9 Apêndices

Apendice I – Diagrama do ciclo de atividades

O diagrama do ciclo de atividades usado para representar o modelo de simulação do processo de carregamento e transporte de minério mostrado na Figura 15 é descrito neste apêndice.

Este diagrama é composto por três entidades: caminhão, carregadeira e britador. A seguir será mostrado o ciclo de atividades de cada uma das entidades do modelo:

- Entidade: Caminhão

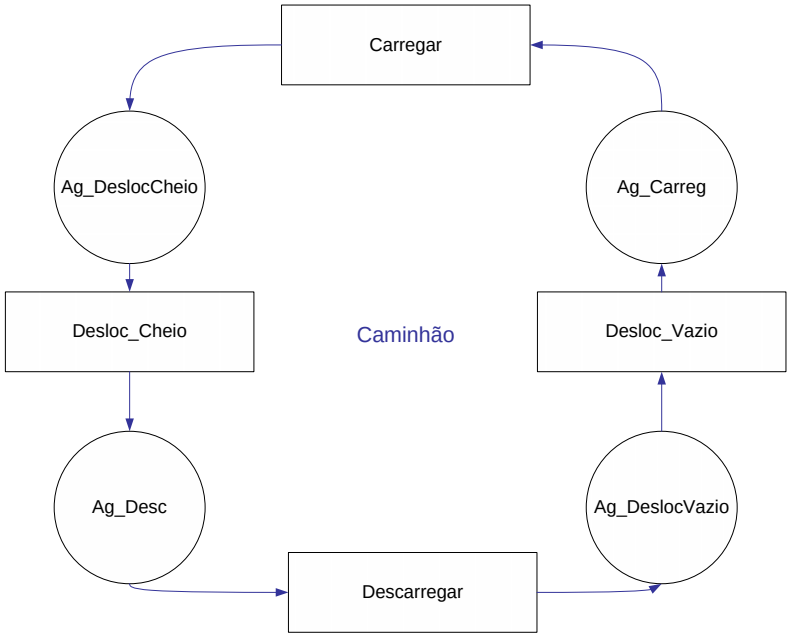

Figura API. 1 - Ciclo da entidade caminhão

O caminhão vazio se dirige até o ponto de carga e aguarda na fila "Ag_Carreg" até que as condições para o processo de carregamento (frente disponível, carregadeira disponível) sejam satisfeitas. Após o processo de carregamento do caminhão, ele se dirige a um ponto de descarga, onde aguardará na fila "Ag_Desc", até que o ponto onde executará a descarga do material esteja disponível . Ao final da descarga o caminhão se dirige novamente ao ponto de carga. Os tempos dos processos de carregamento, descarregamento e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

deslocamento dos caminhões são descritos com probabilidades conhecidas.

A atividade ¨Desloc_Cheio¨ só ocorre se houver um caminhão na fila ¨Ag_DeslocCheio¨, esta fila é uma fila artificial, pois nela não ocorre espera, e só é usada para mostrar como a entidade caminhão se movimenta no modelo.

- Entidade: Carregadeira

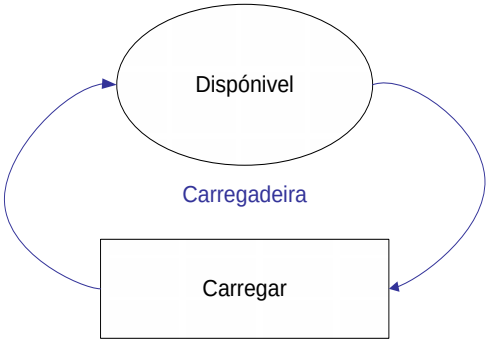

Figura API. 2 – Ciclo da entidade carregadeira

As carregadeiras alternam entre o processo de carga e a espera em um estado disponível para um acontecimento, como se mostra na Figura API.1 – 2 .

