores atribuídos às variáveis K e R

	Número de equipamentos	**Tipo de Equipamento**
K	1a 22	Caminhões
R	1 a 4	Carregadeiras
M	1 a 2	Britadores

Fonte: Elaborado pela Autora.

Julgou-se conveniente testar o sistema para a configuração limite de K =1 caminhão que poderá parecer um pouco desajustado da realidade, embora não impossível.

6.4.1. Aplicação do Modelo de Reparação de Máquina para o cenário base

A seguir serão apresentados em detalhe os cálculos e comentários relativos para a configuração K (número de caminhões) = 22, R (número de equipamentos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

de carga) = 4. Substituindo os valores atribuídos às variáveis *K e R* apresentadas na Tabela 25 nas fórmulas (6.1) e (6.2) da Tabela 22 obtém-se a probabilidade de ter um número determinado de caminhões a serem atendidos ou em atendimento em cada ponto de carga, como se mostra na Tabela 26.

Tabela 26: Probabilidade para os diferentes estados da configuração M =22, R (Equipamentos de carga) =4

Estado (n)	P_n
0	14,34%
1	28,86%
2	27,72%
3	16,90%
4	7,34%
5	3,02%
6	1,18%
7	0,43%
8	0,15%
9	0,05%
10	0,01%
11	0,00%
12	0,00%
13	0,00%
14	0,00%
15	0,00%
16	0,00%
17	0,00%
18	0,00%
19	0,00%
20	0,00%
21	0,00%
22	0,00%

Fonte: Elaborado pela Autora.

A partir das probabilidades determinadas é possível calcular um conjunto de indicadores de serviço baseados na teoria de filas de espera. A Tabela 27 apresenta os principais indicadores utilizados para avaliar o processo de carregamento e transporte da mina a ser simulada através do Modelo de Reparação de Máquina.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tabela 27: Tabela de indicadores de serviço para o processo de carregamento e transporte

Indicador	Notação	Ponto de carga
Número médio de caminhões no sistema	L	1,91
Número médio de caminhões em fila	L_q	0,08
Número médio de caminhões em atendimento	n_a	1,84
Número médio de caminhões em circulação	n_{func}	20,09
Percentagem média de caminhões nos pontos de carga	Pcn_s	0,09
Percentagem média de caminhões na fila	Pcn_f	0,00
Percentagem média de caminhões em atendimento	Pcn_a	0,08
Percentagem média de caminhões em circulação	Pcn_{func}	0,91
Percentagem média de carregadeiras ocupadas	Pcn_{co}	0,46
Taxa média de ao sistema	$\bar{\lambda}$	53,78
Tempo médio de retenção de um equipamento na carregadeira	T_a	2,13
Tempo médio de retenção dos caminhões na fila de espera	W	0,08
Tempo médio de retenção dos caminhões no atendimento	W_q	2,05
Tempo médio em circulação dos caminhões	T_f	22,41
Fração de tempo que as carregadeiras estão livres	T_{el}	0,54
Fração de tempo que as carregadeiras estão ocupadas	T_{eo}	0,46

Fonte: Elaborado pela Autora

6.4.2. Aplicação do Modelo de Reparação de Máquina para o resto de configurações

Tal como foi referido na Tabela 25 foram testadas diferentes configurações variando o número de caminhões *K*, carregadeiras *R* e britadores *M* dentro do sistema, mantendo constante todas as outras variáveis. Dado o elevado número de cálculos, estes serão apresentados no Apêndice V.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

6.4.2.1. Efeito do número de Caminhões *(K)* e Carregadeiras *(R)*

A Figura 36 foi gerada fazendo uso dos dados do cenário atual do sistema apresentados nas Tabelas 23 e 25 em que a mina dispõe de 22 caminhões com capacidade de 213 t. A figura mostra como a produtividade dos equipamentos de carga se incrementa e a produtividade dos caminhões decresce ao incrementar o tamanho da frota de caminhões de 1 a 22. Assim também a figura mostra o número de caminhões que são requeridos no sistema para que os 4 equipamentos de carga consigam alcançar a sua capacidade teórica no sistema, que neste caso seriam com 18 ou 19 caminhões aproximadamente.

