

## **Proyecto DSIM OP**

# Escuela de Verano en Planificación y Operaciones Mineras DELPHOS 2021

### **Integrantes:**

Jerson Contreras

Whitney Contreras

Cristian Gonzales

Paulina Parra

Cristian Soto

28 de enero de 2021

## Índice de Contenidos

<b>Parte A: Máxima productividad operativa por circuito productivo.....</b>	<b>3</b>
<b>Parte B: Máxima productividad operativa de todos los circuitos productivos.....</b>	<b>4</b>
<b>Parte C: Máxima productividad nominal de todos los circuitos productivos.....</b>	<b>5</b>
<b>Parte D: Análisis de sensibilidad.....</b>	<b>6</b>
<b>Conclusiones y Comentarios.....</b>	<b>7</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>8</b>

## Parte A: Máxima productividad operativa por circuito productivo

1. DSIM presenta 4 opciones de despacho. El despacho base, donde los equipos son asignados a la pala más cercana y de mayor prioridad; las opciones 1 y 3 presentan un factor de aleatoriedad cuando se cumplen la productividad buscada, mientras que la opción 2 asigna los camiones para satisfacer siempre los flujos de saturación, quitando el factor aleatorio de la simulación, y siendo la opción óptima si buscamos saturar cada circuito de producción y encontrar el punto de equilibrio en relación a la cantidad de equipos necesarios para alcanzar la mayor productividad del circuito.

2. Para definir la cantidad mínima de camiones que maximiza la productividad nominal en [t/h] de cada circuito productivo, se realizaron simulaciones por separado, donde se simularon “N” escenarios diferentes, partiendo de 10 camiones hasta “N”, siendo esta el escenario donde la productividad ya no sube y se estabiliza, encontrado así el punto de productividad nominal máximo en [t/h]. De acuerdo con los resultados presentados en las gráficas del Anexo A.1, el match pala – camión que maximiza cada circuito productivo son los siguientes:

Circuito Productivo	Pala	N° Camiones	Productividad nominal máxima (t)
FC_PO_A	SH1	12	109,760
FC_PO_B	SH2	15	108,640
FC_PO_C	SH3	15	108,640
FC_PO_D	SH4	11	109,760

*Tabla 1. Mínima Cantidad de Camiones por Circuito Productivo.*

3. Las gráficas solicitadas en esta pregunta se adjuntan en el Anexo A.2

a) Se observa que la productividad en [t/h], en función del número de camiones va en aumento a medida que se le agregan camiones a la simulación de cada circuito, hasta que llega a un punto de máxima productividad y luego decae o mantiene su máxima productividad. (Ver Anexo A.1)

b) El número de camiones que saturan los circuitos son los siguientes: 12 camiones (circuito FC\_PO\_A), 15 camiones (circuitos FC\_PO\_B y FC\_PO\_C) y 11 camiones (FC\_PO\_D)

c) La media de tiempo de espera en cada frente de carga se comporta de manera inversamente proporcional al número de camiones. Como se observa en los gráficos (Ver Anexo A.2), al aumentar el número de camiones el tiempo de espera de la pala para cargar el camión disminuye hasta que se llega a un punto mínimo, donde no disminuye más, esto debido a los tiempos designados para el SPOT de cada camión en el frente.

d) En los frentes de descarga no se observan tiempos de espera. En el caso de los botaderos no existe este tiempo de espera ya que sólo un circuito productivo lo está utilizando.

e) La utilización de cada pala aumenta con respecto del número de camiones hasta llegar al punto de productividad máxima en cada circuito productivo. Esto es debido a que el factor de utilización está directamente relacionado con los tiempos de espera del equipo de carga, donde en el punto de productividad máxima se alcanzan los menores tiempos de espera. (Ver Anexo A.2).

f) En este caso, se observa que, debido a las condiciones iniciales de la simulación, la utilización de los camiones es del 100%, ya que no presentan horas de reserva, pérdidas operacionales o demoras programadas y no programadas. Esto es para buscar la productividad máxima de cada circuito. (Ver Anexo A.2)

## **Parte B: Máxima productividad operativa de todos los circuitos productivos**

Con la simulación de todos los circuitos productivos funcionado al unísono, se observa una disminución de la productividad en cada uno de ellos. Esta disminución de la productividad se debe a que al existir mayor flota de equipos circulando, es más probable que se encuentren durante sus trayectorias, generándose mayores tiempos de transporte. La disminución de la productividad afecta en especial al movimiento de mineral, reduciéndose éste en un 19%. El detalle de la reducción porcentual de la producción se encuentra en el Anexo B.1.

1. a) En las frentes de carga, el tiempo de espera del camión disminuye en la mayoría de los casos, excepto en uno de ellos, en dónde el tiempo se mantiene respecto al escenario planteado en la parte A.

b) En los frentes de descarga, el tiempo de espera del camión aumenta en el caso de transporte de mineral hacia el chancador. Esto se debe a que las flotas de camiones de dos circuitos productivos tienen el mismo destino (chancador), siendo un total de 30 camiones que transportan mineral. Por otra parte, el tiempo de espera para las frentes de descarga en botaderos se sigue manteniendo en cero.

c) El factor de utilización de las palas en cada circuito productivo disminuye, a excepción del circuito productivo 1 en dónde el factor se mantiene respecto al escenario anterior. La disminución del factor de utilización de las palas es evidente en las frentes de carga de mineral, esto se debe a que la pala tiene que esperar mayor tiempo la llegada de camiones para su carguío. La reducción porcentual del factor de utilización de las palas que cargan mineral es de un 18%.

d) El factor de utilización de la flota de camiones es de un 100%, ya que al no considerarse las demoras programadas (colación y cambios de turno), mantenciones y fallas, el tiempo operativo de los camiones es igual al tiempo nominal, es decir, durante todo el día el camión operará de forma efectiva.

El detalle de los resultados se presenta en el Anexo B.2.

2. Se llevó a cabo una serie de simulaciones considerando un aumento y reducción de la flota de camiones. El primer escenario considerado consistió en el aumento gradual de la flota de camiones correspondiente a los circuitos productivos de mineral. Durante dicha simulación, se identificó que el aumento de la flota no incide en la cantidad de mineral a mover. Luego, el segundo escenario consistió en la disminución de la flota de camiones que transportan mineral, y se concluyó que, al reducir la flota de camiones, la productividad se mantiene respecto al caso inicial. Por lo tanto, se corrigió el número de camiones que maximiza la productividad con un menor número de camiones. Para los circuitos productivos de estéril se mantuvo la flota de camiones, mientras que para mineral se

disminuye la flota de 15 a 12 camiones. En el Anexo B.3 se presenta una gráfica con el análisis de las simulaciones realizadas.

- 3. a)** Con la corrección de la flota de camiones, el tiempo de espera en el frente de carga disminuye para los circuitos productivos de mineral, y en el caso de los circuitos productivos de estéril se mantiene ya que no hay variación de la flota respecto al caso inicial
- b)** Respecto al tiempo de espera en el frente de descarga, se logra reducir en un 74% con la nueva flota de camiones para circuitos productivos de mineral.
- c)** El factor de utilización de las palas de los circuitos productivos no presentan cambios significativos. Las palas que cargan mineral poseen menor factor de utilización que aquellas que cargan estéril.
- d)** El factor de utilización de los camiones se mantiene en un 100% ya que no se presenta variación de las condiciones de simulación asociado a mantenciones, eventos programados, entre otros.

Las gráficas solicitadas se presentan en el anexo B.4 de este informe.

### **Parte C: Máxima productividad nominal de todos los circuitos productivos**

- 1.** El frente de descarga de estéril NO y SO se ven afectado en un 33 y 29 % respectivamente, el mayor porcentaje de disminución del frente NO puede asociarse a que los lugares correspondientes al cambio de turno o locación para fallas se encuentran en un punto aparente más alejado que los correspondientes al frente SO. En cuanto al frente de descarga de la chancadora, este se ve afectado en un 31% pudiéndose explicar esta mayor disminución con el mismo razonamiento que el frente de descarga de estéril SO (Ver Anexo C.1)
- 2. a)** En el frente de carga FC\_PO\_A el tiempo de espera calculado corresponde a 1.9 min, mientras que para los frentes de carga FC\_PO\_B y FC\_PO\_C es de 0.9 y 1.2 min respectivamente. Por otro lado, en el frente de carga FC\_PO\_D se presentó un tiempo de espera de 2.84 siendo este el mayor (Ver Anexo C.2)
- b)** En el frente de descarga FD\_Dump\_NO y FD\_Dump\_SO no existe tiempo de espera, esto debido a que no se forma cola para la descarga; por otro lado en el frente de descarga FD\_CH\_S se presenta un tiempo de espera de 1.65 min asociado a la cola de camiones que se forma, sin embargo este tiempo no es excesivo (Ver Anexo C.2)
- c)** Para la pala 1 el factor corresponde a 65%, mientras que para la pala 2, 3 y 4 el factor de utilización es de 55, 53, 68 % respectivamente (Ver Anexo C.2). Estos valores tienen concordancia con el porcentaje de disminución de productividad calculado en la pregunta 1 del presente ítem.
- d)** La flota de camiones presentó un factor de utilización del 72% acorde al tiempo operativo y al tiempo efectivo que se ha visto afectado debido a las fallas, cambio de turno y colaciones (Ver Anexo C.2)
- 3. a)** El índice de disponibilidad de las palas corresponde al 80%, en concordancia con el dato establecido para este proyecto. En cuanto al índice de disponibilidad de la flota de

camiones, este es de 98% debido a que no todos los camiones fallaron en la simulación realizada por lo que este índice se sega al establecido (82%); sin embargo, los camiones que sí fallaron en la simulación cumplen con la disponibilidad del 82%.

**b)** El índice de utilización operativa para los equipos de carga y de descarga corresponde al 100% dado que el tiempo operativo y el tiempo disponible, ya que no se consideran tiempos de reserva

**c)** El factor de utilización de la pala 1 corresponde a 65%, mientras que el de las palas 2,3 y 4 es de 55, 54 y 69% respectivamente dado que este factor considera el tiempo efectivo y el operativo de cada equipo. En cuanto a la flota de camiones, el promedio del factor de utilización corresponde al 73%.

**d)** En cuanto a los equipos de carga, el índice de utilización en base nominal coincide con el factor de utilización dado que no se consideran tiempos de reserva ni de mantenimiento, por lo que el tiempo nominal coincide con el tiempo operativo. Por otro lado, el promedio del índice de utilización en base nominal de la flota de camiones corresponde a un 72% ya que se consideran el tiempo fuera de servicio que experimentaron ciertos camiones.

**e)** En el caso de los equipos de carga, el índice de utilización en base disponible coincide con el de base nominal ya que, como se mencionó anteriormente, el tiempo nominal y el tiempo disponible son iguales dado que no se considera el tiempo de mantenimiento. Asimismo, en el caso de la flota de camiones, este índice coincide con el de utilización de base nominal puesto que no todos los camiones fallaron por lo que no se considera el tiempo fuera de servicio para la totalidad de la flota. El detalle de los resultados en cuanto a los índices operacionales se encuentra en el Anexo C.3.

## **Parte D: Análisis de sensibilidad**

**1.** El frente de descarga de estéril NO aumenta en 1.73% y SO disminuye en -1.48 % respectivamente, esto porque del frente SO está lejano al punto donde se realiza el cambio de turno o locación para fallas. Para el frente de descarga de la chancadora, este se aumenta en 0.90% debido a la disminución de un 5% en el cambio de turno (Ver Anexo D.1)

**2. a)** En el frente de carga FC\_PO\_A el tiempo de espera calculado corresponde a 1.79 min, para los frentes de carga FC\_PO\_B y FC\_PO\_C es de 1.61 y 1.78 min. En el frente de carga FC\_PO\_D cuyo tiempo de espera es 2.50 min. siendo este el mayor (Ver Anexo D.2)

**b)** En el frente de descarga FD\_Dump\_NO y FD\_Dump\_SO es de 0.02 y 0.01 min.; el frente de descarga FD\_CH\_S tiene un tiempo de espera de 1.67 min. todos estos asociados a la cola de camiones (Ver Anexo D.2)

**c)** Para la pala 1 el factor de utilización corresponde al 90%, mientras que para la pala 2, 3 y 4 el factor de utilización es de 72, 73, 91% (Ver Anexo D.2)

**d)** La flota de camiones presentó un factor de utilización del 73% aumentó con respecto a la Parte C, debido a la disminución de un 5% en el cambio de turno (Ver Anexo D.2)

**3.** Para el cálculo de los índices operacionales se basó en la norma ASARCO.

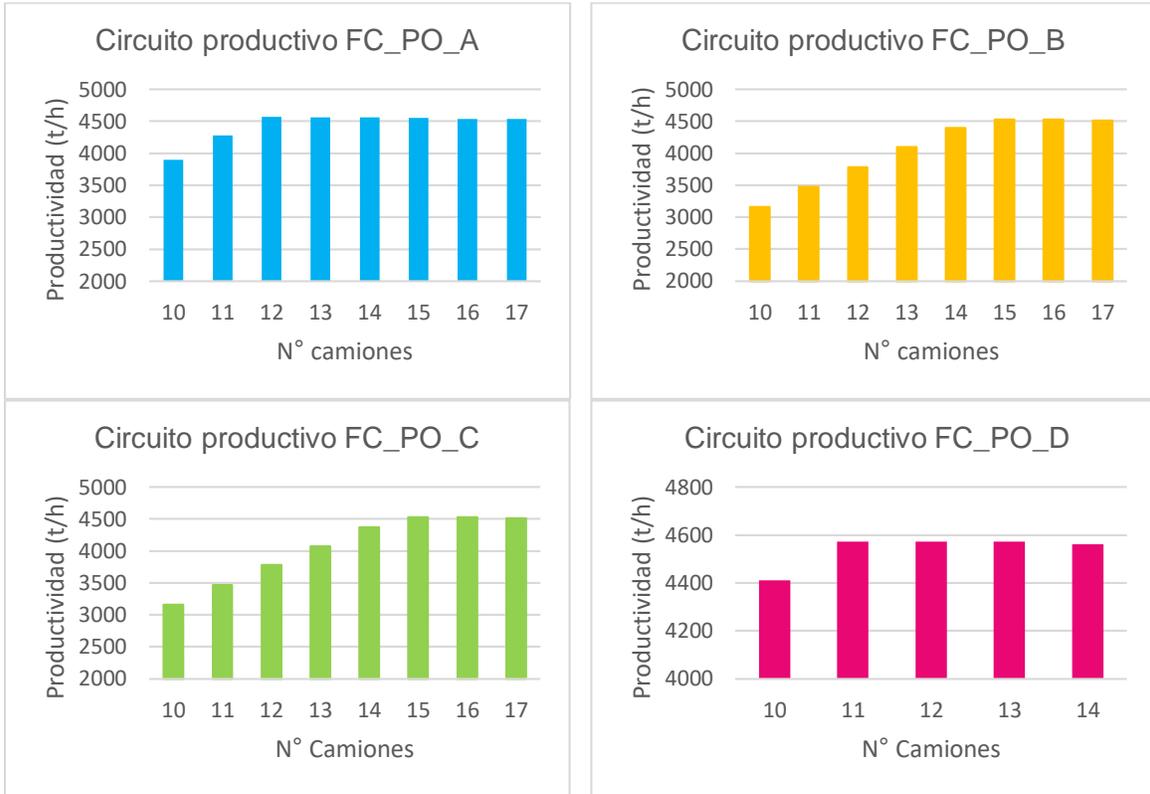
- a) El índice de disponibilidad de las palas 1,2,3 y 4 corresponde al 96, 97, 96 y 95%. La disponibilidad de la flota de camiones, es de 97% debido a que no todos los camiones fallaron en la simulación realizada.
- b) El índice de utilización operativa para los equipos de carga y de descarga es de 75%, ya que no se consideran tiempos de reserva.
- c) El factor de utilización de la pala 1 corresponde a 90%, mientras que el de las palas 2,3 y 4 es de 72, 73 y 91% respectivamente dado que este factor considera el tiempo efectivo y el operativo de cada equipo. En cuanto a la flota de camiones, el promedio del factor de utilización corresponde al 73%.
- d) Para las palas 1, 2, 3 y 4 la utilización base nominal es 65, 53, 52 y 65%, el promedio del índice de utilización en base nominal de la flota de camiones es 73% ya que se consideran el tiempo fuera de servicio que experimentaron ciertos camiones.
- e) Para las palas 1, 2, 3 y 4 la utilización base disponible es 90, 72, 73 y 91%. En flota de camiones, este índice coincide con el de utilización de base nominal puesto que no todos los camiones fallaron por lo que no se considera el tiempo fuera de servicio para la totalidad de la flota.

El detalle de los resultados en cuanto a los índices operacionales se encuentra en el Anexo D.3.

## **Conclusiones y Comentarios**

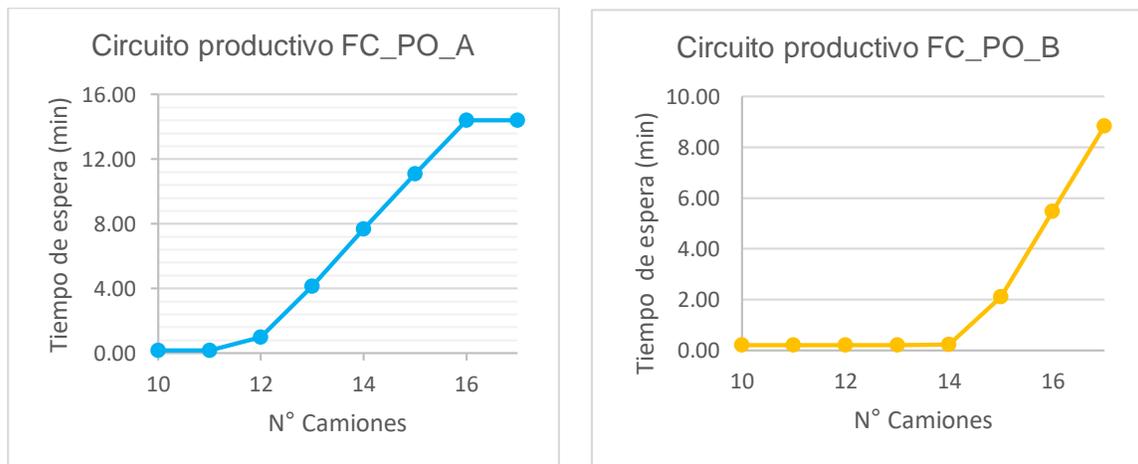
Con el presente proyecto se logró llevar a cabo la simulación de operaciones de minería a cielo abierto. El presente caso de estudio consideró cuatro circuitos productivos, dos de mineral y dos de estéril. Primero se simuló cada circuito por separado, obteniéndose así la flota de camiones mínima que garantiza la máxima productividad del circuito. Posteriormente, se realizó la sinergia de todos los circuitos productivos funcionando al unísono, lo que conllevó a una reasignación de la flota de camiones, ya que se observó una disminución de la productividad en cada uno de ellos. Esta disminución de la productividad se debe a que al existir mayor flota de equipos circulando, es más probable que se encuentren durante sus trayectorias, generándose mayores tiempos de transporte. Durante la corrección de la flota de equipos se logró disminuir la flota de camiones, satisfaciéndose la productividad obtenida en la parte A del proyecto. El siguiente escenario de simulación se consideró las demoras programadas de la operación y fallas de los equipos. En este escenario, se observó que la productividad disminuye, pues los tiempos efectivos de trabajo son menores. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad considerando 100 réplicas.

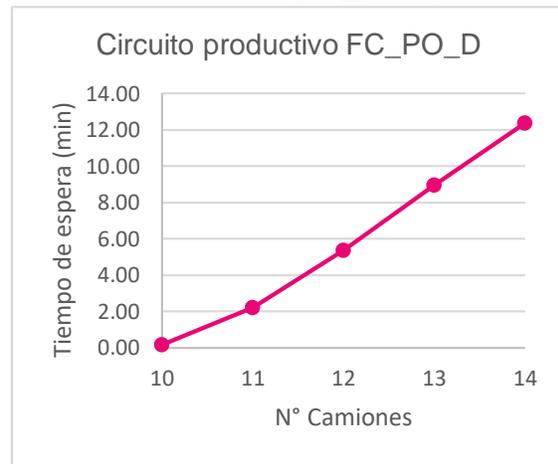
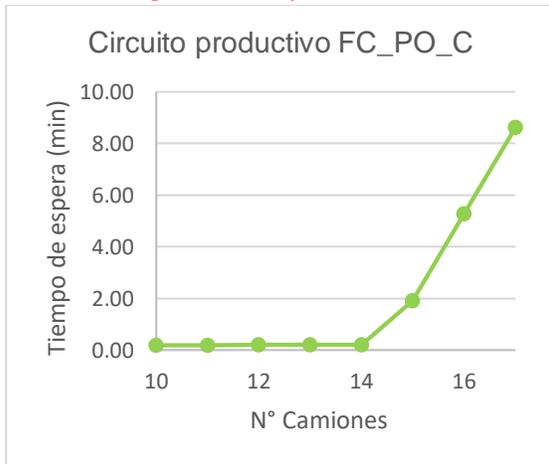
**Anexo A.1**



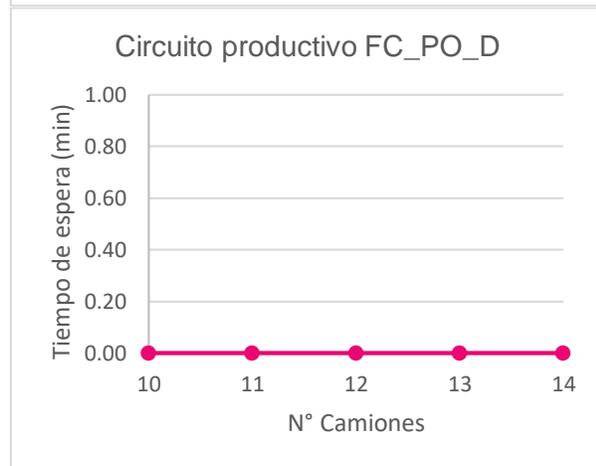
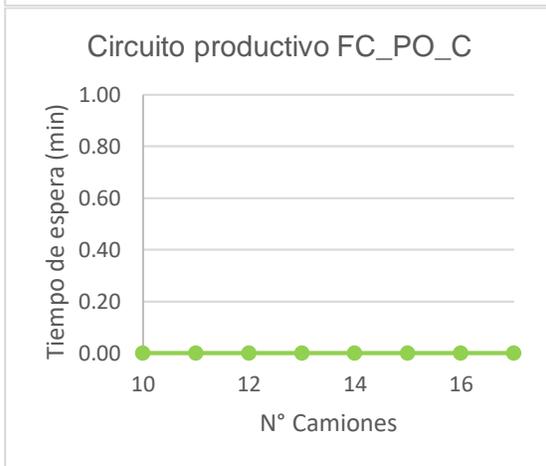
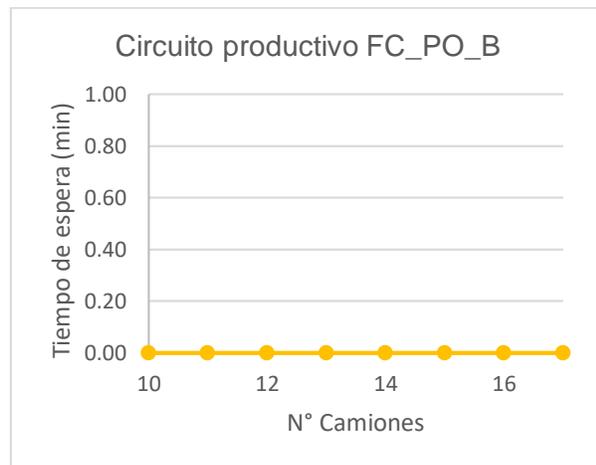
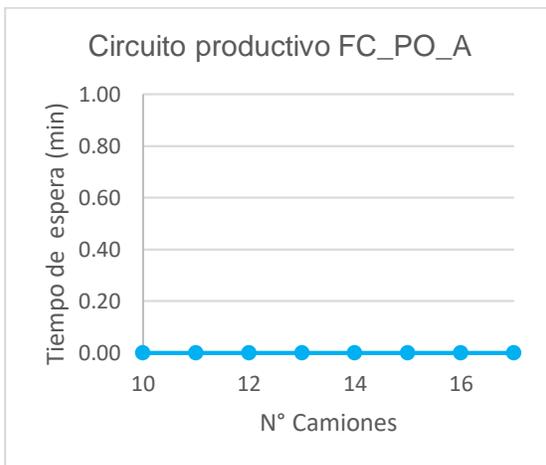
**Anexo A.2**

A continuación, se presenta el tiempo de espera en el frente de carga, en función del número de camiones:

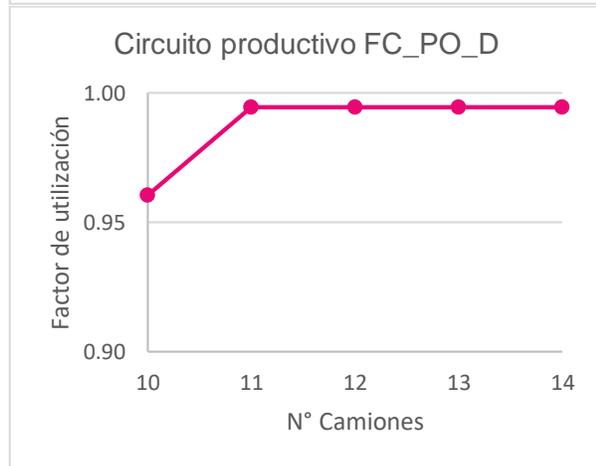
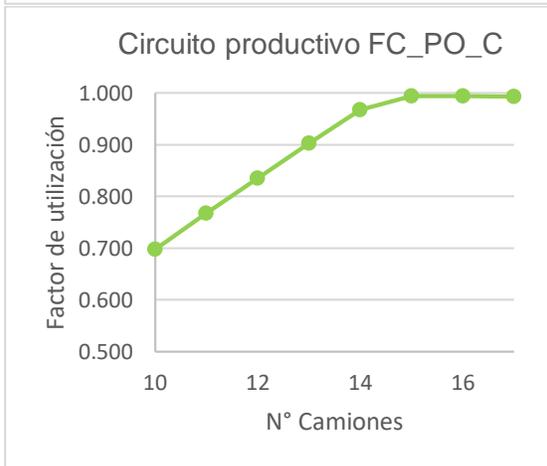
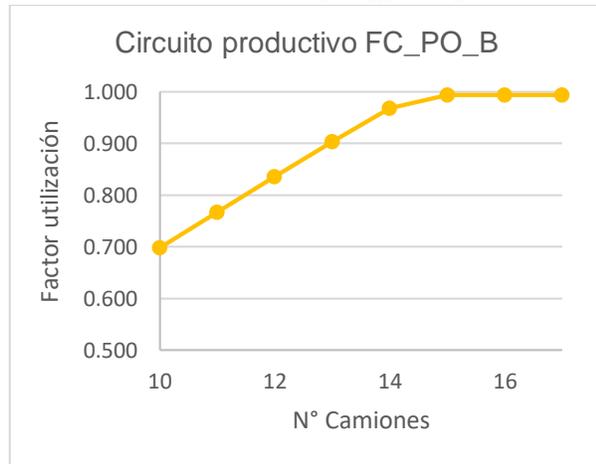
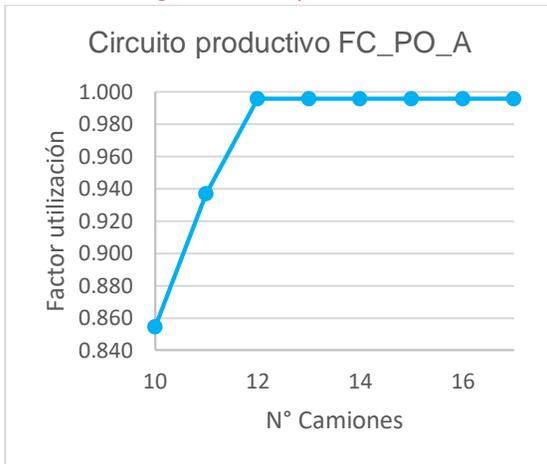




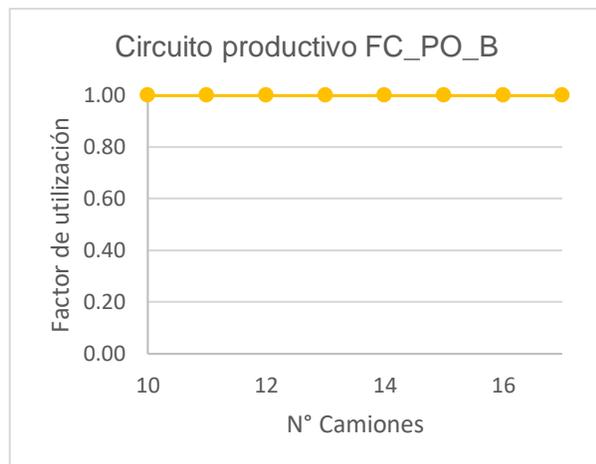
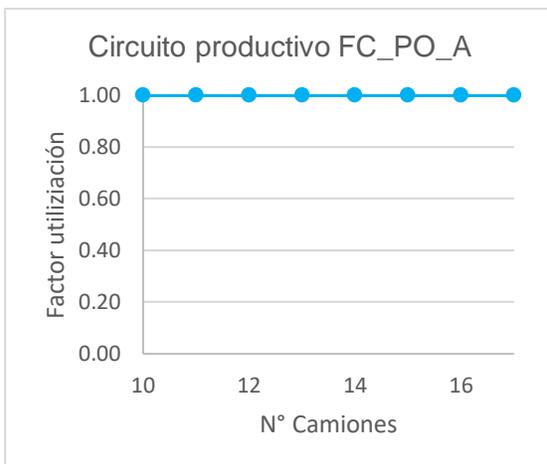
A continuación, se presenta el tiempo de espera en el frente de descarga, en función del número de camiones:

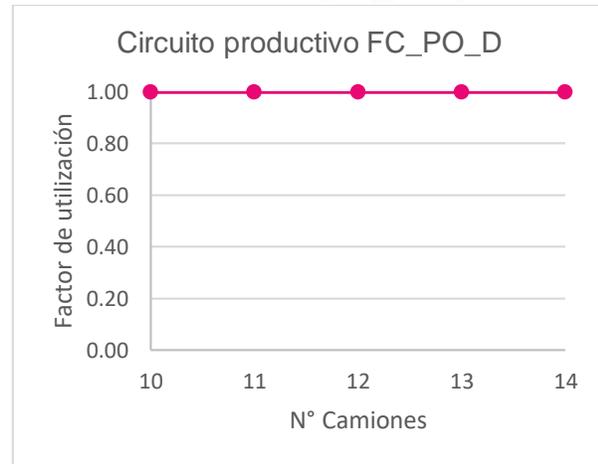
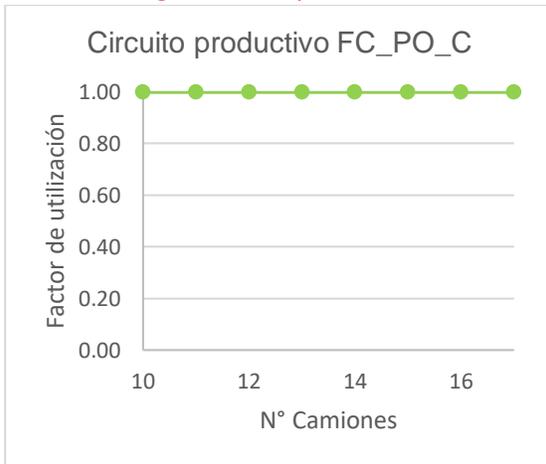


A continuación, se presenta el factor de utilización de las palas, en función del número de camiones:



A continuación, se presenta el factor de utilización promedio de la flota de camiones.





### Anexo B.1

En la siguiente tabla se observa la disminución de la productividad en cada uno de los circuitos productivos:

Circuito productivo	Productividad (t/h)		Disminución porcentual (%)
	Parte A	Parte B	
FC_PO_A	4,573	4,573	0.0
FC_PO_B	4,527	3,663	19.1
FC_PO_C	4,527	3,663	19.1
FC_PO_D	4,573	4,562	0.3

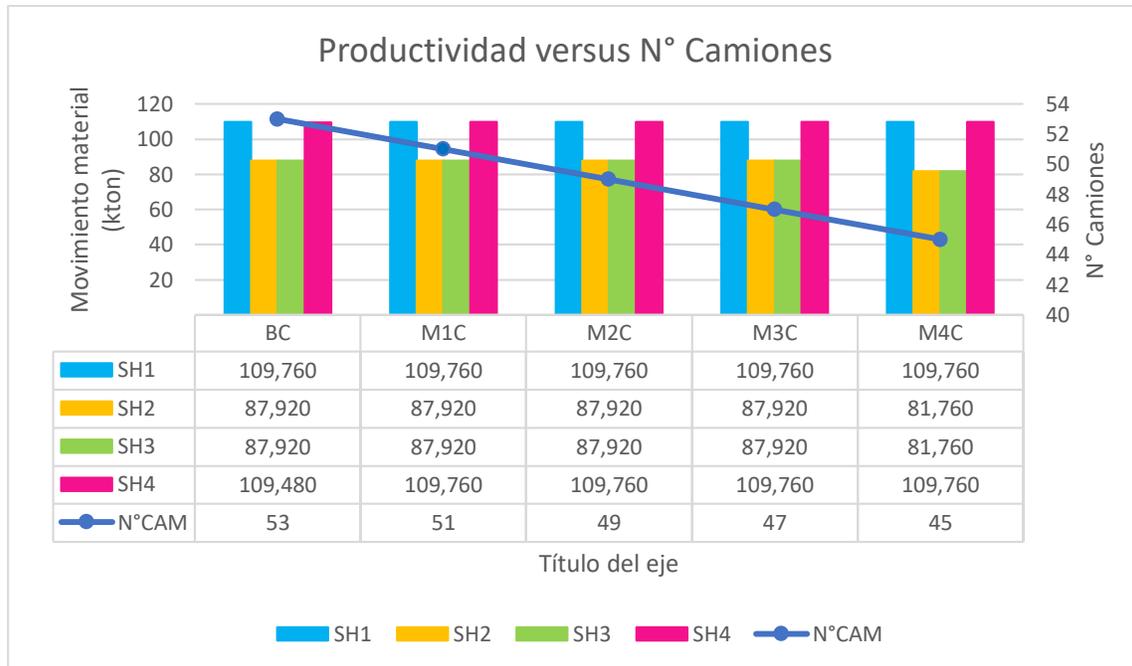
### Anexo B.2

Frente de carga	Tiempo espera (min)
FC_PO_A	0.983
FC_PO_B	0.280
FC_PO_C	0.280
FC_PO_D	1.942

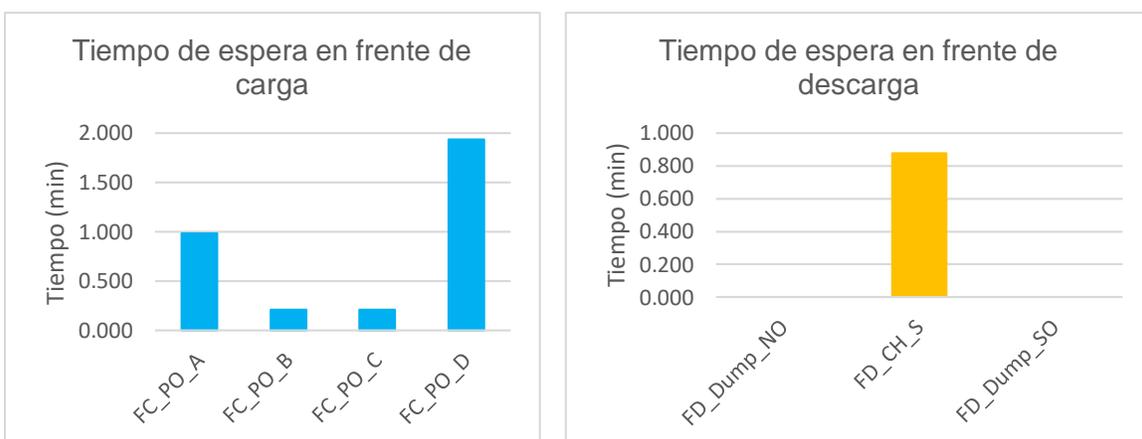
Frente de descarga	Tiempo espera (min)
FD_Dump_NO	0.000
FD_CH_S	3.421
FD_Dump_SO	0.000

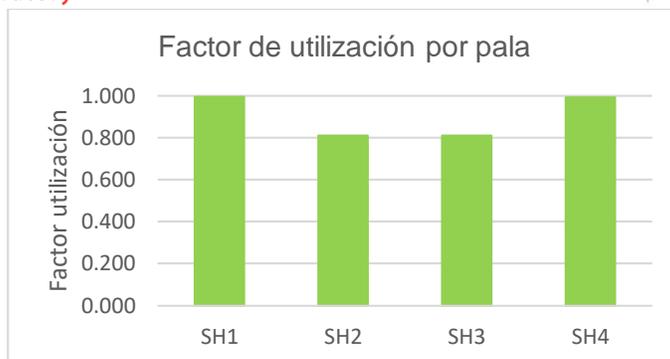
Circuito productivo	Tiempo efectivo (min)	Tiempo operativo (min)	Factor utilización
FC_PO_A	1434	1440	0.996
FC_PO_B	1177	1440	0.817
FC_PO_C	1175	1440	0.816
FC_PO_D	1425	1440	0.990

### Anexo B.3



### Anexo B.4





### Anexo C.1

Frente de Descarga	Productividad (t)		
	Parte B	Parte C	Disminución (%)
FD_DumpNO	109.760	73.080	33
FD_CH_S	87.920	61.600	30
FD_CH_S	87.920	59.640	32
FD_DumpSO	109.480	77.840	29

### Anexo C.2

Frente de carga	Tiempo espera (min)
FC_PO_A	1,968
FC_PO_B	0,952
FC_PO_C	1,204
FC_PO_D	2,874

Frente de descarga	Tiempo espera (min)
FD_Dump_NO	0,000
FD_CH_S	1,675
FD_Dump_SO	0,000

Equipo de carga	Tiempo efectivo (min)	Tiempo operativo (min)	Factor utilización (%)
SH1	937,29	1440,00	65,09%
SH2	794,74	1440,00	55,19%
SH3	773,48	1440,00	53,71%
SH4	990,26	1440,00	68,77%

### Anexo C.3

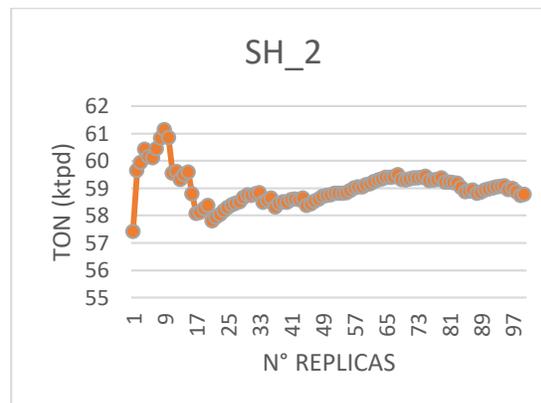
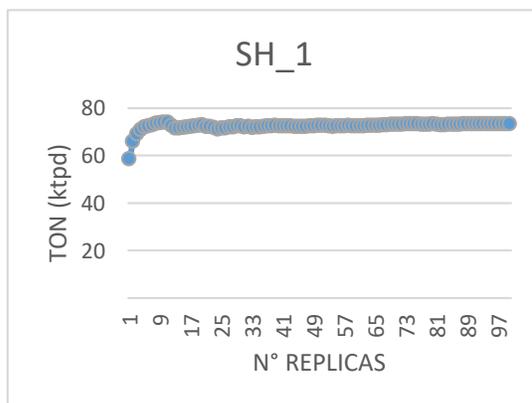
Equipos de carga	Efectivo (min)	Pérdida Operacional (min)	Reserva Programada (min)	Total general (min)
SH1	937	116	387	1440
SH2	795	255	390	1440
SH3	773	277	389	1440
SH4	990	61	389	1440

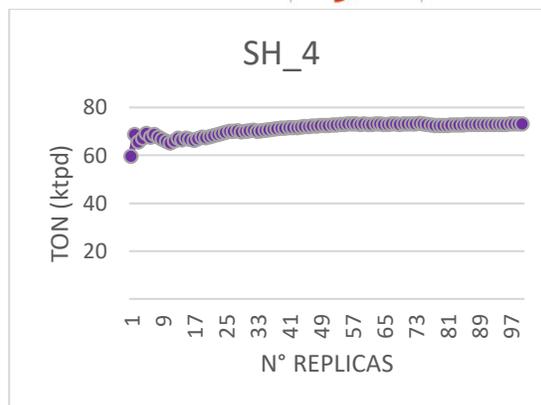
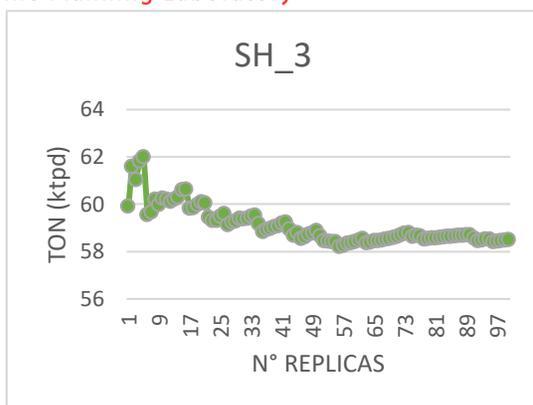
Equipos de carga	Disponibilidad (%)	Utilización Operativa (%)	Factor de utilización	Utilización en Base Nominal	Utilización en Base Disponible
SH1	80%	100,00%	65%	65%	65%
SH2	80%	100,00%	55%	55%	55%
SH3	80%	100,00%	54%	54%	54%
SH4	80%	100,00%	69%	69%	69%

Índice Operacional promedio de la flota de camiones	
Disponibilidad (%)	98
Utilización Operativa (%)	100
Factor de utilización (%)	73
Utilización en base nominal (%)	72
Utilización en base disponible (%)	73

### Anexo D.1

Frente de Descarga	Toneladas	TPH	Toneladas	TPH	Variación
FD_CH_S	116,217	4,842	117,278	4,887	0.90%
FD_DumpNO	71,952	2,998	73,217	3,051	1.73%
FD_DumpSO	74,248	3,094	73,161	3,048	-1.48%





## Anexo D.2

Frente de Carga	Promedio de Load Delay (min)	Promedio de Dump Delay (min)	Promedio de Dump Delay (min)	Promedio de Prepark Delay (min)	Promedio de Park Delay (min)	Tiempo de espera promedio (min)
FC_PO_A	0.183	0	0	0.465	1.141	1.789
FC_PO_B	0.066	0.343	0.386	0.380	0.778	1.952
FC_PO_C	0.094	0.272	0.357	0.474	0.852	2.049
FC_PO_D	0.317	0.000	0	0.432	1.755	2.504

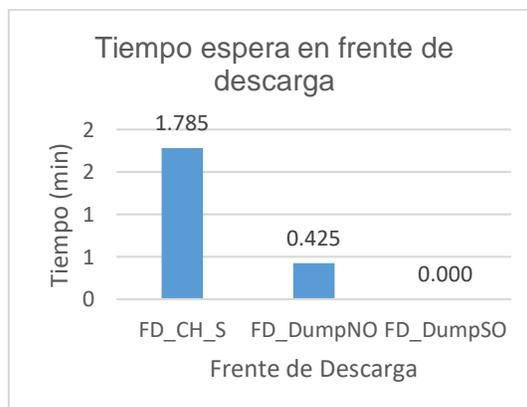
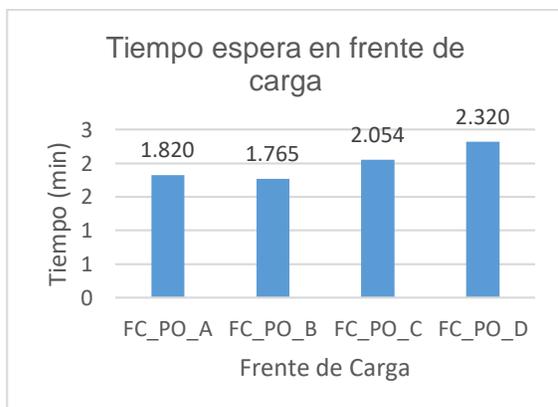
Frente de Descarga	Promedio de Load Delay (min)	Promedio de Dump Delay (min)	Promedio de Dump Delay (min)	Promedio de Prepark Delay (min)	Promedio de Park Delay (min)	Tiempo de espera promedio (min)
FD_CH_S	0.080	0.307	0.024	0.332	1.004	1.747
FD_DumpNO	0.183	0	0.024	0	0	0.207
FD_DumpSO	0.317	0	0.004	0.001	0.001	0.322

## Anexo D.3

Índices operacionales flota de camiones	
Tiempo Efectivo (min)	1049.35
Tiempo Operativo (min)	1049.35
Tiempo Disponible (min)	1392.84
Tiempo Nominal (min)	1439.57
Disponibilidad	97%
Utilización Operativa	75%
Factor de Utilización	73%
Utilización en Base Nominal	73%

Utilización en Base Disponible	73%
--------------------------------	-----

Índices operacionales de las palas	SH_1	SH_2	SH_3	SH_4
Tiempo Efectivo (min)	933	758	755	931
Tiempo Operativo (min)	1040	1046	1040	1023
Tiempo Disponible (min)	1388	1394	1388	1371
Tiempo Nominal (min)	1440	1440	1440	1440
Factor de Utilización	90%	72%	73%	91%
Disponibilidad	96%	97%	96%	95%
Utilización Operativa	75%	75%	75%	75%
Factor de Utilización	90%	72%	73%	91%
Utilización en Base Nominal	65%	53%	52%	65%
Utilización en Base Disponible	90%	72%	73%	91%



# Camiones	61
Tiempo Efectivo (min)	1057.27
Tiempo Operativo (min)	1057.27
Tiempo Disponible (min)	1387.03
Tiempo Nominal (min)	1439.57
Factor de Utilización	73%

# Pala	Tiempo Efectivo (min)	Tiempo Operativo (min)	Tiempo Disponible (min)	Tiempo Nominal (min)	Factor de Utilización
SH_1	1029.40	1092.94	1440.00	1440	94%
SH_2	946.48	1092.39	1440.00	1440	87%
SH_3	938.43	1090.62	1440.00	1440	86%
SH_4	976.81	1090.62	1440.00	1440	90%