- Entidade: Britador

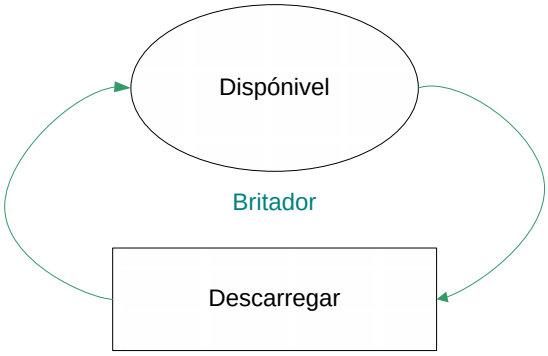

Figura API. 3–Ciclo da entidade britador

A Figura API. 3 apresenta o ciclo da entidade do britador, assim como as carregadeiras, o britador alterna entre o processo de descarga e a espera em um estado disponível.

Bloqueio de uma entidade

O processo de carregamento e transporte a ser modelado considerará o bloqueio temporário das entidades caminhão, carregadeira e britador. Este

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

bloqueio responderá às atividades de manutenção preventiva, corretiva e paradas operacionais dos equipamentos.

A Figura API.4 mostra a representação de bloqueio da entidade carregadeira. O bloqueio temporário da entidade carregadeira será representado através de uma entidade fictícia denominada horário. Quando a entidade carregadeira participa da atividade bloquear, ela ficará indisponível, e a entidade horário vai para a fila "Pós_Bloq" e fica pronta para participar da atividade desbloquear. Uma vez que a entidade horário vai para a atividade desbloquear, a carregadeira vai para a fila disponível e fica liberada para participar de outras atividades. Enquanto a entidade horário está alocada na fila "Pré_Bloq" a atividade "Bloquear" poderá acontecer assim que a entidade carregadeira seja colocada livre.

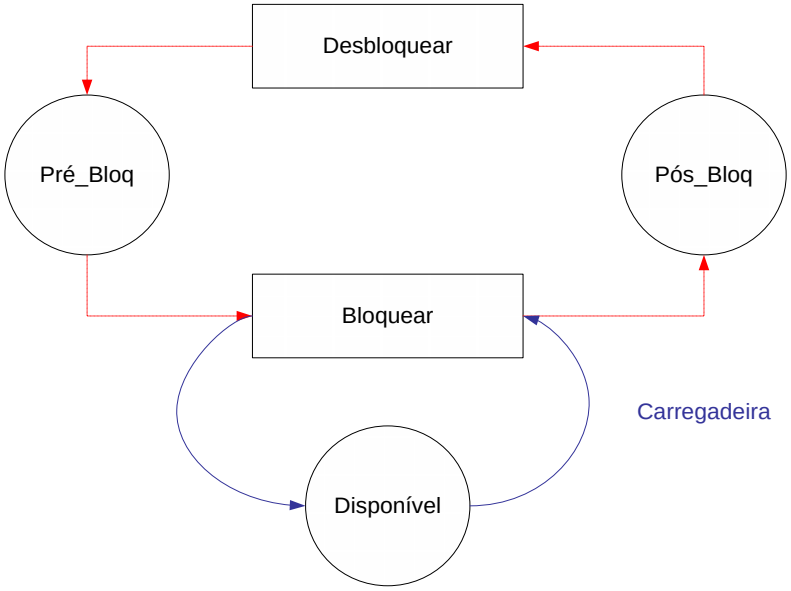

Figura API. 4–Representação do bloqueio da entidade carregadeira

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Apêndice II – Dados de entrada

Distribuição dos dados de entrada

Tempo de carregamento material Minério – PC800/793C	Distribution Summary Distribution: Exponential Expression: 1,5 + EXPO(0,627) Square Error: 0,012438 Chi Square Test Number of intervals = 8 Degrees of freedom = 6 Test Statistic = 5,02 Corresponding p-value = 0,543 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,181 Corresponding p-value = 0,0761 Data Summary Number of Data Points = 49 Min Data Value = 1,5 Max Data Value = 4,22 Sample Mean = 2,13 Sample Std Dev = 0,612 Histogram Summary Histogram Range = 1,5 to 4,63 Number of Intervals = 40