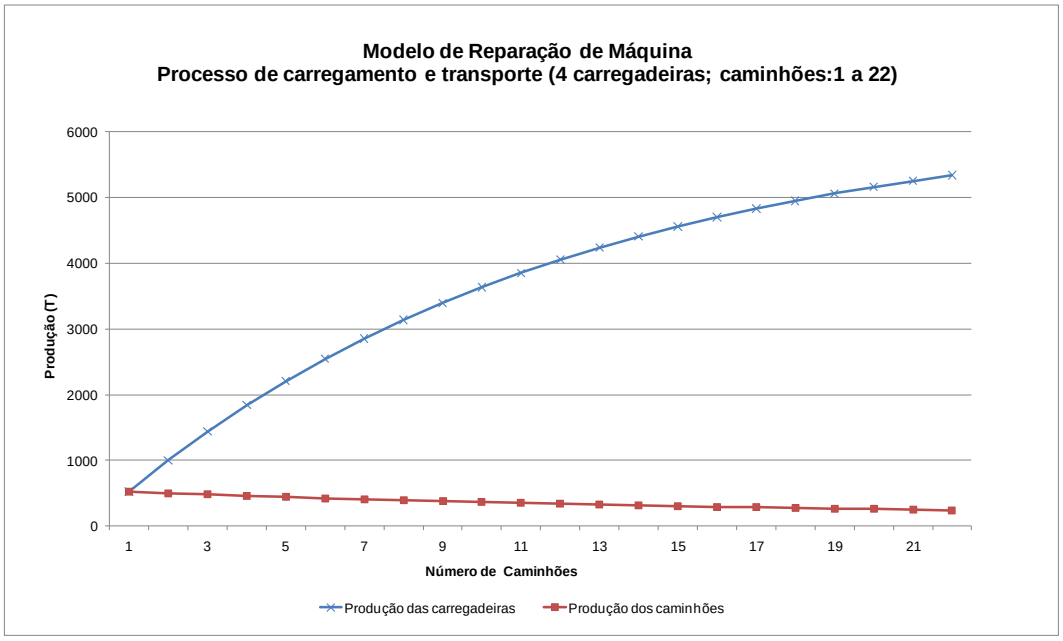

Figura 36: Curva de produção variando o tamanho da frota de caminhões

Fonte: Elaborado pela autora.

A fim de se avaliar o efeito do número de carregadeiras sobre o sistema foram feitas simulações variando a disponibilidade das mesmas entre 2 e 4 com 22 caminhões para analisar os tempos médios de espera em fila (W_q), número de equipamentos em fila (L_q) assim como a fração de tempo em que os equipamentos de carga estão ocupados (T_{eo}) ou em fila (Pcw_q), os resultados se mostram na Tabela 28.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tabela 28: Resultados do sistema de filas nas carregadeiras

Sistema de filas nas carregadeiras						
Número de Carregadeiras	L (Número)	L_q (Número)	W (Min.)	W_q (Min.)	T_{eo} (%)	Pcw_q (%)
2	3,67	1,99	4,49	2,44	84%	54%
3	2,18	0,37	2,47	0,42	60%	17%
4	1,91	0,08	2,13	0,08	46%	4%

Fonte: Elaborado pela Autora.

Observa-se que se dispondo apenas de duas carregadeiras, há uma maior utilização (84%), bem como evidentemente há maior chance dos veículos terem que esperar pelo atendimento do serviço Pcw_q (54%). Constata-se ainda que, apesar do sistema estar planejado para trabalhar com 4 carregadeiras, existe uma baixa utilização destes equipamentos (46%), entretanto operando-se o sistema com 3 equipamentos de carga a taxa de utilização dos equipamentos aumenta em 14%, assim também o tempo de espera em fila se vê aumentando de 0,08 para 0,42 minutos.