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tempo de carregamento material Estéril – PC800/793D	Distribution Summary Distribution: Exponential Expression: 2 + EXPO(0,798) Square Error: 0,000819 Chi Square Test Number of intervals = 19 Degrees of freedom = 17 Test Statistic = 23,8 Corresponding p-value = 0,134 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,448 Corresponding p-value < 0,01 Data Summary Number of Data Points = 1415 Min Data Value = 2 Max Data Value = 8,8 Sample Mean = 2,8 Sample Std Dev = 0,85 Histogram Summary Histogram Range = 2 to 9 Number of Intervals = 40
Tempo de carregamento material minério – L1850/793C	Distribution Summary Distribution: Erlang Expression: 1,5 + ERLA(0,87; 3) Square Error: 0,004924 Chi Square Test Number of intervals = 20 Degrees of freedom = 17 Test Statistic = 37,7 Corresponding p-value < 0,005 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 3,39 Corresponding p-value < 0,01 Data Summary Number of Data Points = 456 Min Data Value = 1,75 Max Data Value = 11,8 Sample Mean = 4,11 Sample Std Dev = 1,57 Histogram Summary Histogram Range = 1,5 to 12 Number of Intervals = 40

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tempo de carregamento material estéril – L1850/793C	Distribution Summary Distribution: Erlang Expression: 2 + ERLA(0,95; 3) Square Error: 0,002408 Chi Square Test Number of intervals = 14 Degrees of freedom = 11 Test Statistic = 30,4 Corresponding p-value < 0,005 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,137 Corresponding p-value < 0,01 Data Summary Number of Data Points = 1022 Min Data Value = 2 Max Data Value = 20,2 Sample Mean = 4,85 Sample Std Dev = 1,78 Histogram Summary Histogram Range = 2 to 21 Number of Intervals = 34
Tempo de basculamento caminhão – 793 C	Distribution Summary Distribution: Normal Expression: NORM(1,65; 0,177) Square Error: 0,001650 Chi Square Test Number of intervals = 9 Degrees of freedom = 6 Test Statistic = 5,56 Corresponding p-value = 0,479 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,0338 Corresponding p-value > 0,15 Data Summary Number of Data Points = 365 Min Data Value = 1,2 Max Data Value = 2,41 Sample Mean = 1,65 Sample Std Dev = 0,177 Histogram Summary Histogram Range = 1,07 to 2,54 Number of Intervals = 19

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tempo de manobra do caminhão	Distribution Summary Distribution: Weibull Expression: 1,1 + WEIB(0,316; 4,23) Square Error: 0,002933 Chi Square Test Number of intervals = 12 Degrees of freedom = 9 Test Statistic = 12,9 Corresponding p-value = 0,18 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,0474 Corresponding p-value > 0,15 Data Summary Number of Data Points = 365 Min Data Value = 1,15 Max Data Value = 1,57 Sample Mean = 1,39 Sample Std Dev = 0,0771 Histogram Summary Histogram Range = 1,1 to 1,62 Number of Intervals = 19
Carga média transportada caminhão - 793c	Distribution Summary Distribution: Normal Expression: NORM(213; 1,85) Square Error: 0,001838 Chi Square Test Number of intervals = 12 Degrees of freedom = 9 Test Statistic = 10,7 Corresponding p-value = 0,309 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,0309 Corresponding p-value > 0,15 Data Summary Number of Data Points = 365 Min Data Value = 207 Max Data Value = 219 Sample Mean = 213 Sample Std Dev = 1,85 Histogram Summary Histogram Range = 206 to 219 Number of Intervals = 19

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Velocidade do caminhão vazio – 793C	Distribution Summary Distribution: Beta Expression: 14 + 13 * BETA(4,03; 2,48) Square Error: 0,013413 Chi Square Test Number of intervals = 13 Degrees of freedom = 10 Test Statistic = 79,1 Corresponding p-value < 0,005 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,0968 Corresponding p-value < 0,01 Data Summary Number of Data Points = 365 Min Data Value = 14,1 Max Data Value = 26 Sample Mean = 22,1 Sample Std Dev = 2,3 Histogram Summary Histogram Range = 14 to 27 Number of Intervals = 19
Velocidade do caminhão cheio – 793C	Distribution Summary Distribution: Weibull Expression: 13,4 + WEIB(3,74; 5,37) Square Error: 0,004017 Chi Square Test Number of intervals = 11 Degrees of freedom = 8 Test Statistic = 18,1 Corresponding p-value = 0,0216 Kolmogorov-Smirnov Test Test Statistic = 0,0525 Corresponding p-value > 0,15 Data Summary Number of Data Points = 365 Min Data Value = 13,9 Max Data Value = 18,3 Sample Mean = 16,9 Sample Std Dev = 0,785 Histogram Summary Histogram Range = 13,4 to 18,8 Number of Intervals = 19

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Apêndice III – Indicadores de desempenho

A tabela a seguir apresenta os indicadores de desempenho dos equipamentos de mina, permitindo a análise de produtividade e o perfil de perdas relacionado aos tempos de operação e manutenção dos equipamentos para o planejamento de lavra.

Legenda		Definições
HC	Horas calendário	Tempo total existente no período considerado (calendário anual ou 8760 h, exceto ano bissexto), no caso de múltiplas unidades multiplicar pelo número de unidades
HT	Horas trabalhadas	Tempo total em que o equipamento realiza trabalho (inclui outros serviços que não sejam sua atividade fim)
HM	Horas de manutenção	Tempo total em que o equipamento está indisponível para operar por estar sob intervenção da manutenção
HI	Horas improdutivas	Tempo em que o equipamento está disponível para operar, mas não o faz por motivos operacionais – quaisquer razões que não sejam de manutenção, ou seja, não realiza qualquer tipo de trabalho (corresponde ao termo **Horas ociosas,** conforme padrão DIST)
HII	Horas improdutivas internas	Tempo em que o equipamento está pronto para operar, mas não o faz por motivos gerenciáveis (corresponde ao termo **Horas ociosas internas,** conforme padrão DIST)
HIE	Horas improdutivas externas	Tempo em que o equipamento está pronto para operar, mas não o faz por fatores não gerenciáveis (corresponde ao termo **Horas ociosas externas,** conforme padrão DIST)
HMP	Horas de manutenção preventiva	Tempo de manutenção planejada (preventiva ou programada), inclui horas improdutivas da manutenção
HMC	Horas de manutenção corretiva	Tempo de manutenção não programada, inclui horas improdutivas da manutenção
HAO	Horas de atraso operacional	Tempo em que o equipamento opera, porém não produz (ex: fila, outros serviços, etc.), ou produz à velocidade ou taxa reduzida (corresponde ao termo **Horas trabalhadas improdutivas,** conforme padrão DIST)
HEF	Horas efetivas	Tempo efetivo de operação, corresponde ao tempo em que o equipamento desenvolve trabalho útil (HT - HAO), (corresponde ao termo **Horas trabalhadas produtivas,** conforme padrão DIST)
N	Número de intervenções de manutenção de qualquer natureza	Soma das intervenções de manutenção programadas ou não
NC	Número de intervenções não programadas (corretivas)	Soma das intervenções de manutenção não programadas
T	Tonelagem	Tonelagem movimentada

Fonte: Mina – Cerro verde

A tabela a seguir apresenta as fórmulas usadas para o cálculo dos indicadores de desempenho acima referidos:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Cálculo dos indicadores de desempenho

Sigla	Indicador	Cálculo	Und.	Descrição
DF	Disponibilidade Física	DF = (HC-HM) / HC * 100	%	Representa o percentual das horas calendário em que o equipamento esteve fisicamente disponível para operar
UF	Utilização Física	UF = HT / (HC-HM) * 100	%	Representa o tempo de operação (horas trabalhadas) em relação ao tempo em que o equipamento esteve disponível para operar
RO	Rendimento Operacional	RO = HT / HC * 100	%	Representa o tempo de operação, ou seja, as horas trabalhadas, em relação às horas calendário (DF x UF)
P	Produtividade	P = T / HT	t/h	Representa a produção do equipamento por hora trabalhada
TFD	Tempo médio de fila na descarga	Somatória dos tempos de fila de todos os caminhões / Número de descarregamentos	h	Será considerado o tempo total de fila no ponto de descarga
TFC	Tempo médio de fila no carregamento	Somatória dos tempos de fila de todos os caminhões / Número de carregamentos em frentes de lavra ou pilha pulmão	h	Será considerado o tempo total de fila no ponto de carga

Fonte: Mina Cerro - Verde

A tabela a seguir apresenta os indicadores de desempenho a serem considerados para cada tipo de equipamento:

Tabela dos Indicadores de desempenho utilizados para o dimensionamento no planejamento de lavra de curto prazo

Tipo de equipamento	DF	UF	RO	P	TFD	TFC	Vméd	Km Ch/Vz
Caminhões	X	x	X	x	x	x	x	x
Páscarregadeiras	X	x	X	x				
Escavadeiras	X	x	X	x				
Britadores	X	x	X	x				

Fonte: Mina Cerro - Verde

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Apêndice IV – Layout da Mina Virtual

Figura API. 5 – Layout da Mina Virtual

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Apêndice V – Aplicação do Modelo de Reparação de Máquina

A aplicação foi desenvolvida em Microsoft Excel 2007, com elaboração de uma planilha que permite simular diferentes cenários. Os resultados obtidos para cada um dos cenários descritos no capítulo de resultados se mostram a seguir:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Indicadores do Modelo de Reparação de Máquina para 2 Carregadeiras														
No. de cam.	No. de carreg.	No. méd. de caminhões no sistema	No. méd. de cam. em fila	No. méd. de cam. em atendimento	No. méd. de cam. em circulação	% méd. de cam. nos pontos de carga	% méd. de cam. na fila	% méd. de cam. em atendimento	% méd. de cam. em circulação	Taxa méd. de chegada ao sistema	Tempo méd. de retenção de um equipamento na carregadeira	Tempo méd. de retenção dos cam. na fila de espera	Tempo med. de retenção dos cam. no atendimento	Tempo méd. em circulação dos cam.
K	R	L	L_q	n_a	n_{func}	Pcn_s	Pcn_f	Pcn_a	Pcn_{func}	$\bar{\lambda}$	W	W_q	T_a	T_f
1	2	0,084	0,000	0,084	0,916	8%	0%	8%	92%	0,034	2,453	0,000	0,034	0,374
2	2	0,168	0,000	0,168	1,832	8%	0%	8%	92%	0,034	4,906	0,000	0,034	0,374
3	2	0,252	0,001	0,251	2,748	8%	0%	8%	92%	0,034	7,357	0,000	0,034	0,374
4	2	0,338	0,004	0,335	3,662	8%	0%	8%	92%	0,035	9,803	0,000	0,035	0,374
5	2	0,427	0,009	0,418	4,573	9%	0%	8%	91%	0,035	12,243	0,001	0,035	0,374
6	2	0,519	0,018	0,501	5,481	9%	0%	8%	91%	0,035	14,674	0,001	0,035	0,374
7	2	0,615	0,031	0,584	6,385	9%	0%	8%	91%	0,036	17,094	0,002	0,036	0,374
8	2	0,717	0,051	0,666	7,283	9%	1%	8%	91%	0,037	19,500	0,003	0,037	0,374
9	2	0,825	0,077	0,748	8,175	9%	1%	8%	91%	0,038	21,889	0,004	0,038	0,374
10	2	0,940	0,111	0,829	9,060	9%	1%	8%	91%	0,039	24,257	0,005	0,039	0,374
11	2	1,064	0,155	0,909	9,936	10%	1%	8%	90%	0,040	26,602	0,006	0,040	0,374
12	2	1,199	0,211	0,988	10,801	10%	2%	8%	90%	0,041	28,918	0,007	0,041	0,374
13	2	1,346	0,280	1,066	11,654	10%	2%	8%	90%	0,043	31,201	0,009	0,043	0,374
14	2	1,508	0,365	1,143	12,492	11%	3%	8%	89%	0,045	33,446	0,011	0,045	0,374
15	2	1,686	0,468	1,218	13,314	11%	3%	8%	89%	0,047	35,646	0,013	0,047	0,374
16	2	1,884	0,593	1,291	14,116	12%	4%	8%	88%	0,050	37,793	0,016	0,050	0,374
17	2	2,104	0,742	1,363	14,896	12%	4%	8%	88%	0,053	39,881	0,019	0,053	0,374
18	2	2,350	0,919	1,432	15,650	13%	5%	8%	87%	0,056	41,900	0,022	0,056	0,374
19	2	2,626	1,128	1,498	16,374	14%	6%	8%	86%	0,060	43,840	0,026	0,060	0,374
20	2	2,935	1,374	1,561	17,065	15%	7%	8%	85%	0,064	45,689	0,030	0,064	0,374
21	2	3,282	1,661	1,621	17,718	16%	8%	8%	84%	0,069	47,438	0,035	0,069	0,374
22	2	3,671	1,994	1,677	18,329	17%	9%	8%	83%	0,075	49,074	0,041	0,075	0,374

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Indicadores do Modelo de Reparação de Máquina para 3 Carregadeiras														
No. de cam.	No. de carreg.	No. méd. de caminhões no sistema	No. méd. de cam. em fila	No. méd. de cam. em atendimento	No. méd. de cam. em circulação	% méd. de cam. nos pontos de carga	% méd. de cam. na fila	% méd. de cam. em atendimento	% méd. de cam. em circulação	Taxa méd. de chegada ao sistema	Tempo méd. de retenção de um equipamento na carregadeira	Tempo méd. de retenção dos cam. na fila de espera	Tempo med. de retenção dos cam. no atendimento	Tempo méd. em circulação dos cam.
K	R	L	L_q	n_a	n_{func}	Pcn_s	Pcn_f	Pcn_a	Pcn_{func}	$\overline{\lambda}$	W	W_q	T_a	T_f
1	3	0,084	0,000	0,084	0,916	8%	0%	8%	92%	0,034	2,453	0,000	0,034	0,374
2	3	0,168	0,000	0,168	1,832	8%	0%	8%	92%	0,034	4,906	0,000	0,034	0,374
3	3	0,251	0,000	0,251	2,749	8%	0%	8%	92%	0,034	7,359	0,000	0,034	0,374
4	3	0,335	0,000	0,335	3,665	8%	0%	8%	92%	0,034	9,812	0,000	0,034	0,374
5	3	0,419	0,000	0,419	4,581	8%	0%	8%	92%	0,034	12,264	0,000	0,034	0,374
6	3	0,504	0,001	0,503	5,496	8%	0%	8%	92%	0,034	14,716	0,000	0,034	0,374
7	3	0,589	0,002	0,586	6,411	8%	0%	8%	92%	0,034	17,166	0,000	0,034	0,374
8	3	0,674	0,004	0,670	7,326	8%	0%	8%	92%	0,034	19,614	0,000	0,034	0,374
9	3	0,761	0,007	0,754	8,239	8%	0%	8%	92%	0,034	22,059	0,000	0,034	0,374
10	3	0,849	0,012	0,837	9,151	8%	0%	8%	92%	0,035	24,501	0,000	0,035	0,374
11	3	0,939	0,018	0,920	10,061	9%	0%	8%	91%	0,035	26,938	0,001	0,035	0,374
12	3	1,031	0,027	1,003	10,969	9%	0%	8%	91%	0,035	29,369	0,001	0,035	0,374
13	3	1,125	0,039	1,086	11,875	9%	0%	8%	91%	0,035	31,794	0,001	0,035	0,374
14	3	1,222	0,053	1,169	12,778	9%	0%	8%	91%	0,036	34,211	0,002	0,036	0,374
15	3	1,323	0,072	1,251	13,677	9%	0%	8%	91%	0,036	36,619	0,002	0,036	0,374
16	3	1,428	0,095	1,333	14,572	9%	1%	8%	91%	0,037	39,015	0,002	0,037	0,374
17	3	1,537	0,123	1,414	15,463	9%	1%	8%	91%	0,037	41,399	0,003	0,037	0,374
18	3	1,653	0,157	1,495	16,347	9%	1%	8%	91%	0,038	43,768	0,004	0,038	0,374
19	3	1,774	0,198	1,576	17,226	9%	1%	8%	91%	0,038	46,121	0,004	0,038	0,374
20	3	1,902	0,247	1,656	18,098	10%	1%	8%	90%	0,039	48,454	0,005	0,039	0,374
21	3	2,039	0,304	1,735	18,961	10%	1%	8%	90%	0,040	50,766	0,006	0,040	0,374
22	3	2,185	0,372	1,813	19,815	10%	2%	8%	90%	0,041	53,053	0,007	0,041	0,374

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Indicadores do Modelo de Reparação de Máquina para 4 Carregadeiras														
No. de cam.	No. de carreg.	No. méd. de caminhões no sistema	No. méd. de cam. em fila	No. méd. de cam. em atendimento	No. méd. de cam. em circulação	% méd. de cam. nos pontos de carga	% méd. de cam. na fila	% méd. de cam. em atendimento	% méd. de cam. em circulação	Taxa méd. de chegada ao sistema	Tempo méd. de retenção de um equipamento na carregadeira	Tempo méd. de retenção dos cam. na fila de espera	Tempo med. de retenção dos cam. no atendimento	Tempo méd. em circulação dos cam.
K	R	L	L_q	n_a	n_{func}	Pcn_s	Pcn_f	Pcn_a	Pcn_{func}	$\overline{\lambda}$	W	W_q	T_a	T_f
1	4	0,084	0,000	0,084	0,916	8	0	8	92	2,453	0,034	0,000	0,034	0,374
2	4	0,168	0,000	0,168	1,832	8	0	8	92	4,906	0,034	0,000	0,034	0,374
3	4	0,251	0,000	0,251	2,749	8	0	8	92	7,359	0,034	0,000	0,034	0,374
4	4	0,335	0,000	0,335	3,665	8	0	8	92	9,812	0,034	0,000	0,034	0,374
5	4	0,419	0,000	0,419	4,581	8	0	8	92	12,265	0,034	0,000	0,034	0,374
6	4	0,503	0,000	0,503	5,497	8	0	8	92	14,718	0,034	0,000	0,034	0,374
7	4	0,587	0,000	0,587	6,413	8	0	8	92	17,171	0,034	0,000	0,034	0,374
8	4	0,671	0,000	0,670	7,329	8	0	8	92	19,623	0,034	0,000	0,034	0,374
9	4	0,755	0,001	0,754	8,245	8	0	8	92	22,076	0,034	0,000	0,034	0,374
10	4	0,839	0,001	0,838	9,161	8	0	8	92	24,527	0,034	0,000	0,034	0,374
11	4	0,924	0,002	0,922	10,076	8	0	8	92	26,978	0,034	0,000	0,034	0,374
12	4	1,009	0,003	1,005	10,991	8	0	8	92	29,428	0,034	0,000	0,034	0,374
13	4	1,094	0,005	1,089	11,906	8	0	8	92	31,877	0,034	0,000	0,034	0,374
14	4	1,180	0,007	1,173	12,820	8	0	8	92	34,324	0,034	0,000	0,034	0,374
15	4	1,267	0,011	1,256	13,733	8	0	8	92	36,769	0,034	0,000	0,034	0,374
16	4	1,355	0,015	1,340	14,645	8	0	8	92	39,211	0,035	0,000	0,035	0,374
17	4	1,444	0,020	1,423	15,556	8	0	8	92	41,650	0,035	0,000	0,035	0,374
18	4	1,534	0,028	1,506	16,466	9	0	8	91	44,086	0,035	0,001	0,035	0,374
19	4	1,626	0,036	1,589	17,374	9	0	8	91	46,518	0,035	0,001	0,035	0,374
20	4	1,719	0,047	1,672	18,281	9	0	8	91	48,944	0,035	0,001	0,035	0,374
21	4	1,815	0,060	1,755	19,185	9	0	8	91	51,365	0,035	0,001	0,035	0,374
22	4	1,914	0,076	1,837	20,086	9	0	8	91	53,779	0,036	0,001	0,036	0,374