6.4.2.2. Efeito do número de Caminhões *(K)* e Britadores *(R)*

Para determinar se a utilização de um britador no sistema é o adequado, foi realizada a mesma análise para as carregadeiras variando a sua disponibilidade entre 1 e 2 britadores, cada um com capacidade de descarga de 3 caminhões simultaneamente. Os resultados obtidos da simulação se apresentam na Tabela 29 e a Figura 37, na qual foi comparada a utilização de 1 a 2 britadores com 22 caminhões, para determinar qual seria a variação da eficiência no sistema.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

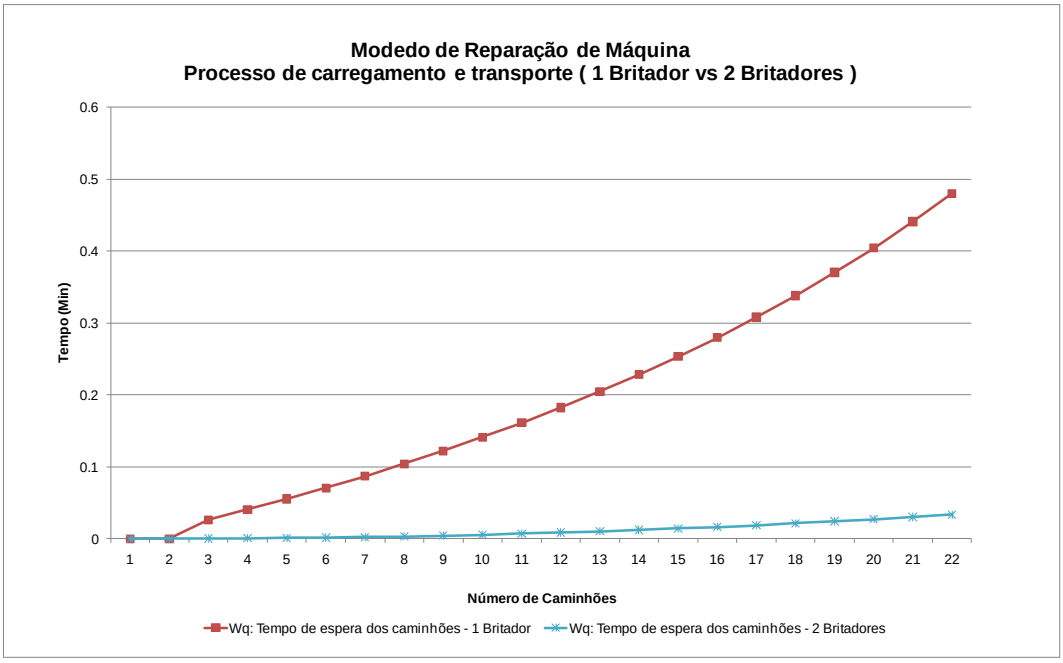

Figura 37: Resultados do sistema de filas para 1 e 2 Britadores
Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 29: Resultados do sistema de filas com 2 britadores

Sistema de Filas nos Britadores						
Número de Britadores	L (Número)	L_q (Número)	W (Min.)	W_q (Min.)	T_{eo} (%)	Pcw_q (%)
1	0,96	0,45	1,02	0,48	51%	47%
2	0,55	0,03	0,58	0,03	26%	6%

Fonte: Elaborado pela Autora.

A Tabela 29 mostra que a variação na utilização de 1 a 2 britadores é elevada, isto se deve à capacidade de descarga dos britadores a serem simulados na mina em estudo tendo uma capacidade de descarga de três caminhões simultaneamente; é por isso que a utilização de 2 britadores ocasionaria uma capacidade ociosa de 54% com uma probabilidade de 0,06% dos equipamentos ficarem esperando para descarregar.

Dispondo-se apenas de um britador, observa-se que a probabilidade dos britadores estarem ocupados é de 51%, bem como, evidentemente, há maior chance dos caminhões terem que esperar em fila para descarregar (28%), mas o tempo que o caminhão fica aguardando para descarregar é 1 min. Aproximadamente sendo um dado aceitável dentro de sistemas reais.

De acordo com os resultados obtidos do modelo de reparação de máquina, pode-se inferir que provavelmente o número de carregadeiras adequadas a serem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

colocadas em operação seria de 3 carregadeiras pois, nos cenários onde se opera com 4 carregadeiras existe uma maior probabilidade das carregadeiras ficarem ociosas, outro ponto importante é a utilização de um britador no sistema, dado que a utilização de dois britadores pode acrescentar aos custos operacionais, gerando uma elevada capacidade ociosa no sistema.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA