



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**OPTIMIZACIÓN DE LAS HORAS OPERATIVAS DE LOS CAEX EN LOS PROCESOS
DE DESCARGA EN CHANCADO Y ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE,
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MODELAMIENTOS COMPUESTOS Y REDES
NEURONALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ROBERTO IGNACIO GONZÁLEZ GAZMURI

PROFESOR GUÍA:

MANUEL SOTO OLMEDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SEBASTIÁN CARMONA CALDERA

JORGE PALMA VILLAGRÁN

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Roberto Ignacio González Gazmuri
FECHA: 9 de julio, 2016
PROFESOR GUÍA: Manuel Soto Olmedo

**OPTIMIZACIÓN DE LAS HORAS OPERATIVAS DE LOS CAEX EN LOS PROCESOS
DE DESCARGA EN CHANCADO Y ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE,
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MODELAMIENTOS COMPUESTOS Y REDES
NEURONALES**

En el último tiempo, el precio del cobre se ha estado transando con una tendencia sostenida a la baja, lo que ha conllevado implementar un conjunto de medidas a nivel nacional e internacional, para lograr una reducción de costos e incrementos en la productividad de los procesos.

Actualmente, los sistemas de asignación dinámica como Jigsaw o Modular no se encargan del reabastecimiento de combustible, el cual es llevado a cabo de manera manual, y este es realizado cuando el equipo notifica que está cercano a la reserva. Por otra parte, estos softwares una vez asignado a descarga el material, no analiza las características de la carga que se transporta en cada camión, por lo que este proceso consiste en que el primero en llegar es el que realiza la actividad.

Este trabajo se centró en recuperar tiempos perdidos de los camiones de extracción en las operaciones a cielo abierto de la gran minería, para mejorar el proceso productivo. Esto se logra mediante la implementación de modelos de redes neuronales, usados para la predicción de información, y modelos de optimización, los cuales usarán lo predicho para mejorar el transporte, en los procesos de chancado y abastecimiento de combustible. Para el caso de estudio se tomó una base de datos de 6 meses, contados a partir de febrero del 2015, de una faena donde el movimiento de material es de aproximadamente 450 KTPD y cuenta con una flota efectiva de 54 CAEX.

En cuanto al proceso de optimización de chancado, se logró que mediante una red neuronal se predijera el tiempo de proceso de cada carga y luego, se reorganizara el sistema de descarga teniendo en consideración este nuevo parámetro. Considerando un circuito de 5 km de distancia y con una flota 11 CAEX, se consiguió incrementar la utilización de los equipos de transporte en un 1,9% y el tonelaje procesado en un 2,4% en promedio, con una desviación estándar de 0,4% y 0,6% respectivamente, para 10.000 simulaciones, esto implica un ingreso adicional de 16,8 MUS\$/año por cada chancador en faena de características similares. En el caso de que se aumentará el largo del circuito, se deberá incrementar el número de camiones, para conseguir los mismos resultados.

Para el proceso de abastecimiento de combustible, la red neuronal predice el consumo del equipo, para posteriormente con un modelo de asignación dinámica, crear un proceso autónomo de envió a las diferentes estaciones. En un escenario de 60 CAEX en circulación y con dos petroleras, se generó una reducción de un 65% aproximadamente en la espera de cada camión para reabastecer. Adicionalmente, disminuye el número de recargas necesarias en periodos mayores a una semana, gracias a rellenar más litros por visita. Lo anterior, significó un incremento de un 3,2% en la utilización de los camiones de extracción.

Para asegurar la fidelidad de los resultados presentados anteriormente, se realizó un test de confianza al 95%, para descartar que los beneficios fueron aleatorios. De este se concluyó que los valores señalados son estadísticamente significativos. Por último, con estos desarrollos una faena puede recuperar de manera rápida, gracias a algoritmos de predicción y optimización, y a un bajo costo de implementación y operación, tiempos perdidos en sus activos, con lo que se generará mayores ingresos para el negocio.

**ABSTRACT OF THE SUBMITTED THESIS TO
OBTAIN THE DEGREE OF:** Mining Engineer
BY: Roberto Ignacio González Gazmuri
DATE: July 9th, 2016
THESIS ADVISOR: Manuel Soto Olmedo

**OPTIMIZATION OF THE OPERATING HOURS OF HAUL TRUCKS IN THE
PROCESS OF UNLOAD IN CRUSHING AND REFUELING, BY USING NEURAL
NETWORKS AND COMPOUNDS MODELS.**

The copper mining industry is currently experiencing a low-price crisis, which has led to a series of measures at national and international level, to reduce costs and improve productivity in operational processes.

Currently, dynamic allocation systems as Jigsaw or Modular is not responsible for the refueling, which is carried out manually and is performed when the operator notifies that his equipment is close to the reserve. Moreover, this software once assigned the discharge point, does not analyze the type of material carried in each haul truck, so this process is the first to arrive is the one who performs the activity.

This work focused on recovering some of the wasted time of haul trucks in large open pit operation to improve the production process. This is achieved by implementing neural network models used for forecasting information, and optimization models, which will use this predicted data to improve transport in the processes of crushing and refueling. For the case study it was used a database of 6 months, from February 2015. The mine company has a production of approximately 450 KTPD material and an effective fleet of 54 CAEX.

As for the crushing optimization process, this was succeeded using a neural network that predicted the processing time of each charge. Then, with this information the discharge order was reorganized in crushing in view of this new parameter. Now, considering a 5 km circuit and a fleet of 11 trucks, there was an increase of the utilization of the equipment's on that circuit by 1.9% and 2.4% of extra throughput tonnage, with a standard deviation of 0.4% and 0.6%. This implies an additional income of 16.8 MUS \$ / year for each crusher in the mine. In the case the circuit length increase, the same needs to happen with the truck fleet to achieve the same results.

For the refueling process, the neural network predicts the fuel consumption of the equipment. Later a dynamic allocation model, create an autonomous sending process to different fuel stations. If it is consider a case with 60 haul trucks in circulation and two available stations. This results in a reduction of approximately 65% of the waiting of each truck to restock. Further on, it was also decreases the number of loads, thanks to fill more liters per visit. Finally, this means an increase of 3.2% in the utilization of haulage equipment.

To ensure that the results presented above, has a 95% of confidence, it was performed a test to determinate that the benefits were not randomized. This test concluded that the indicated values are statistically significant. With these improvements, a mine company can recover quickly, thanks to predictive and optimization algorithm, and for a low cost strategy, wasted time in their assets and improve revenues for the business.

A mi familia y todas las personas que esto involucra, las cuales me han apoyado en este proceso y en todos los proyectos que me propongo.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quisiera agradecer a mi hermosa familia, quienes son el pilar fundamental de mi vida, y me han otorgado un apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida. Gracias por su apoyo y buenos deseos, y su constante cariño que me permitieron conseguir mis objetivos con orgullo y serenidad.

Agradezco a mi querida Nicole, por ser mi amiga y compañera durante estos años, por entregarme su cariño, amor y amistad, en especial durante las semanas de redacción, en donde su apoyo fue clave para continuar y finalizar este trabajo con dedicación.

Agradezco a mi mascota, Tylo, mi querido perro, por estar a mi lado durante los días y noches de análisis, preparación y redacción, con tu fidelidad incomparable y tu alegría, que me otorgaron tranquilidad en estos momentos decisivos.

Gracias a Manuel Soto por la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y el apoyo entregado durante todos estos meses, siendo una persona de grandes valores y principios, agradezco su liderazgo y consejos que me han permitido establecer un rumbo para mi persona a futuro.

Gracias a Sebastián Carmona por sus consejos certeros y consecuentes con respecto al trabajo. Por último, a Jorge Palma por aceptar ser el profesor integrante en las instancias finales de este trabajo, y por su excelente disposición a apoyar este trabajo.

Dar las más sinceras gracias a Carlos Alvarado por su total apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo, sobre todo por su dedicación en aquellas largas horas de trabajo, quien fue una persona realmente importante para la culminación y cierre de este proceso. A si mismo, agradezco a Gonzalo Donoso, por su apoyo en revisar este trabajo, así como por sus excelentes recomendaciones, que me permitieron refinar y finalizar este trabajo.

Finalmente, agradezco a mis queridos profesores, comunidad universitaria quien me acompañó durante todos estos años, que me han permitido formar un nuevo núcleo dentro de mi persona, que no solamente es intelectual, sino que también es parte de mi ser por hoy y siempre.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	Introducción	1
1.1	Motivación del trabajo	2
1.1.1	Optimización del Proceso de descarga en Chancado	2
1.1.2	Optimización del Proceso de Abastecimiento de Combustible.....	3
1.2	Objetivos.....	4
1.2.1	Objetivo General.....	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Alcances.....	4
CAPITULO 2	Antecedentes	5
2.1	Gestión del Tiempo.....	5
2.2	Ciclo de Transporte.....	6
2.3	Proceso de Chancado	7
2.4	Proceso de Abastecimiento de Combustible.....	8
2.5	Ingreso Monetario.....	8
2.6	Redes Neuronales	9
2.7	Consumo de combustible en los Camiones de Extracción	13
CAPITULO 3	Metodología	16
3.1	Etapas 1: Determinación de variables significativas.....	16
3.2	Etapas 2: Obtención de datos.	16
3.3	Etapas 3: Construcción de modelos de ANN y optimización.	17
3.4	Etapas 4: Entrenamiento de redes neuronales	17
3.5	Etapas 5: Simulación de escenarios.....	17
3.6	Etapas 6: Conclusiones y recomendaciones	17
CAPITULO 4	Obtención de Datos	18
CAPITULO 5	Resultados y análisis	21
5.1	Proceso de Chancado	21
5.1.1	Red Neuronal – Chancado.....	21
5.1.2	Proceso de optimización del Chancado	23
5.1.3	Simulaciones del Proceso de Chancado	24

5.1.4	Modelamiento.....	25
5.1.5	Tiempo de espera en Chancado	25
5.1.6	Resumen de resultados – Chancado	28
5.2	Proceso de Abastecimiento de Combustible.....	32
5.2.1	Red Neuronal – Abastecimiento de Combustible.....	32
5.2.2	Proceso de optimización del abastecimiento de combustible.....	33
5.2.3	Simulaciones del Proceso de Abastecimiento de Combustible	37
5.2.4	Modelamiento.....	38
5.2.5	Tiempo de espera en abastecimiento de combustible.....	39
5.2.6	Resumen de resultados – Abastecimiento de Combustible	41
CAPITULO 6 Conclusiones Y Recomendaciones		42
6.1	Conclusiones	42
6.2	Recomendaciones	43
CAPITULO 7 Bibliografía.....		45
CAPITULO 8 Anexos.....		46
8.1	Anexo A: Contexto Empresa	46
8.1.1	Visión	46
8.1.2	Misión.....	46
8.1.3	Sectores de Negocio	47
8.2	Anexo B: Curvas de probabilidad para los parámetros de entrada.....	50
8.2.1	Tiempo de aculatamiento.....	50
8.2.2	Tiempo de Carguío	52
8.2.3	Tiempo de Descarga	53
8.2.4	Tonelajes.....	55
8.2.5	Tiempos de Viajes	56
8.2.6	Tiempo excavación pala.	64
8.3	Anexo C: Histogramas para los resultados obtenidos	66
8.3.1	Optimización del Proceso de Chancado	66
8.3.2	Optimización del Proceso de Abastecimiento de Combustible.....	76
8.4	Anexo D: Resultados de simulaciones de chancado.....	78
8.5	Anexo E: Resultados de simulaciones de abastecimiento de combustible	79
8.6	Anexo F: Test de confiabilidad estadística	81

8.6.1 Chancado 81

8.6.2 Abastecimiento de Combustible..... 81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: Valores típicos para resistencia al rodado (Fuente Soofastaei et al, 2016).....	13
Tabla II: Ejemplo conjunto de datos para entrenamiento - Red Chancado	19
Tabla III: Ejemplo conjunto de datos para entrenamiento de un CAEX - Red Consumo de Combustible.....	20
Tabla IV: Variación indicadores con respecto al caso base	27
Tabla V: Resultados Simulación - 40 CAEX	39
Tabla VI: Resultados Simulación – 60 CAEX	39
Tabla VII: Resultados Simulación - 80 CAEX	40
Tabla VIII: Resultados Simulación - 100 CAEX	40
Tabla IX: Ranking de empresas líderes en tecnología en minería.	49
Tabla X: Resumen Tiempo de Acuatamiento	51
Tabla XI: Resumen Tiempo de Carguío.....	53
Tabla XII: Resumen Tiempo de Descarga	54
Tabla XIII: Resumen Tonelajes.....	56
Tabla XIV: Resumen Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Chancado).....	57
Tabla XV: Resumen Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Chancado)	58
Tabla XVI: Resumen Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Botadero)	60
Tabla XVII: Resumen Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Botadero).....	61
Tabla XVIII: Resumen Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Stockpile)	62
Tabla XIX: Resumen Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Stockpile).....	64
Tabla XX: Resumen Tiempo de Excavación Pala.....	65
Tabla XXI: Resumen Resultados Simulaciones Proceso de Chancado	78
Tabla XXII: Datos para construcción de Gráfico Tonelaje e Ingreso por Mes.....	78
Tabla XXIII: Resultados abastecimiento de combustible - 40 CAEX	79
Tabla XXIV: Resultados abastecimiento de combustible - 60 CAEX.....	79
Tabla XXV: Resultados abastecimiento de combustible - 80 CAEX	79
Tabla XXVI: Resultados abastecimiento de combustible - 100 CAEX.....	79
Tabla XXVII: Datos para construcción de gráfica de resumen de resultados.....	80

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Precio del Cobre entre los años 2001 y 2016 (Fuente COCHILCO).	1
Ilustración 2: Camiones llegando al proceso de chancado.	2
Ilustración 3: Camiones con Fragmentación Fina, media y bolón, respectivamente.	2
Ilustración 4: Estación petrolera con fila de camiones (izquierda) y vacía (derecha).	3
Ilustración 5: GPS Equipos de Transporte.	3
Ilustración 6: Gestión del tiempo (Fuente Norma ASARCO).	5
Ilustración 7: Parámetros que componen las demoras (Fuente Norma ASARCO).	5
Ilustración 8: Ciclo de transporte (Fuente J. Gómez, 2011).	6
Ilustración 9: Posiciones 1 y 2 para descarga (Fuente W. Ayala, 2014).	7
Ilustración 10: Procesos General de Abastecimiento de Combustible.	8
Ilustración 11: Arquitectura tipo de red neuronal (Fuente Cardinal, 2016)	9
Ilustración 12: Red Neuronal – Aprendizaje Supervisado (Fuente Krose et al, 1996).	10
Ilustración 13: Red Neuronal – Aprendizaje No Supervisado (Fuente Krose et al, 1996).	10
Ilustración 14: Red Neuronal – Aprendizaje por Refuerzo (Fuente Krose et al, 1996).	10
Ilustración 15: Error asociado al número de muestras (Fuente Krose et al, 1996).	11
Ilustración 16: Error asociado al número de capas intermedias (Fuente Krose et al, 1996).	11
Ilustración 17: Red Auto-Organizada ART (Fuente Krose et al, 1996).	12
Ilustración 18: Resistencia a la pendiente (Fuente Soofastaei et al, 2016).	14
Ilustración 19: Estimación red vs consumo real (Fuente Soofastaei et al, 2016).	14
Ilustración 20: Parámetros clave para el consumo de combustible (Fuente Soofastaei et al, 2016).	15
Ilustración 21: Etapas de la Metodología	16
Ilustración 22: Arquitectura Red Neuronal Chancado.	22
Ilustración 23: Etapas del proceso general de optimización del Chancado.	23
Ilustración 24: Modelo de Ordenamiento y Geocerca.	24
Ilustración 25: Modelo Conceptual - Chancado.	25
Ilustración 26: Espera Promedio en Chancado - Caso 5 y 6 CAEX.	25
Ilustración 27: Espera Promedio en Chancado - Caso 7 y 8 CAEX.	26
Ilustración 28: Espera Promedio en Chancado - Caso 9 y 10 CAEX.	26
Ilustración 29: Espera Promedio en Chancado - Caso 11 y 12 CAEX.	26
Ilustración 30: Espera Promedio en Chancado - Caso 13 y 14 CAEX.	26
Ilustración 31: Variación indicadores con respecto al caso base	27
Ilustración 32: Resumen de Resultados – Chancado.	29
Ilustración 33: Toneladas e Ingresos adicionales por mes – Chancado.	29
Ilustración 34: Ganancia porcentual respecto al caso base.	30
Ilustración 35: Caso 1 – Circuito de Chancado No Saturado.	30
Ilustración 36: Caso 2 – Circuito de Chancado Saturado.	31
Ilustración 37: Caso 3 – Circuito de Chancado Sobresaturado.	31
Ilustración 38: Arquitectura Red Neuronal Abastecimiento de Combustible.	33
Ilustración 39: Trayectos entre orígenes (izquierda), destinos (centro) y petroleras (derecha). ...	34
Ilustración 40: Caso 1 de asignación dinámica – Abastecimiento de Combustible.	35
Ilustración 41: Caso 2 de asignación dinámica – Abastecimiento de Combustible.	36
Ilustración 42: Caso 3 de asignación dinámica – Abastecimiento de Combustible.	37
Ilustración 43: Modelo Conceptual - Abastecimiento de Combustible Parte 1	38
Ilustración 44: Modelo Conceptual - Abastecimiento de Combustible Parte 2.	39
Ilustración 45: Resumen Resultados – Abastecimiento de Combustible	41

Ilustración 46: Principales enfoques de Hexagon.....	46
Ilustración 47: Sectores de Negocios – Hexagon (Fuente: Presentación Corporativa).....	47
Ilustración 48: Ventas y márgenes anuales de Hexagon (Fuente: Presentación Corporativa).	48
Ilustración 49: Ingresos por área de negocio - Hexagon (Fuente: Presentación Corporativa).	48
Ilustración 50: Histograma de datos - Tiempo de Acumulamiento	51
Ilustración 51: Gráfica de probabilidad de Tiempo de Acumulamiento	51
Ilustración 52: Histograma de datos - Tiempo de Carguío.....	52
Ilustración 53: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Carguío.....	53
Ilustración 54: Histograma de datos - Tiempo de Descarga.....	54
Ilustración 55: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Descarga.....	54
Ilustración 56: Histograma de datos – Tonelajes.....	55
Ilustración 57: Gráfica de probabilidad - Tonelajes	55
Ilustración 58: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Chancado)	56
Ilustración 59: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Chancado)	57
Ilustración 60: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Vacío (Pala - Chancado)	58
Ilustración 61: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Vacío (Pala - Chancado)	58
Ilustración 62: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Botadero).....	59
Ilustración 63: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Botadero).....	59
Ilustración 64: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Botadero)	60
Ilustración 65: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Botadero)	61
Ilustración 66: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Stockpile).....	62
Ilustración 67: Gráfica de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Stockpile)	62
Ilustración 68: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Stockpile).....	63
Ilustración 69: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Stockpile).....	63
Ilustración 70: Histograma de datos - Tiempo de Excavación Pala	64
Ilustración 71: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Excavación Pala.....	65
Ilustración 72: Espera total en Chancado - Caso 5 CAEX.....	66
Ilustración 73: Espera total en Chancado - Caso 6 CAEX.....	66
Ilustración 74: Espera total en Chancado - Caso 7 CAEX.....	67
Ilustración 75: Espera total en Chancado - Caso 8 CAEX.....	67
Ilustración 76: Espera total en Chancado - Caso 9 CAEX.....	67
Ilustración 77: Espera total en Chancado - Caso 10 CAEX.....	68
Ilustración 78: Espera total en Chancado - Caso 11 CAEX.....	68
Ilustración 79: Espera total en Chancado - Caso 12 CAEX.....	68
Ilustración 80: Espera total en Chancado - Caso 13 CAEX.....	69
Ilustración 81: Espera total en Chancado - Caso 14 CAEX.....	69
Ilustración 82: Utilización de los CAEX - Caso 5 CAEX.....	69
Ilustración 83: Utilización de los CAEX - Caso 6 CAEX.....	70
Ilustración 84: Utilización de los CAEX - Caso 7 CAEX.....	70
Ilustración 85: Utilización de los CAEX - Caso 8 CAEX.....	70
Ilustración 86: Utilización de los CAEX - Caso 9 CAEX.....	71
Ilustración 87: Utilización de los CAEX - Caso 10 CAEX.....	71
Ilustración 88: Utilización de los CAEX - Caso 11 CAEX.....	71
Ilustración 89: Utilización de los CAEX - Caso 12 CAEX.....	72
Ilustración 90: Utilización de los CAEX - Caso 13 CAEX.....	72
Ilustración 91: Utilización de los CAEX - Caso 14 CAEX.....	72
Ilustración 92: Tonelaje Procesado - Caso 5 CAEX	73
Ilustración 93: Tonelaje Procesado - Caso 6 CAEX	73

Ilustración 94: Tonelaje Procesado - Caso 7 CAEX	73
Ilustración 95: Tonelaje Procesado - Caso 8 CAEX	74
Ilustración 96: Tonelaje Procesado - Caso 9 CAEX	74
Ilustración 97: Tonelaje Procesado - Caso 10 CAEX	74
Ilustración 98: Tonelaje Procesado - Caso 11 CAEX	75
Ilustración 99: Tonelaje Procesado - Caso 12 CAEX	75
Ilustración 100: Tonelaje Procesado - Caso 13 CAEX	75
Ilustración 101: Tonelaje Procesado - Caso 14 CAEX	76
Ilustración 102: Espera Promedio en Petrolera	76
Ilustración 103: Litros promedio por carga en petrolera	77
Ilustración 104: Confiabilidad de Datos Chancado	81
Ilustración 105: Confiabilidad de Datos Abastecimiento de Cobustible.....	81

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

El momento que se está viviendo a nivel mundial en la industria minera del cobre, el cual consiste en un escenario en donde se ha experimentado una baja sostenida del precio del mineral en los últimos años, como se observa en la ilustración 1, hace necesaria la optimización de los procesos con la finalidad de aumentar la productividad y reducir los costos, para de esta forma mantenerse rentables y con sólida posición competitiva.

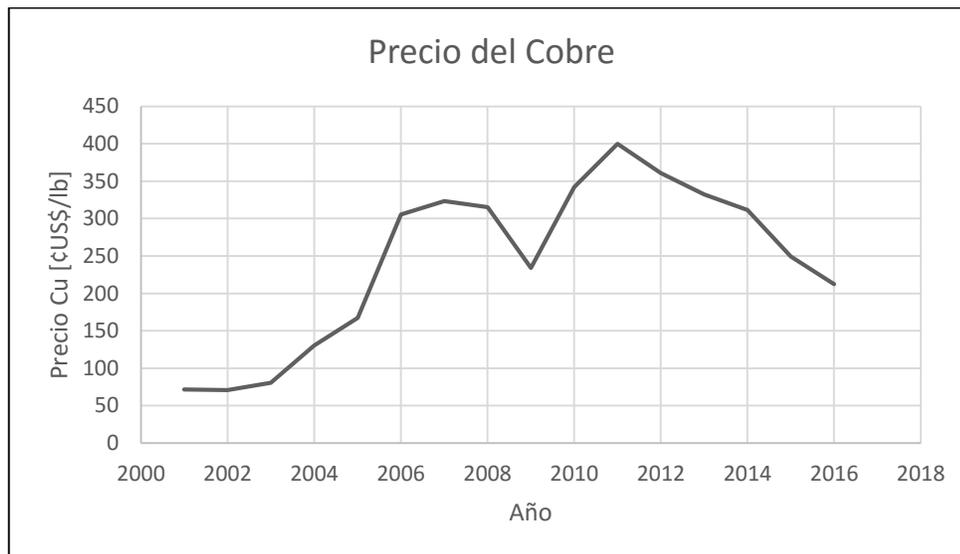


Ilustración 1: Precio del Cobre entre los años 2001 y 2016 (Fuente COCHILCO).

Bajo el contexto anterior, se ha intentado optimizar las operaciones de carguío y transporte y constantemente se ha estudiado la factibilidad de implementar nuevas tecnologías, que logren las mejoras productivas necesarias. Por lo tanto, es muy importante una correcta utilización de los equipos de transporte, ya que son recursos escasos en algunas de las operaciones mineras, generando el cuello de botella del proceso productivo de la mina (Carvajal, 2015). En otras palabras, esto significa que la capacidad de transporte es inferior a la capacidad de carguío, en estas condiciones se hace referencia a que la mina esta sobrecargada. Por lo que un pequeño incremento en la utilización de estos activos, generará beneficios adicionales significativos.

Los equipos de transporte o camiones de extracción (CAEX), son aquellos encargados de trasladar el material de un origen a un destino, específicamente desde un equipo de carguío a un sector diseñado para descargar, el cual dependerá del tipo de material que acarreen. La producción de una operación minera está directamente relacionada con la capacidad de transporte que esta tenga. Las grandes faenas están provistas de una vasta flota, por lo que pequeñas demoras pueden significar importantes pérdidas a nivel global, lo que hace sumamente relevante contar con procesos eficientes.

En este trabajo se presenta como la implementación de redes neuronales, para la predicción de condiciones, en conjunto con modelos de optimización pueden significar aumentos en el movimiento de material y producción de mineral. Además, reducir los tiempos muertos a los que se ven afectados los camiones de extracción en los procesos de chancado y abastecimiento de combustible.

1.1 Motivación del trabajo

Ante el difícil escenario señalado anteriormente, resulta necesario generar cambios e implementar nuevas soluciones, que entreguen los beneficios adicionales que se necesitan para mantener rentable el negocio.

1.1.1 Optimización del Proceso de descarga en Chancado

Los equipos de chancado tienen la finalidad de reducir el tamaño de la roca. Estos equipos procesan el material conocido como mineral, el cual tiene un valor intrínseco para el negocio. Un aumento en la productividad de estos equipos, implica una mayor cantidad de mineral disponible para los procesos aguas abajo y por consiguiente, un incremento del ingreso monetario sin la necesidad de incidir en un gasto adicional considerable, por lo tanto, este proceso es importante en la cadena de valor de la faena. Sin embargo, esto no significa que no existan inconvenientes o esté exento de complicaciones, las cuales son bastante comunes, y se deben principalmente a una mala fragmentación, alta dureza y otros factores de la carga que está llegando. Esto puede involucrar un aumento en el uso del pica rocas, fallas en el equipo y en los tiempos de espera de los camiones para descargar. Todo esto significa un costo adicional para los procesos involucrados, a causa de ineficiencias operacionales (Ilustración 2).



Ilustración 2: Camiones llegando al proceso de chancado.

El objetivo principal de esta optimización es disminuir los tiempos muertos en los equipos de transporte y aumentar el tonelaje procesado. Para lograr lo antes señalado, se debe en una primera instancia determinar la fragmentación o los indicadores representativos de la carga que viene en cada unidad de transporte (ilustración 3), para luego predecir el tiempo de proceso del material depositado en chancado, y finalmente reordenar los equipos para descargar.



Ilustración 3: Camiones con Fragmentación Fina, media y bolón, respectivamente.

1.1.2 Optimización del Proceso de Abastecimiento de Combustible

El abastecimiento de combustible es un proceso obligado por parte de las unidades de extracción, el cual conlleva detener el equipo por un tiempo prolongado. Sumar tiempos muertos a causa de que haya otro equipo en la estación y no poder recargar petróleo de manera inmediata, implica pérdidas importantes en la utilización de los CAEX y de tonelaje transportado. Esto sucede por una carencia de información oportuna y de un proceso autónomo o semiautónomo de asignación dinámica para petrolear, lo cual ocasiona que se pierdan valiosos minutos en cada recarga, siendo principalmente un problema de gestión a una falta de capacidad de abastecimiento en la operación. Lo anterior se evidencia fácilmente en condiciones de luz día donde se generan instancias en que existe una fila para abastecer y otras donde se encuentra vacía la estación en cuestión (ilustración 4).



Ilustración 4: Estación petrolera con fila de camiones (izquierda) y vacía (derecha).

Para resolver esta problemática, el primer paso es identificar donde se encuentran los equipos mediante su ubicación provista por el GPS asociado (Ilustración 5). Luego, conocer el consumo de combustible en línea o bien, tener una proyección de éste, para finalmente utilizar un modelo de asignación dinámica y determinar el momento óptimo para proceder con destino a recargar, habiendo previamente descargado el material como requisito.



Ilustración 5: GPS Equipos de Transporte.

1.2 Objetivos

En esta sección, se detallan los principales objetivos de la Memoria de Título.

1.2.1 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es optimizar las horas operativas de los CAEX en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentro los objetivos específicos del trabajo, se encuentran:

- Desarrollar un modelo de red neuronal para el proceso de descarga en chancado.
- Desarrollar un modelo de red neuronal para el proceso de abastecimiento de combustible.
- Realizar simulaciones para obtener resultados y determinar las mejoras en la operación al implementar los modelos.

1.3 Alcances

Este trabajo se desarrolló para la empresa Hexagon (detalles de la empresa se encuentran en el anexo A) y sus relacionadas, y se enfoca en la operación unitaria de transporte en minas cuya explotación es a cielo abierto. El objetivo de esta Memoria se centra en reducir ineficiencias operacionales, denominadas como demoras, en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible. Los resultados que se presentan son en base a simulaciones de operaciones reales, dejando fuera posibles pruebas en terreno de los modelos.

En resumen, se tiene:

- Sólo se consideran minas cuyo método de explotación es a cielo abierto.
- Para la construcción de los modelos se consideran 6 meses de datos de una faena localizada en Chile.
- Por sistemas de transporte sólo se considera los camiones de extracción (CAEX)
- Por etapa de chancado sólo se considera el(los) chancador(es) primario(s)
- El trabajo se centró en reducir tiempo perdido en colas en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible.
- Los resultados presentados son en base a simulaciones del sistema de transporte.

CAPITULO 2 ANTECEDENTES

2.1 Gestión del Tiempo

Un factor fundamental en cualquier operación minera, es como se usan los equipos en el tiempo, para lo cual es de suma importancia utilizar un sistema de clasificación de este. Es necesario conocer cómo están trabajando e identificar las principales ineficiencias operacionales.

El marco de referencia utilizado para la definición de los tiempos de los equipos, depende y varía según cada compañía (Yarmuch, 2014). Dentro de estos, se encuentra la norma ASARCO, que es comúnmente utilizada por las empresas mineras, esta se presenta a continuación:

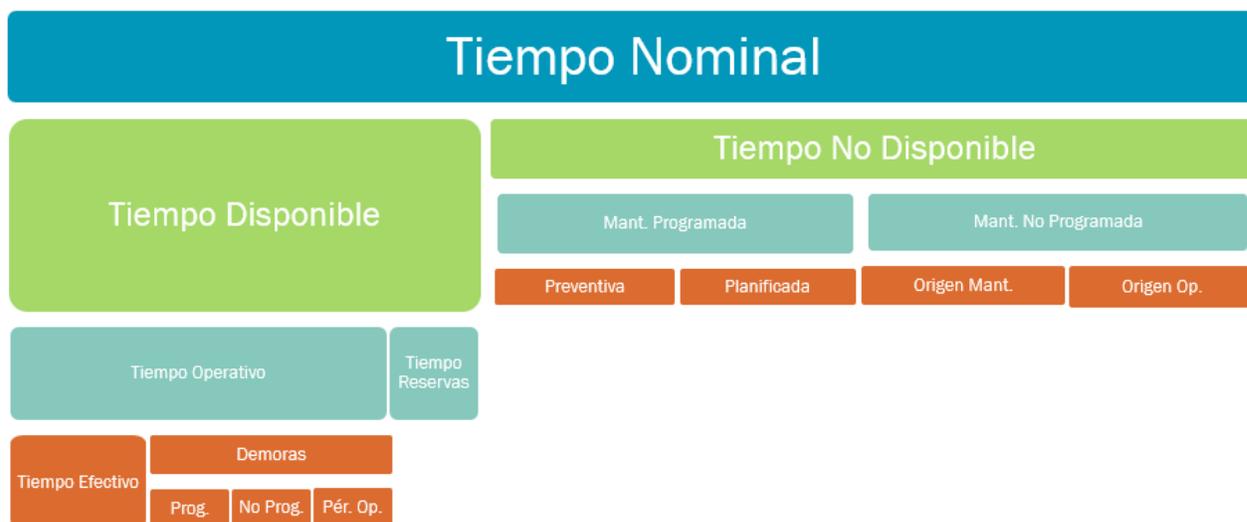


Ilustración 6: Gestión del tiempo (Fuente Norma ASARCO).

De los tiempos visualizados en la ilustración 6, los fundamentales para el trabajo son el tiempo efectivo y las demoras con su respectiva descomposición, ya que se quiere recuperar tiempo de las esperas en chancado y petrolera.

Por lo tanto, no se reducirán todo tipo de demoras y sólo se afectarán las no programadas y las pérdidas operacionales, esto es claro al ver que compone cada una de éstas, lo que se observa en la ilustración 7.



Ilustración 7: Parámetros que componen las demoras (Fuente Norma ASARCO).

La disponibilidad (ecuación 1) por definición es el tiempo en que el equipo esta electromecánicamente en condiciones aptas para operar. Por su parte, la utilización efectiva (ecuación 2) es el tiempo en que un equipo está realizando operaciones netamente productivas o las actividades para lo que fue adquirido. A pesar de que los modelos propuestos sólo afecten al segundo parámetro, se hace necesario entender la definición de ambos, ya que la disponibilidad influirá en la utilización efectiva. Esto se observa en las siguientes ecuaciones (Lagos, 2007):

$$Disp [\%] = \frac{Horas\ Disponibles}{Horas\ Nominales} * 100 \quad (Ecuación\ 1)$$

$$UE [\%] = \frac{Horas\ Efectivas}{Horas\ Disponibles} * 100 \quad (Ecuación\ 2)$$

2.2 Ciclo de Transporte

El ciclo de transporte es el proceso por el cual se mueve material de un lugar a otro, éste está compuesto por etapas, las cuales ocurren de manera cíclica en la operación. Puede comenzar cuando el camión es cargado por un equipo de carguío, ya sea una pala eléctrica, cargador frontal u otro, y luego se moviliza por una ruta establecida hasta un sector de descarga designado, el cual puede ser un botadero, stock, chancador, entre otros. Una vez finalizado el proceso de descarga, el equipo se repositona nuevamente hacia un equipo de carguío y dar luz a un nuevo ciclo. Cada ciclo implica el traslado de una cantidad de material hacia un destino, la suma de todas las descargas es la producción de la mina.

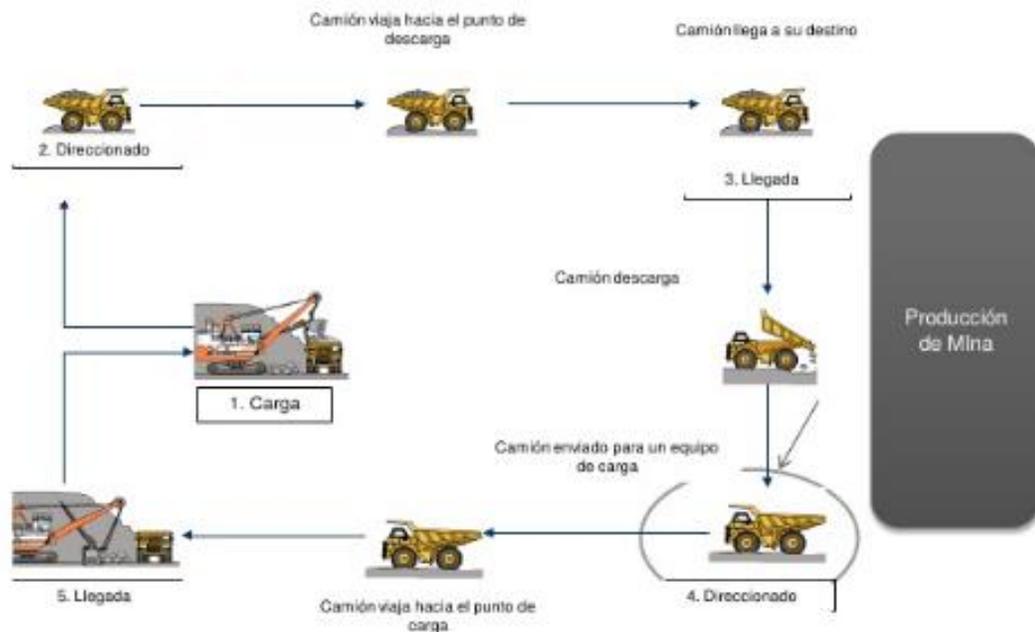


Ilustración 8: Ciclo de transporte (Fuente J. Gómez, 2011).

El proceso descrito anteriormente sería un ciclo de transporte ideal, debido a que no se consideran interferencias operacionales en el trayecto o demoras en los procesos de carguío y descarga. Estos problemas son usuales en las faenas mineras por la gran cantidad de equipos móviles que se encuentran circulando, aumentando los tiempos necesarios para realizar un ciclo y afectando al proceso general.

Considerando lo anterior, el tiempo real de ciclo de transporte se puede expresar por la siguiente ecuación.

$$t_{CT} = t_{AC} + t_C + t_{VC} + t_{AD} + t_D + t_{VV} + t_E \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde los parámetros de la ecuación 3, son:

- t_{CT} : Tiempo de ciclo de transporte [min].
- t_{AC} : Tiempo de acuatamiento en carga [min].
- t_C : Tiempo de carga [min].
- t_{VC} : Tiempo de viaje cargado [min].
- t_{AD} : Tiempo de acuatamiento en descarga [min].
- t_D : Tiempo de descarga [min].
- t_{VV} : Tiempo de viaje vacío [min].
- t_E : Tiempo total de espera [min].

2.3 Proceso de Chancado

El proceso de chancado, es el primer proceso de reducción secundaria al cual se ve afectado el mineral al comenzar su proceso de recuperación. En este se reducen típicamente rocas de un metro de diámetro o más a tamaños cercanos a 20 cm, dimensión la cual dependerá de la configuración que se requiera para optimizar los procesos aguas abajo. Pero a su vez, afectará la operación (tonelaje por hora) que puede alcanzar el chancador, ya que, a menor tamaño, mayor el tiempo que el equipo tardará en triturar dicha roca y por lo tanto disminuirá su producción, caso contrario si se desea un tamaño más grande.

El chancador es alimentado por los camiones de extracción que llegan al punto de descarga, situado en un sector diseñado para tal intención. En general, se cuenta con dos posiciones para este propósito, esto se observa en la ilustración 9, de tal forma que exista siempre un equipo listo para descargar.

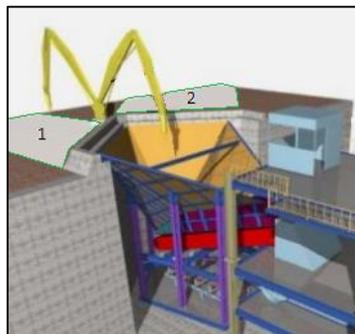


Ilustración 9: Posiciones 1 y 2 para descarga (Fuente W. Ayala, 2014).

En esta etapa, se define como tiempo de proceso aquel que transcurre desde que un equipo descarga hasta que el proceso de chancado permite la descarga siguiente. Por lo tanto, el tiempo mínimo de espera para las sucesivas descargas será el tiempo de proceso de la descarga anterior.

2.4 Proceso de Abastecimiento de Combustible

El proceso de abastecimiento de combustible, es aquel en el cual los camiones de extracción rellenan su estanque, para seguir realizando operaciones productivas. Ésta es una detención obligada en la operación, donde la falta de coordinación en la asignación del equipo al proceso genera demoras y mermas operacionales. Las faenas mineras cuentan con una o más estaciones petroleras, esto depende del número de equipos de transporte que tengan circulando. Para el presente trabajo sólo se consideran las estaciones petroleras diseñadas para abastecer a los CAEX, ya que equipos móviles menores ocupan otras estaciones de combustibles para tal propósito.

El proceso de abastecimiento varía entre operaciones, existiendo diferentes protocolos con distintos niveles de exigencia desde el punto de vista de seguridad. Este se puede resumir como un conjunto secuenciado de etapas, las cuales se observan en el diagrama de la ilustración 10. El problema se genera al asignar un CAEX a una estación petrolera cuando ésta está siendo utilizada por otro equipo, haciendo que el equipo posteriormente asignado deba esperar antes de poder ser reabastecido de combustible.

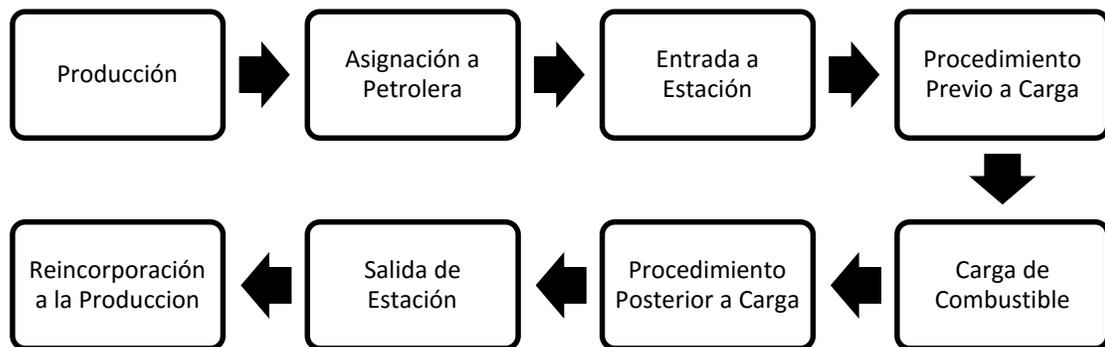


Ilustración 10: Procesos General de Abastecimiento de Combustible.

2.5 Ingreso Monetario

Al realizar un proceso de optimización, es relevante considerar el posible ingreso monetario que tendría la implementación de un nuevo modelo. Este se calcula según la ecuación 4.

$$\text{Ingreso [US\$]} = \text{Tonelaje [ton]} * \text{Ley}_{MX} [\%] * f_c * \text{Precio}_{MX} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{Lb}} \right] * R_m [\%] \quad (\text{Ecuación 4})$$

En donde:

- Ley_{MX} y Precio_{MX} : Ley de Mineral [%] y Precio del Mineral [US\$/Lb], respectivamente.
- R_m : Recuperación Metalúrgica [%]

2.6 Redes Neuronales

Las primeras redes neuronales o ANN (por sus siglas en ingles), fueron presentadas como modelos que representaban las neuronas biológicas y fueron diseñadas para armar circuitos que pudieran resolver tareas (McCulloch & Pitts, 1943).

Éstas están construidas por un conjunto de capas, con una o más neuronas, las cuales se interconectan entre sí, mediante factores de ponderación, para realizar tareas como predicción o clasificación de datos. Estas pueden tener N capas con M neuronas cada una, una estructura típica se presenta en la siguiente ilustración:

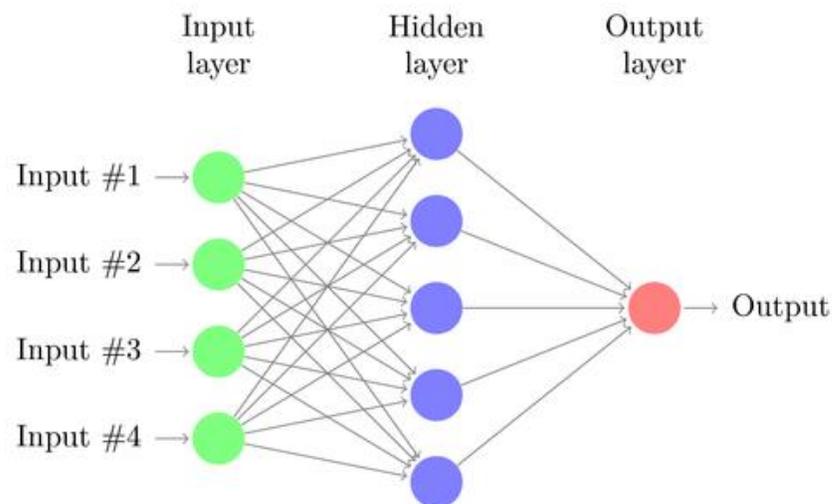


Ilustración 11: Arquitectura tipo de red neuronal (Fuente Cardinal, 2016)

Las redes neuronales tienen dos tipos de patrones de conexión para interconectarse entre capas y neuronas, estos son:

- Feed-forward networks: red donde la data fluye en una sola dirección (Dastani, 1991). Esto significa que los datos van de izquierda a derecha en la ilustración 11 y no se devuelven a una capa anterior y solo van avanzando hasta llegar a la salida.
- Recurrent networks: red con propiedades dinámicas, para determinar tipos de comportamiento (Pearlmutter, 1990). Este tipo de redes permite que los datos viajen en todas las direcciones, es decir, cada enlace neuronal es bidireccional.

Según Viñuela (2004) para que una red opere con un error bajo o aceptable, se debe realizar un proceso de aprendizaje, el cual consiste en entrenar la red para entregar las respuestas deseadas en base a experiencia previa, es decir en base a datos históricos, por esta razón es que se requieren altos volúmenes de información para lograr un funcionamiento adecuado.

Existen diversos procesos de aprendizaje para las redes neuronales, estos se pueden dividir en tres grandes grupos de acuerdo a sus características (Viñuela et al, 2004).

1. Aprendizaje supervisado: En este tipo, se presenta el conjunto de patrones de entrada y salida esperados a la red, con esta información la red va ajustando ponderadores internos, para llegar a la respuesta deseada. En la ilustración 12, 13 y 14, el conjunto de salida se representa con una "X".

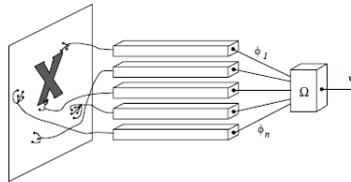


Ilustración 12: Red Neuronal – Aprendizaje Supervisado (Fuente Krose et al, 1996).

2. Aprendizaje no supervisado: Al contrario del sistema anterior, en este no se conoce el conjunto de patrones de salida. En este caso la red debe ajustar los ponderadores según la lógica en los patrones de entrada.

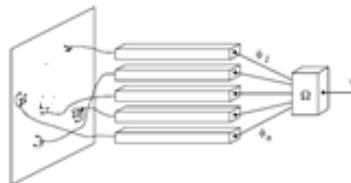


Ilustración 13: Red Neuronal – Aprendizaje No Supervisado (Fuente Krose et al, 1996).

3. Aprendizaje por refuerzo: Este es el último método, el cual es un proceso intermedio entre los dos anteriores, ya que en este, ambos conjuntos son conocidos, pero el de salida no es presentado a la red, hasta que esta entrega una respuesta y se corrige con el valor real.

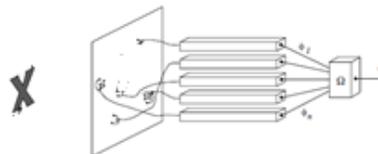


Ilustración 14: Red Neuronal – Aprendizaje por Refuerzo (Fuente Krose et al, 1996).

Si bien las redes neuronales tienen un gran conjunto de beneficios, tales como poseer procesos de adaptación continuos, administración de altas cantidades de datos, entre otros. No siempre, son del todo eficiente, esto dependerá de tres condiciones principalmente con las cuales se determinará la asertividad de la red (Krose et al, 1996), estos parámetros son:

- Algoritmo usado para el aprendizaje y el número de iteraciones.
- El número de muestras para aprender
- El número de “hidden unit” o capas intermedias.

El primer punto, corresponde básicamente al criterio de error aceptado y como se llega a estar bajo éste. Además, se tiene que entre más iteraciones se realicen, más se refuerzan las conexiones internas por lo que se llega a obtener una mejor precisión con el modelo de red. En cuanto al número de muestras para aprender se puede observar, en la ilustración 15, que entre mayor sea, menor será la tasa de error y mayor el aprendizaje. Por último, para el número de capas intermedias se puede notar, en la ilustración 16, que existe un óptimo el cual reduce el error, pero a medida que aumenta este, la posibilidad de tener más conexiones genera una mayor probabilidad de diferir con respecto al valor real en la estimación.

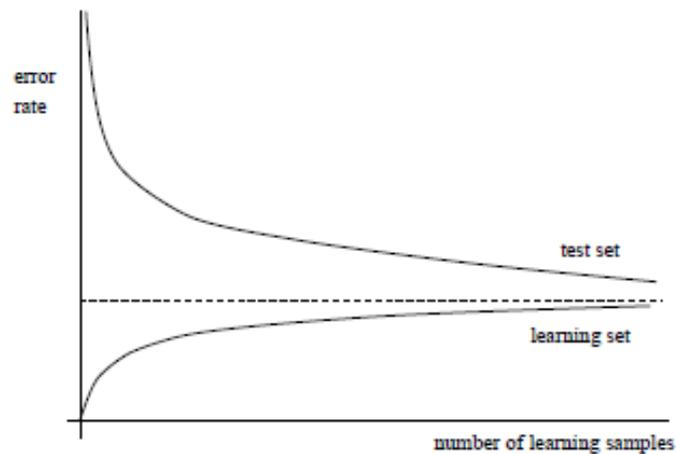


Ilustración 15: Error asociado al número de muestras (Fuente Krose et al, 1996).

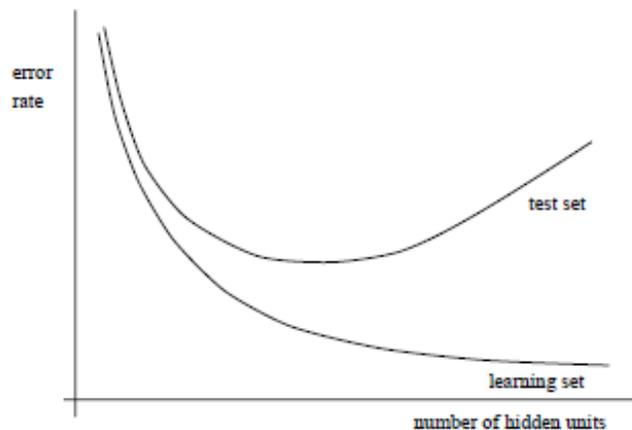


Ilustración 16: Error asociado al número de capas intermedias (Fuente Krose et al, 1996).

Otro tipo de red que es útil para el caso de estudio, son las redes auto-organizadas, estas fueron introducidas para explicar fenómenos biológicos (Grossberg, 1976), existen varias redes de este tipo, una de ellas es la red ART (Teoría de resonancia adaptiva) la cual tiene tres propiedades:

- La actividad de la red está normalizada
- Mejora los patrones de entrada
- Tiene una memoria de corto plazo que modifica lentamente a la de largo plazo

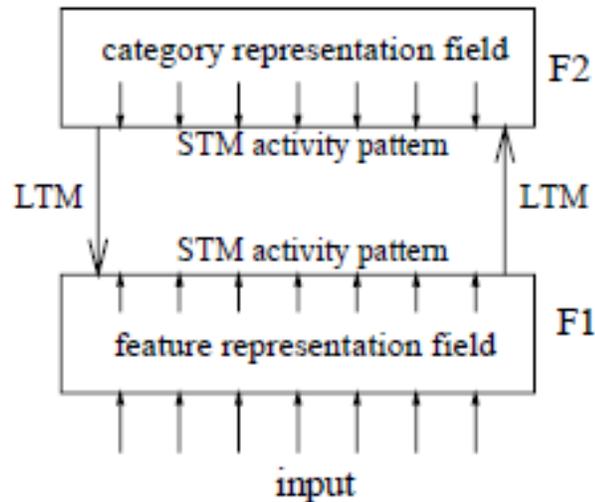


Ilustración 17: Red Auto-Organizada ART (Fuente Krose et al, 1996).

Que la actividad de la red esté normalizada, significa que al ingresar los datos de entradas o inputs, éstos son procesados en F1, ver ilustración 17, en donde se transforman a una base común de análisis. Luego, con estos patrones de entradas se genera una respuesta en F1. Finalmente, ésta se compara con la respuesta que entrega F2 para el mismo set de datos, si éstas son similares, se pasa éste conjunto de datos a la memoria de largo plazo (F2) para reforzar los enlaces. Por el contrario, cuando la respuesta es diferente se debilitan los enlaces y se rechaza la entregada por corto plazo. Este tipo de red, sirve para procesos que van evolucionando en el tiempo, como es el caso de la minería, ya que las condiciones existentes en la actualidad pueden variar por avances tecnológicos o cambio en las condiciones geológicas de la faena.

2.7 Consumo de combustible en los Camiones de Extracción

El uso de combustible en los camiones de extracción en minería a cielo abierto es uno de los principales insumos requeridos para la operación, siendo imprescindible en el proceso. El consumo de estos equipos va a depender de múltiples factores, los más importantes son la velocidad máxima, el peso y la resistencia total (TR), otros parámetros se detallan en la ilustración 20 (Soofastaei et al, 2016).

La velocidad máxima y el peso están relacionados entre ellos, ya que para cualquier valor de TR estas dos variables serán indirectamente proporcional. Para un consumo energético constante, si existe mayor peso se reduce la velocidad máxima, esto a causa de la inercia del cuerpo.

La resistencia total por su parte está compuesta de dos partes (ecuación 5). La primera es la resistencia al rodado, la cual dependerá del material y las condiciones en que se encuentre el camino, algunos valores típicos de este parámetro se encuentran en la tabla I. La segunda consiste en la resistencia generada por la pendiente, que es una razón entre cuanto sube un camino y el largo horizontal, esta es causa de cómo están diseñados los caminos por los cuales necesita transitar el equipo. Se define positiva, es decir aumenta la resistencia total, cuando se va en subida y negativa, cuando se va en baja, esto se puede ver en la ilustración 18.

$$TR = RR + GR \quad (\text{Ecuación 5})$$

En donde los parámetros de la ecuación 5, son:

- TR: Resistencia total [%]
- RR: Resistencia al rodado [%]
- GR: Resistencia por la pendiente [%]

Tabla I: Valores típicos para resistencia al rodado (Fuente Soofastaei et al, 2016).

Condición del Camino	Resistencia al Rodado [%]
Concreto	1,5
Tierra dura, seca y mantenida	2,0
Gravilla compactada y seca	2,0
Tierra seca, pero sin compactación	3,0
Gravilla seca, pero sin compactación	3,0
Barro con base firme	4,0
Gravilla suelta o arena	10,0
Barro con base esponjosa	16,0

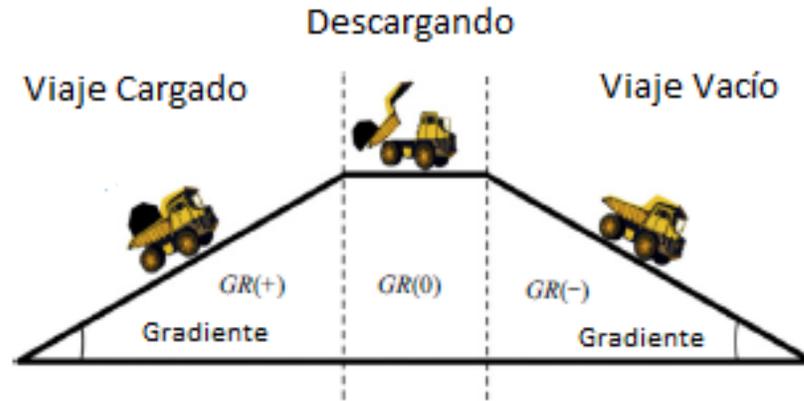


Ilustración 18: Resistencia a la pendiente (Fuente Soofastaei et al, 2016).

Por último, Soofastaei (2016) creó un modelo en el cual toma como parámetros de entrada estos tres factores principales, con lo que logró crear una red neuronal que predecía los consumos de combustible una vez realizado el circuito, en la ilustración 19 se puede observar lo exacto que fue la estimación lograda.

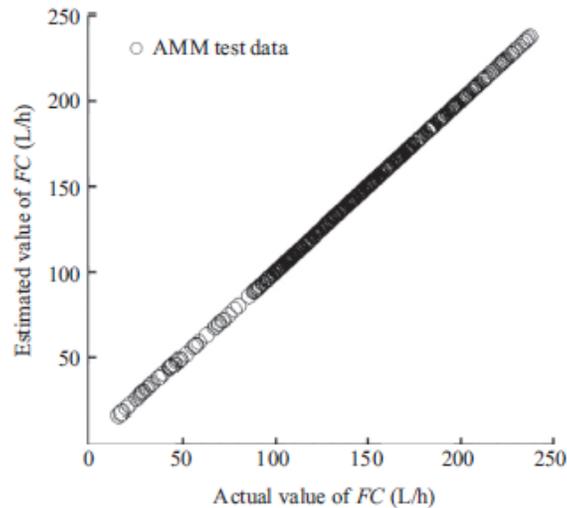


Ilustración 19: Estimación red vs consumo real (Fuente Soofastaei et al, 2016).

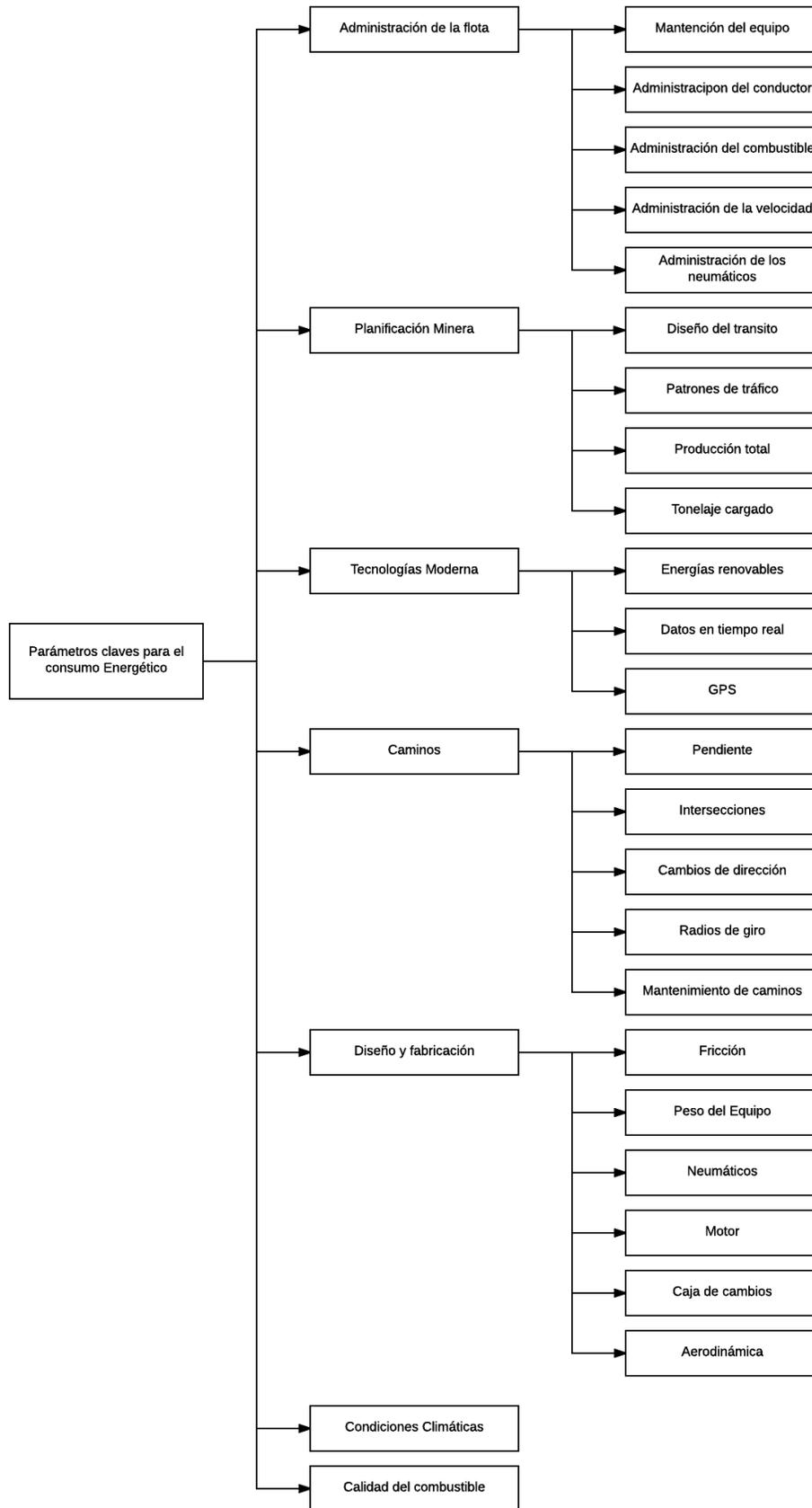


Ilustración 20: Parámetros clave para el consumo de combustible (Fuente Soofastaei et al, 2016).

CAPITULO 3 METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología con la cual se desarrolló la Memoria de Título. A grandes rasgos el proyecto constó de 6 etapas mayores, las cuales se dividen en secciones menores, las principales se detallan en la ilustración a continuación:

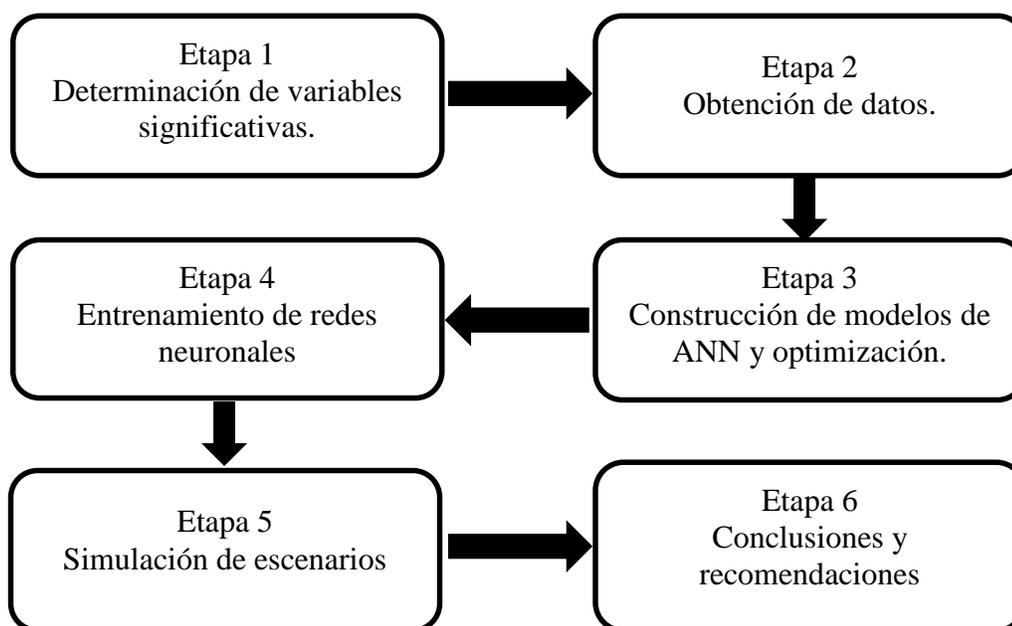


Ilustración 21: Etapas de la Metodología

3.1 Etapa 1: Determinación de variables significativas

En esta primera etapa, se determinó que variables afectan a cada uno de los procesos y cómo influyen, estos son parámetros con los cuales se construyeron las redes neuronales que predecirán la información necesaria para los modelos de optimización, por lo que es esencial un correcto entendimiento del comportamiento de estas entradas en relación a la variable que se desea predecir, esto permitirá tener un correcto desempeño de cada red y evaluar si las relaciones que se están creando tienen sentido o no.

3.2 Etapa 2: Obtención de datos.

Como se mencionó en el capítulo 2, para obtener resultados confiables con las redes neuronales, se requiere una alta cantidad de datos para el entrenamiento, es por lo anterior que en esta etapa se consiguió el volumen necesario para poder desarrollar los modelos de redes neuronales y posteriores simulaciones de los modelos de optimización. La mayor parte de estos datos son parámetros invariantes en el tiempo los cuales se obtienen de los repositorios de las faenas mineras, área de planificación y despacho, más detalles de cómo se procesaron estos datos se pueden encontrar en el capítulo 4.

3.3 Etapa 3: Construcción de modelos de ANN y optimización.

En esta tercera etapa, se construyeron ambos modelos de redes neuronales y optimización. Para ello en primer lugar se determinó y definió qué tipo de ANN se utilizaría, esto se realizó en las siguientes etapas:

- Determinación de red a utilizar: Consiste en analizar las redes e identificar cuales cumplen las condiciones necesarias para realizar la tarea esperada.
- Definición de Arquitectura: Se determinó los inputs, outputs y la arquitectura interna de la red (número de capas internas y neuronas por capa).
- Construcción de la red: Proceso de programación de la red neuronal.

Por último, en esta etapa se construyen modelos de optimización, lo cual consiste en la programación de los algoritmos de optimización de los procesos de estudio.

3.4 Etapa 4: Entrenamiento de redes neuronales

Una vez construida las redes neuronales, corresponde entrenarlas, esto implica enseñarle a la red que ante un conjunto de datos ingresados entregue una respuesta esperada, para esto se utilizan pares de datos que correspondan entre sí. Para lograr un buen entrenamiento se debe seguir lo siguiente:

- Determinar la estrategia de entrenamiento: Criterios de aceptación, metodología de aprendizaje, tipo de interconexiones a usar.
- Entrenamiento de la red: Para esto se presentan los pares de datos a la red hasta que logre las respuestas correctas.
- Validación de la red: Con esto se establece que tan bien está trabajando la red y que el error máximo que genera este bajo el criterio previamente establecido.

3.5 Etapa 5: Simulación de escenarios

La simulación de escenarios, se realizó para obtener resultados que podrían entregar los modelos al ser implementados en faena y determinar cuánto mejoran el proceso actual. Esto se realiza debido a que probar en la operación en primera instancia es muy costoso y pueden existir una alta cantidad de errores. En esta etapa se lleva a cabo:

- La ejecución de las simulaciones.
- Análisis de resultados.

3.6 Etapa 6: Conclusiones y recomendaciones

La última etapa, consiste en entregar las principales conclusiones de la Memoria de Título y como se relacionan con los objetivos planteados en un comienzo, además entrega las principales consideraciones para los pasos siguientes en este proyecto, los cuales consistirían en pruebas de terreno de los modelos.

CAPITULO 4 OBTENCIÓN DE DATOS

Antes de poder crear las arquitecturas de las redes y poder realizar las simulaciones, es necesario contar con una base de datos completa y confiable, es decir que contenga todos los parámetros que se consideran relevantes para cada red y además que las mediciones estén correctas. El primer paso, es recaudar de los repositorios de información, área de planificación y despacho la siguiente información:

- Modelos chancadores.
- Rendimiento chancador.
- Dureza de los polígonos de extracción.
- GPS de los CAEX.
- Cargas y descargas de material.
- Tiempo de ciclo (desglosado).
- Tiempos de ciclo o de excavación pala.
- Rendimiento pala.
- Estado operativo de los equipos.
- Litros en cada recarga de combustible.

Los datos anteriores se obtuvieron para un periodo de 06 meses, contados desde febrero del 2015. En donde la faena transporte aproximadamente 450 KTPD, con una flota promedio de 54 CAEX en circulación, más información respecto a los tiempos de viaje entre destinos se pueden encontrar en el anexo B. Se consideró una amplia extensión de tiempo para tener datos suficientes, dado que es posible que exista información incompleta, esto se realizó para mitigar dicho riesgo y aun contar con la cantidad necesaria para entrenar y validar los modelos de redes neuronales. Además, éstos parámetros son usados para crear los escenarios de simulación para los modelos de optimización, posteriormente.

Antes de crear los conjuntos de datos para entrenamiento, se eliminan aquellos que son incongruentes entre sí o con la operación misma, los cuales son ocasionados por malas lecturas de GPS u otros sistemas de monitoreo. Se definió que un dato debía ser eliminado cuando el valor de este, en los distintos sistemas o formas de medición tuviera una variación mayor a un 5% o bien, cuando el valor no fuera operacionalmente o físicamente posible, por ejemplo, un salto de posición medido por GPS cuando el camión esta estático.

Una vez las bases de datos filtrados, se ordenó la información de manera de crear conjunto de datos para cada entrenamiento, con lo cual se crearon tablas en las cuales se tenían los parámetros de entradas y la variable de salida en cada caso.

Para el caso de chancado, se creó un conjunto de 29.589 filas de datos como la que se muestra en la tabla II, en donde los tiempos de proceso reales, variable de salida, fueron obtenidos gracias al GPS de los camiones de extracción, estado y rendimiento del chancador, para ello se crearon filtros que buscan cuando el camión terminaba de descargar y cuando comenzaba a hacerlo el siguiente. Esto evaluando cuando comenzaban a desplazarse, eliminando aquellos tiempos en donde el chancador estaba detenido o el rendimiento no coincidía con el material descargado en el intervalo correspondiente.

Para los parámetros de entrada, el tonelaje era obtenido de las cargas y descargas de material con lo cual se comparaban los dos datos para buscar congruencia en sistema. El modelo del chancador es un dato estático que no varía en el tiempo y es usado para comparar los rendimientos teóricos e históricos de los diferentes chancados en la operación. La dureza del polígono se obtenía como dato puntual y se normaliza entre 0 y 1 para cada sector de carga y se atribuye según el origen en donde era cargado el camión. Por último, el tiempo de excavación de la pala es obtenido por sistemas de monitoreo y análisis de esta y es contrarrestado con el rendimiento por hora.

Tabla II: Ejemplo conjunto de datos para entrenamiento - Red Chancado

Modelo Chancador [Tph]	Tonelaje [ton]	Dureza [0-1]	Tiempo Excavación Pala [s]	Tiempo de Proceso [min]
4.500	330	0,73	10,1	2,21
4.500	326	0,73	9,6	1,90
4.500	344	0,73	7,3	1,85
4.500	321	0,73	11,7	2,74

Siguiendo el mismo procedimiento que para la construcción de los conjuntos de datos de chancado, el de abastecimiento de combustible, tenía como variable de salida el consumo proyectado. El cual, por falta de información en línea, no se contaba con el combustible luego de cada trayecto. Por lo que el entrenamiento se tuvo que realizar con el remanente final en el estanque, el cual se obtenía restando la capacidad del estanque con los litros cargados en el último abastecimiento.

Para los parámetros de entrada, nuevamente el tonelaje era obtenido de los mismos sistemas antes mencionados. La resistencia total se estimaba a través de las posiciones GPS, esto para obtener la pendiente, y se usaba un parámetro fijo para el estado de los caminos. Por último, la velocidad máxima de cada trayecto también se obtiene de la base de datos del GPS, en donde se almacena esta información. Un ejemplo del set de entrenamiento utilizado para este proceso se muestra en la tabla III.

Tabla III: Ejemplo conjunto de datos para entrenamiento de un CAEX - Red Consumo de Combustible

Resistencia Total [%]	Velocidad Máxima [Km/hr]	Tonelaje [ton]	Consumo de combustible [Lt]
8,7	15	330	-
14,6	12,39	326	-
13,7	11,17	340	-
13,3	12,13	321	3415

Finalmente, para crear los escenarios de simulaciones se usan las distribuciones de probabilidad de los datos obtenidos, esto para representar de manera fidedigna la operación. Pero, además en el proceso de chancado se realizan simulaciones en simultáneos, para de esta forma eliminar el azar en el proceso, esto quiere decir que cuando llega el tercer camión de la simulación a cargar material carga el mismo tonelaje y con los mismos atributos en ambas simulaciones, independiente si llegó antes o después. Por el contrario, para las simulaciones del proceso de abastecimiento de combustible, los resultados son comparados con los obtenidos en faena durante el periodo. Para más información de las distribuciones de probabilidad usadas para simular, estas se encuentran en el anexo B.

CAPITULO 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presentan como se llevan a cabo los procesos de optimización, los resultados de las simulaciones y como se evaluó las mejoras que tendría implementar estos sistemas en la operación.

5.1 Proceso de Chancado

En primer lugar, para optimizar el proceso de chancado, se requiere conocer el tiempo de proceso que tendrá cada descarga. Sin embargo, este dato no es conocido directamente de los sistemas de información tradicionales. Para saber esta información, se desarrolló la primera red neuronal, la cual se mostrará a continuación.

5.1.1 Red Neuronal – Chancado

Como se vio en el capítulo 3, al crear una red neuronal, en primer lugar, se definen el tipo de red que se va utilizar y los parámetros de entradas, los cuales deben ser representativos de la variable de salida que se requiere predecir. En base a los datos obtenidos y disponibles en línea en los sistemas de información de las faenas mineras, se consideraron 4 entradas y una salida.

En primer lugar, se profundizarán a continuación en los parámetros de entrada que se utilizaron, los mismos que se vieron en el capítulo 4, estos son:

- **Modelo Chancador:** Es importante debido a que entrega el rendimiento teórico e histórico que tiene el chancador en uso, al cual se dirige el equipo de transporte, es claro entonces que el tiempo de proceso dependerá directamente del modelo de equipo que se esté usando para reducir el tamaño del material.
- **Tiempo de extracción o excavación pala:** Este es el parámetro que podría resultar más complejo de relacionar con el tiempo de proceso, esto a causa de que a primera vista existe un factor más relevante, el cual sería la fragmentación del material, en donde se hace más notorio que si un material está muy fragmentado se procesara más rápido por los chancadores. En la actualidad, existen sistemas de medición de este parámetro, los cuales son poco fidedignos, ya que en su mayoría sólo la identifican en base a la imagen superficial del frente. Esto se puede subsanar, relacionando el tiempo de excavación con respecto a la fragmentación de material. A través de este factor se corrige la granulometría del frente en cada baldada, esto no significa conocerla como tal, pero si entender el comportamiento. Por lo tanto, se puede entender que a un mayor tiempo de excavación mayor el tiempo de proceso.
- **Tonelaje:** La cantidad de material que trae cada equipo de transporte, es fundamental para determinar si la carga se demorara más o menos en pasar por el chancador. Es evidente que un CAEX con más toneladas tendrá un mayor tiempo de proceso.

- **Dureza del polígono:** Este parámetro afecta directamente a la cantidad de energía necesaria para reducir de tamaño el material que se descargó, al tener una mayor dureza el chancador requerirá un mayor tiempo para poder triturar el material y así reducirlo hasta el tamaño seleccionado.

Por otra parte, la variable de salida es entonces el tiempo de proceso de la descarga de cada camión, la cual, como se definió en el capítulo 2, es el tiempo que transcurre desde que un camión descarga hasta que el proceso de chancado permite la descarga siguiente.

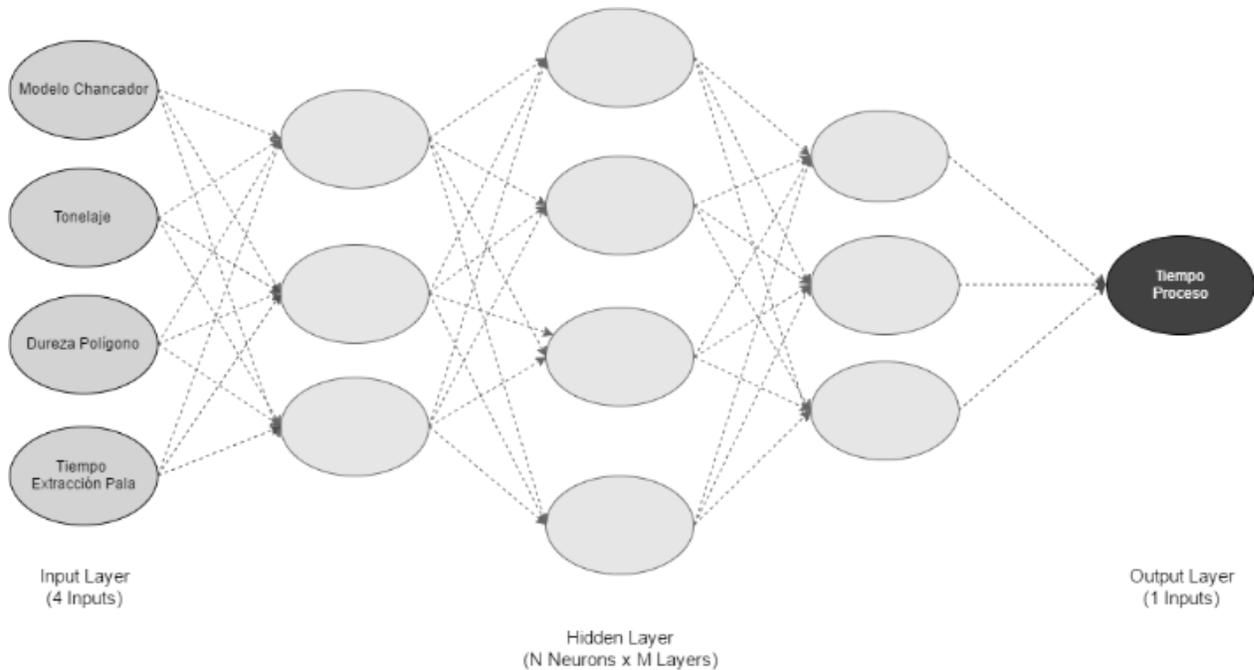


Ilustración 22: Arquitectura Red Neuronal Chancado.

El tipo de red neuronal seleccionada corresponde al Perceptrón Multicapa, la cual es utilizada para predicción de datos. Esta red ha sido seleccionada, además, debido a los beneficios que tiene sobre sistemas de análisis y predicción de datos convencionales, como:

- **Generalización:** El perceptrón multicapa es capaz de generalizar, es decir, clasificar e interpretar patrones desconocidos y contrastarlos contra otros conocidos, que compartan las mismas características representativas. Lo anterior permite que datos de entrada que presenten ruido o estén incompletos, sean clasificados gracias a su similitud con entradas que estén en completitud.
- **Tolerancia a Fallos:** El perceptrón multicapa es altamente tolerante a fallos. Esta característica es conocida como “degradación agraciada”. Debido a la naturaleza distribuida de la red, esta puede seguir operando, aunque una fracción significativa de sus neuronas o interconexiones fallen.

Se ha adoptado para el entrenamiento de la red neuronal, el método back-propagation. El cual consistió en la ejecución de 10.000 iteraciones, con una validación cruzada del conjunto de datos de entrenamiento de 1/3, es decir, se utilizan dos tercios de los datos para entrenar la red, para posteriormente validarla con el tercio restante. Esto se ejecutó en diversas iteraciones con el fin de validar la representatividad de los datos y la representación del espacio muestral generado por la red.

5.1.2 Proceso de optimización del Chancado

Para optimizar el proceso de chancado, luego de que los camiones son cargados por el equipo de carguío al cual fueron asignados, la red predice los tiempos de proceso de cada camión de extracción que tiene como destino un chancador. Esta información se separa según el equipo de destino que se tiene. Posteriormente, esta entra a un modelo de ordenamiento, en el cual se ordena los camiones de menor a mayor tiempo de proceso, pero solo considerando los equipos que se encuentran al interior de una geocerca o área virtual definida para cada chancador. Esto se hace para que solo pueda proceder a descargar un equipo antes que otro, cuando este en el sector y listo para hacerlo, de tal forma de eliminar a los equipos que vienen en camino al chancador, que se está optimizando. Este proceso se observa en la ilustración 23.



Ilustración 23: Etapas del proceso general de optimización del Chancado.

Como se mencionaba anteriormente, sólo se optimizan los camiones dentro de la geocerca establecida, la cual se representa por una elipse en la ilustración 24, como se observa el camión 4 no es considerado en el orden para descargar. Para el estudio esta área virtual queda definida por los camiones que están en la fila para descargar a cada chancador, esto es relevante porque ampliar dicha área, significa la posibilidad de asignar equipos que viene en trayecto ha chancado, los cuales pueden demorar su llegada y ocasionar retrasos en el proceso.

El modelo de ordenamiento, va asignando la posición de descarga a medida que los CAEX van entrando al área establecida y los remueve del sistema una vez asignada una de las dos posiciones para descargar, es decir a un equipo que ya se le asigno en el siguiente turno, no se le modificara su prioridad en el sistema, esto se realiza para evitar confusiones y traslados que pudiera generar posibles accidentes. Un ejemplo de cómo funciona este algoritmo se puede ver en la ilustración 24, en la cual el camión 1 es el equipo con mayor tiempo de proceso dentro de la geocerca, por lo que es rezagado en el proceso de descarga hasta el final, los tiempos de cada camión se encuentran en la tabla de la ilustración 23.

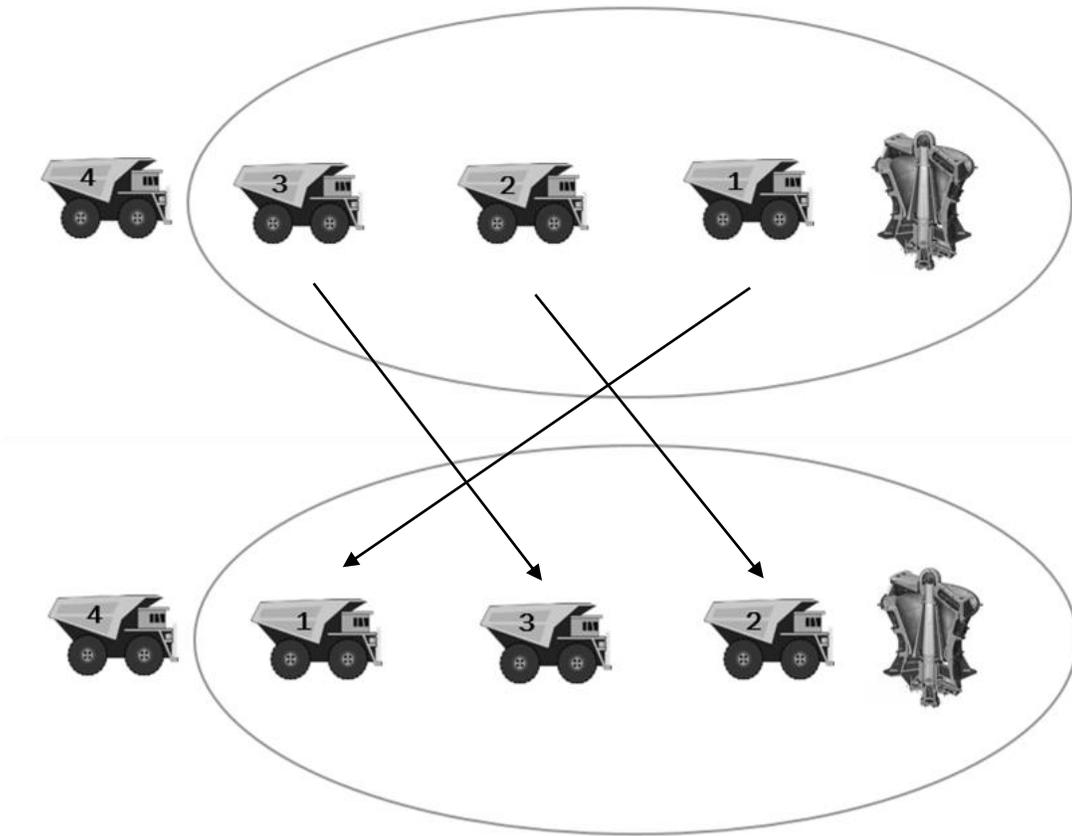


Ilustración 24: Modelo de Ordenamiento y Geocerca

5.1.3 Simulaciones del Proceso de Chancado

Se realizaron simulaciones del proceso de optimización con el fin de cuantificar la mejora de la producción mediante el uso de este sistema. Para esto se abordó una estrategia de simulaciones en paralelo, como se explicó en el capítulo 4, para eliminar la variabilidad en la entrada del proceso y comparar el efecto real que tiene un ordenamiento en el proceso de descarga en chancado. Para las simulaciones se consideraron los siguientes supuestos:

- No se considera en la simulación ningún tipo de fallo en los equipos, tanto en los de carguío, transporte y chancado.
- Se simula un solo chancador, ya que son procesos independientes.
- El tiempo de carguío, de proceso y tonelaje, eran idénticos para los camiones que pasaban en la misma posición al cargar.
- El objetivo es estudiar la reducción del tiempo de espera en proceso de chancado, mejoras en la producción y la utilización de los CAEX.
- Se simulan situaciones en donde circulan desde 5 hasta 14 CAEX por el circuito de chancado.

5.1.4 Modelamiento

El modelamiento, se lleva a cabo de tal forma que represente la realidad y la variabilidad de esta lo más posible. Los tiempos de procesos son creados con la red neuronal diseñada tal propósito. A su vez, los parámetros de entrada a la red son obtenidos mediante las distribuciones de probabilidad.

La lógica de simulación utilizada para el proceso de chancado, se representa en el siguiente modelo conceptual:

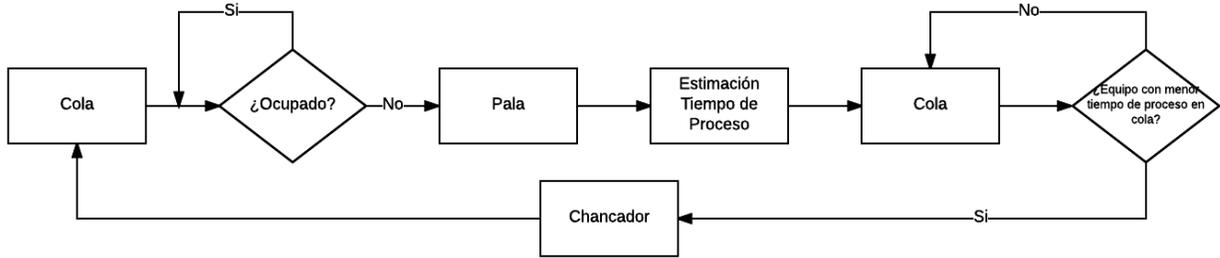


Ilustración 25: Modelo Conceptual - Chancado.

5.1.5 Tiempo de espera en Chancado

Dentro de los objetivos de este trabajo, uno de los principales es reducir el tiempo de espera en chancado. Para de esta forma aumentar la utilización y producción de los camiones, a continuación, se encuentran los principales resultados con respecto a esta variable. Los gráficos presentados son el promedio de las esperas totales de cada simulación para los diferentes casos estudiados. Los histogramas se encuentran en el anexo C (8.3.1) y el resumen de datos en el D. Para un mejor entendimiento, los camiones se organizaron de mayor a menor espera con la finalidad de poder comparar de manera más intuitiva ambos casos, es decir el camión número 1 es el que mayor espera tuvo, luego el 2 y así sucesivamente.

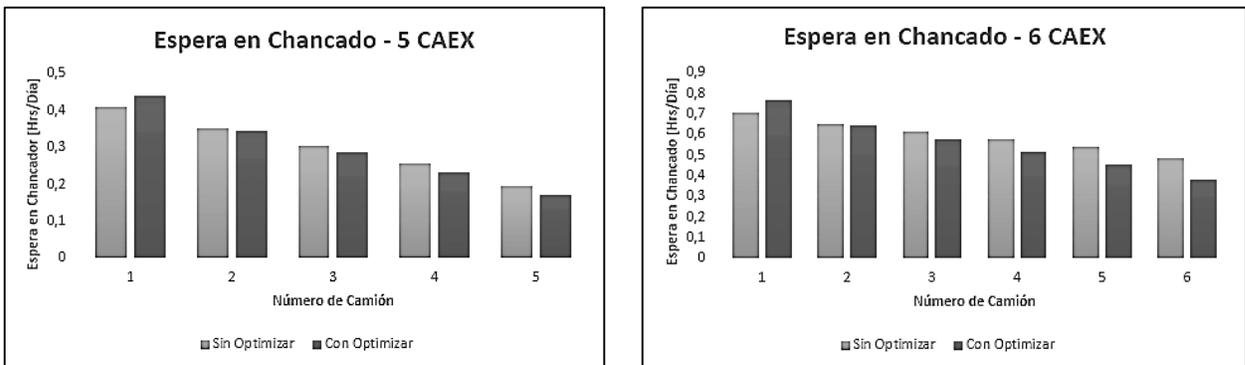


Ilustración 26: Espera Promedio en Chancado - Caso 5 y 6 CAEX

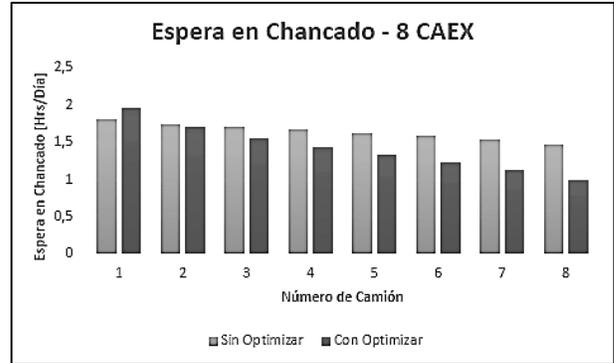
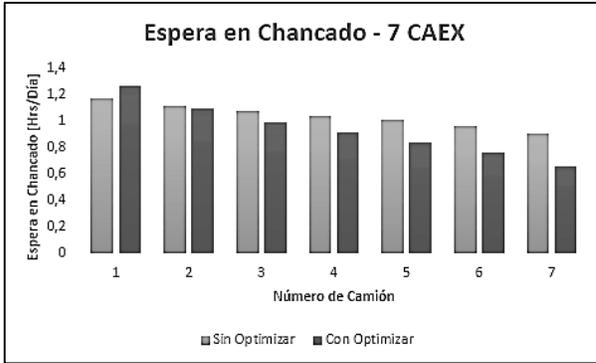


Ilustración 27: Espera Promedio en Chancado - Caso 7 y 8 CAEX

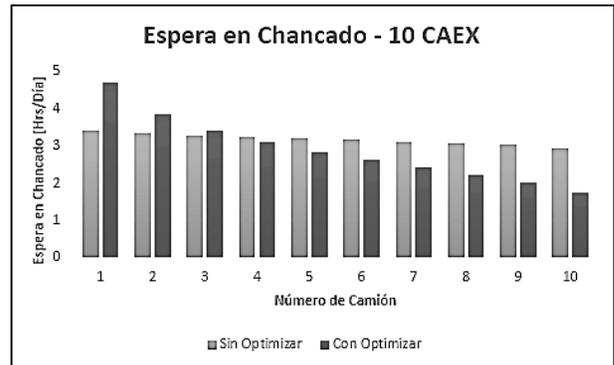
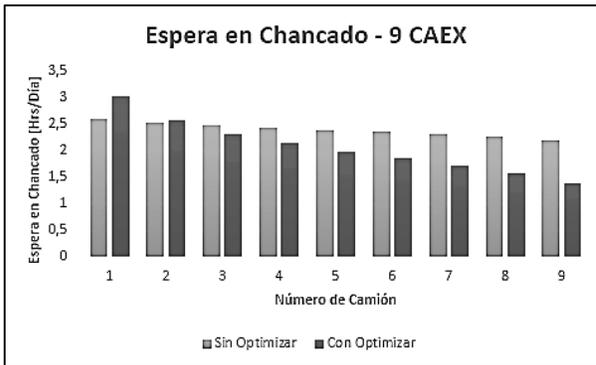


Ilustración 28: Espera Promedio en Chancado - Caso 9 y 10 CAEX

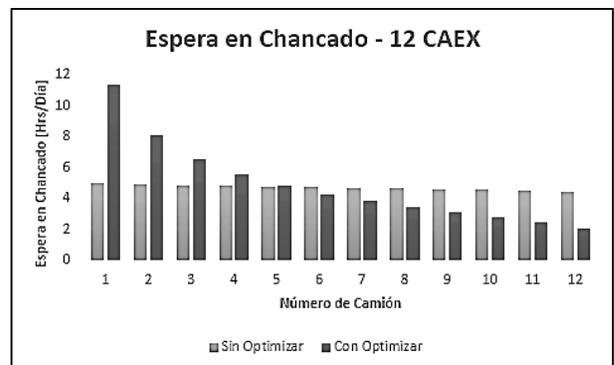
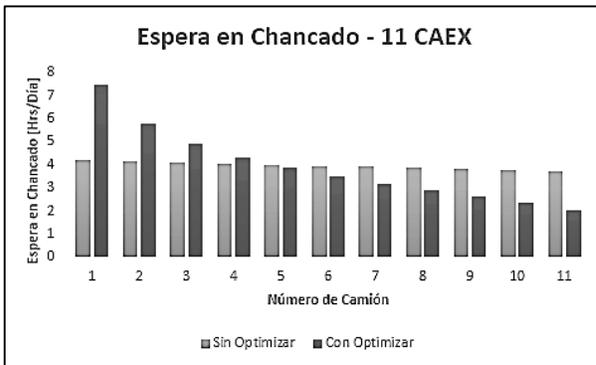


Ilustración 29: Espera Promedio en Chancado - Caso 11 y 12 CAEX

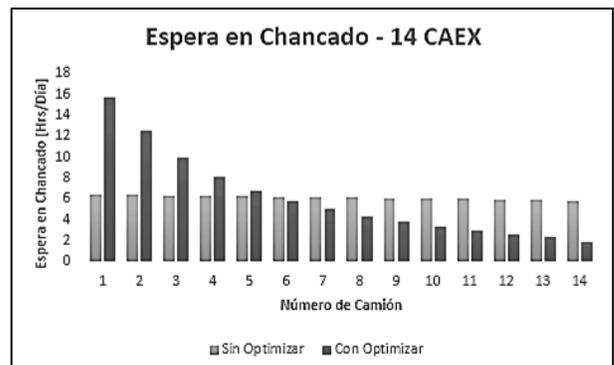
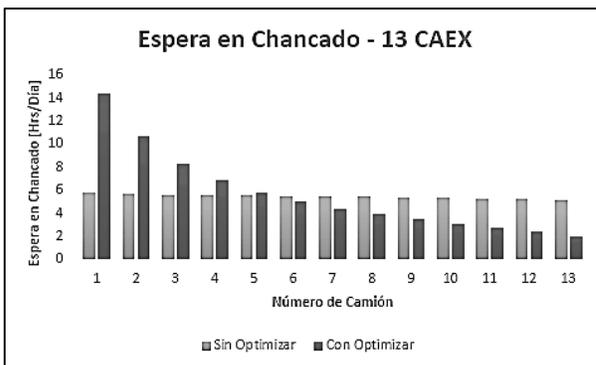


Ilustración 30: Espera Promedio en Chancado - Caso 13 y 14 CAEX

De las ilustraciones anteriores, a modo general se observa que en los casos base o sin optimizar el tiempo de espera de cada camión es relativamente constante, presentando variaciones menores entre el que más espera y el que menos. Sin embargo, en los casos optimizados existen equipos que esperaron considerablemente más que otros. Esto es lógico, al considerar que al reorganizar el sistema se deja camiones con tiempos de procesos muy altos, detenidos. Además, si esto se contrarresta con la ilustración 31, se distingue que la espera en chancado disminuye con respecto al caso base, hasta que el número de camiones en el circuito es muy alto y se sobresatura. Esto deja equipos prácticamente fuera del proceso productivo, obteniendo en el caso de 14 CAEX un equipo que estuvo aproximadamente un 65% del tiempo detenido. Con esto se podría estudiar la posibilidad de enviar este a stock para que de esta manera vuelva al ciclo de manera oportuna. Esto queda fuera del alcance de este trabajo, pero se plantea como recomendación para desarrollos futuros.

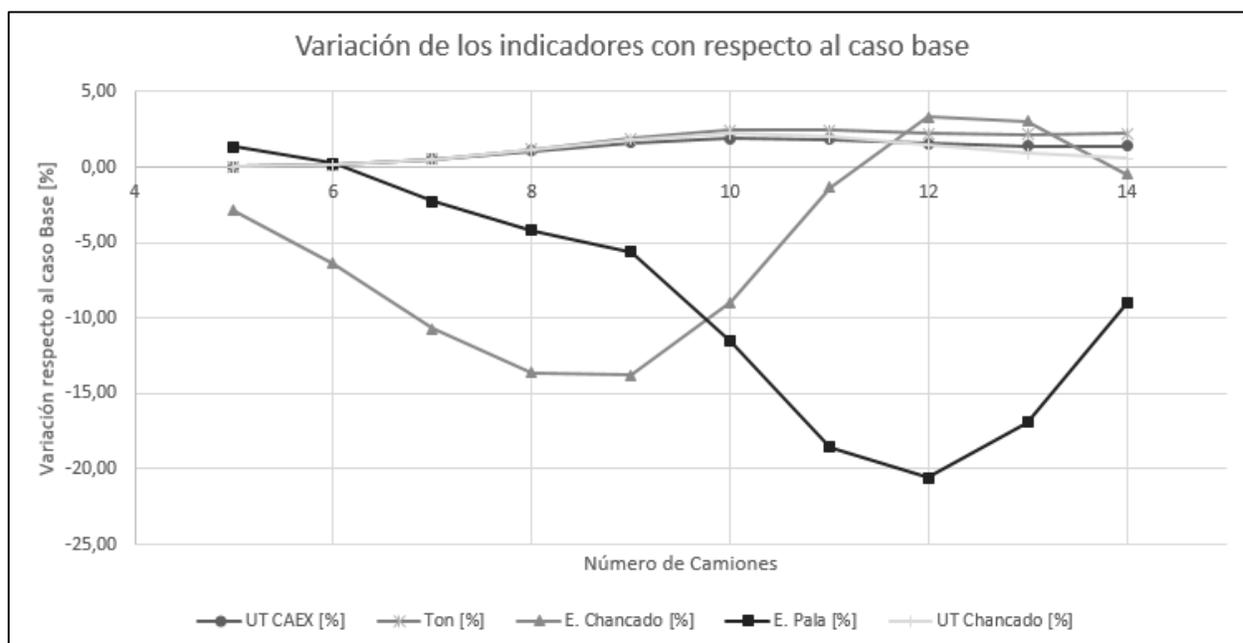


Ilustración 31: Variación indicadores con respecto al caso base

Tabla IV: Variación indicadores con respecto al caso base

Número de CAEX	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
UT CAEX [%]	0,03	0,16	0,50	1,05	1,62	1,92	1,83	1,57	1,42	1,38
Ton [%]	0,03	0,16	0,55	1,18	1,92	2,42	2,46	2,25	2,16	2,25
E. Chancado [%]	-2,86	-6,39	-10,71	-13,64	-13,81	-8,95	-1,34	3,31	3,06	-0,44
E. Pala [%]	1,34	0,27	-2,28	-4,19	-5,63	-11,54	-18,55	-20,57	-16,89	-9,03
UT Chancado [%]	0,03	0,16	0,53	1,14	1,82	2,20	2,00	1,43	0,91	0,56

Se observa en la ilustración anterior la variación de los índices estudiados, en donde un número positivo indica un aumento con respecto al caso base y uno negativo la disminución. En esta se distingue que la utilización de los CAEX aumenta en comparación con el caso base, ahora si se recuerda la ecuación 2 e ilustraciones 6 y 7, esto se explica por la reducción en la espera en chancado y en algunos casos inclusive, en el equipo de carguío. También se puede notar que existe una mejora en el tonelaje procesado con respecto al caso no optimizado para todas las simulaciones, en donde se varió el número de camiones en el circuito. Esto es en respuesta a la mejora de los indicadores de los camiones de extracción (detalles de la distribución, mejoras mínimas y máximas se pueden encontrar en el anexo C).

Una explicación más detallada de los comportamientos anteriores, se mostrará en la siguiente sección, donde se verá el resumen de resultados y ganancias de implementar el algoritmo en la operación.

5.1.6 Resumen de resultados – Chancado

En esta sección, se presentan los principales resultados para las 10.000 simulaciones realizadas de 24 horas cada una, variando la flota de camiones desde 5 hasta 14. La optimización realizada se expresa por la siguiente función lógica:

$$f(Tp, Lc, Nc) = \max(\text{Tonelaje Procesado}) \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

- Tp: Tiempo de proceso.
- Lc: Largo del circuito.
- Nc: Número de camiones en el circuito.

De la Ecuación 6, se comprende que el tonelaje máximo dependerá del tiempo de proceso de cada carga, el largo del circuito y el número de camiones. Para entender esto se debe pensar que si el tiempo de proceso es bajo aumentara el tonelaje procesado. Además, que si el circuito es más largo, se requerirá un mayor número de equipos en circulación para mantenerlo saturado, esto implica que se llegara a resultados similares cuando la condición del circuito sea semejante entre casos.

En la ilustración 32, se observa el incremento diario del tonelaje procesado, según el número de camiones que se presentaban en el circuito. En esta se apreciar que el incremento, va aumentando a medida que se satura el sistema. Esto ocurre debido a que al existir mayor número de equipos crecen las opciones o condiciones para reordenar los camiones llegando a chancado. El proceso se estabiliza una vez sobresaturado el circuito.

En la misma ilustración, con respecto a la utilización de los equipos de transporte se observa un comportamiento similar, solo que esta vez al ir alcanzando un sistema sobresaturado esta va decreciendo con el aumento de camiones. Lo anterior, se explica en las ilustraciones vistas en la sección previa, donde destacan equipos de transporte por largos periodos detenidos.

De lo descrito se desprende que ambas variables aumentan con respecto al caso base en todos los escenarios estudiados y con relación al aumento del número de camiones, el tonelaje aumenta y la utilización disminuye.

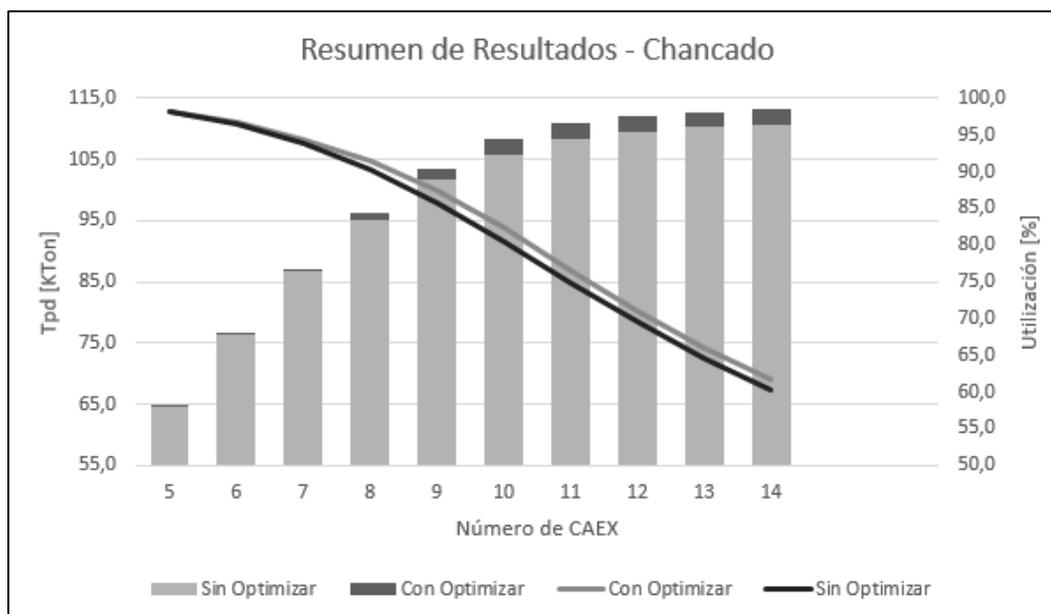


Ilustración 32: Resumen de Resultados – Chancado.

En la siguiente ilustración, se observa el incremento en toneladas procesada por chancador. Además del ingreso mensual, el cual se calcula según la ecuación 4 multiplicado por la eficiencia del algoritmo, que significa este incremento en tonelaje. Para este ingreso se utilizaron los siguientes supuestos:

- Precio del cobre 2,0 US/lb.
- Eficiencia del algoritmo 80%
- Recuperación Metalúrgica 80%
- Ley media de Cu 0,6%.

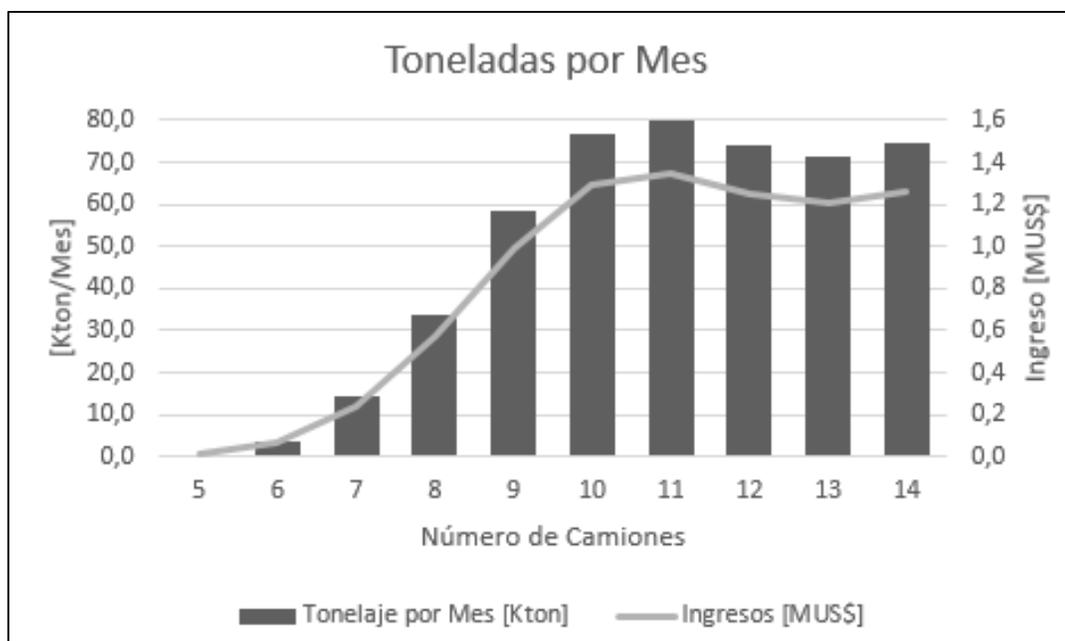


Ilustración 33: Toneladas e Ingresos adicionales por mes – Chancado.

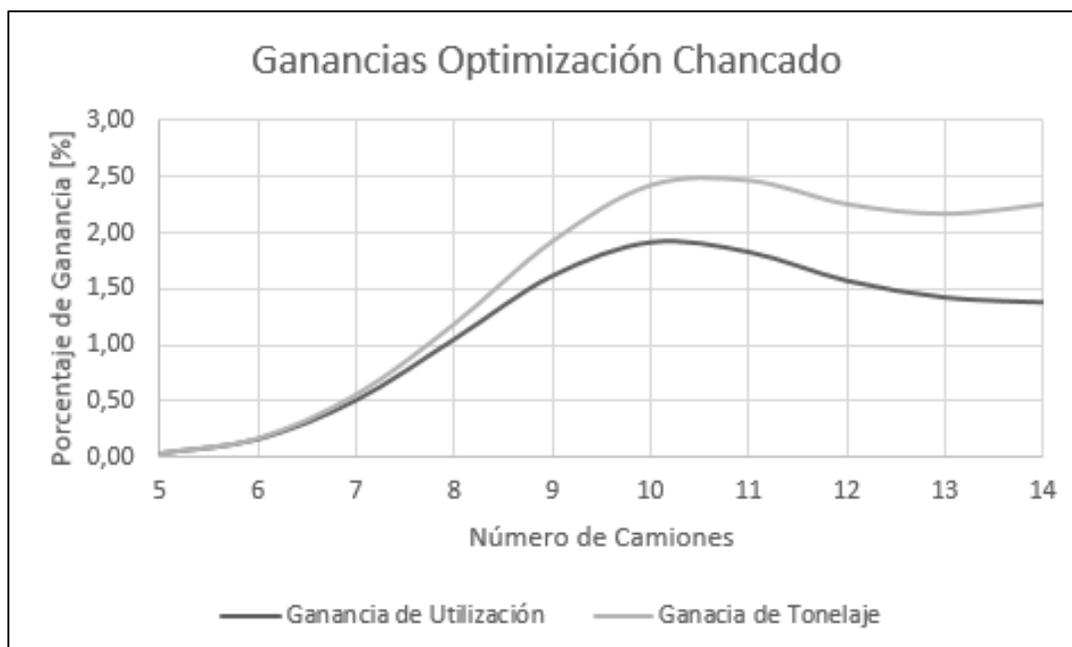


Ilustración 34: Ganancia porcentual respecto al caso base

Los resultados de la ilustración 34 y anteriores, se originan por las condiciones que se tienen según el número de camiones presente en el circuito de chancado, se puede comentar que existen tres grandes casos, los cuales explican el comportamiento de las curvas anteriores.

En el primer caso, cuando se tiene un sistema no saturado, con menos de 7 CAEX, como se observa en la ilustración 35, no se generan filas en el proceso de descarga, ya que no se cuenta con suficientes equipos de transporte. Por lo que el reordenamiento es prácticamente nulo lo que se traduce en que la espera de ambos casos sea parecida y no exista una ganancia significativa (menor a 1 %) en estos casos, tal como se ve en la ilustración 26, 31 y 34 respectivamente.



Ilustración 35: Caso 1 – Circuito de Chancado No Saturado.

El segundo caso, cuando el sistema está saturado o casi, se comienzan a generar filas en el proceso de descarga, lo que permite ordenar el sistema y con esto mejorar considerablemente, más de 2%, los porcentajes de utilización de camiones y procesamiento en chancado, además de obtener una reducción en la espera total de la flota.

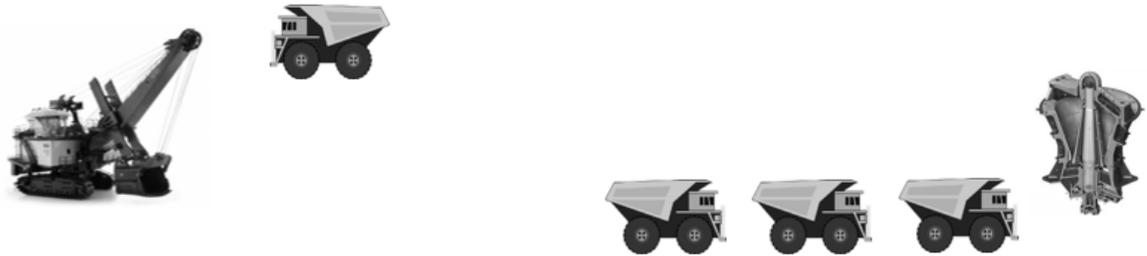


Ilustración 36: Caso 2 – Circuito de Chancado Saturado.

Por último, se tiene el sistema sobresaturado en el cual existe el reordenamiento, pero el cuello de botella se trasladó desde los equipos de transporte, y ahora van quedando camiones en espera durante tiempos muy prolongados en el proceso de descarga. Haciendo que el global en este proceso aumente con respecto al caso base, lo que significa una reducción de la ganancia con respecto del caso anterior.



Ilustración 37: Caso 3 – Circuito de Chancado Sobreesaturado.

5.2 Proceso de Abastecimiento de Combustible

Para optimizar el proceso de abastecimiento de combustible, en primer lugar, se requiere conocer el consumo proyectado de combustible, en otras palabras, en cuanto tiempo llegará el equipo a la reserva de combustible establecida. Esta información se obtuvo de la predicción que genera la red neuronal diseñada para este propósito, con lo cual se desarrolla la segunda ANN de este trabajo, la cual se presenta a continuación.

5.2.1 Red Neuronal – Abastecimiento de Combustible

Para crear la red neuronal de abastecimiento de combustible, se utiliza una del mismo tipo que en el caso de chancado, esto porque lo que se pretende hacer es básicamente lo mismo, predecir información a partir de parámetros en línea, por lo que en esta sección no se indagará más sobre porque se eligió este tipo de red. Sin embargo, a diferencia de la red anterior, esta cuenta con tres parámetros de entradas y una variable de salida.

Los parámetros de entrada que se consideraron para la construcción, son:

- Resistencia total: Esta resistencia está compuesta por la resistencia al rodado y la gravitacional, más detalles de cómo se compone se encuentran en el capítulo 2, este parámetro influye directamente sobre el consumo de combustible del equipo, ya que a una mayor resistencia se requiere mayor energía para trasladar el equipo de un punto a otro, lo que implica más gasto de combustible para poder generarla y entregarla a la transmisión del vehículo.
- Tonelaje: El tonelaje transportado influye en el peso total del equipo, lo que implica que entre mayor sea este parámetro, se requerirá una mayor energía para poder sacar el camión de la estática inicial y posteriormente, incrementar la velocidad. Se considera este parámetro sobre el peso total del equipo directamente, debido a que este va disminuyendo paulatinamente a medida que se consume el combustible, pero no son diferencias significativas a lo largo de un trayecto de ida y vuelta. Por el contrario, si es relevante si el equipo se traslada con carga o vacío.
- Velocidad Máxima: Este parámetro es relevante, ya que permite identificar la energía que fue requerida para llegar a esa velocidad y la necesaria para mantenerla, esto se identifica de mejor manera al pensar que para llegar a una velocidad mayor en un mismo circuito se requerirá una mayor inyección de combustible al motor, para generar la energía suficiente.

La variable de salida de este proceso es entonces el consumo proyectado de combustible, o en otras palabras el tiempo que falta para llegar a la reserva del estanque, punto en el cual el equipo tiene que ser reabastecido de manera inmediata.

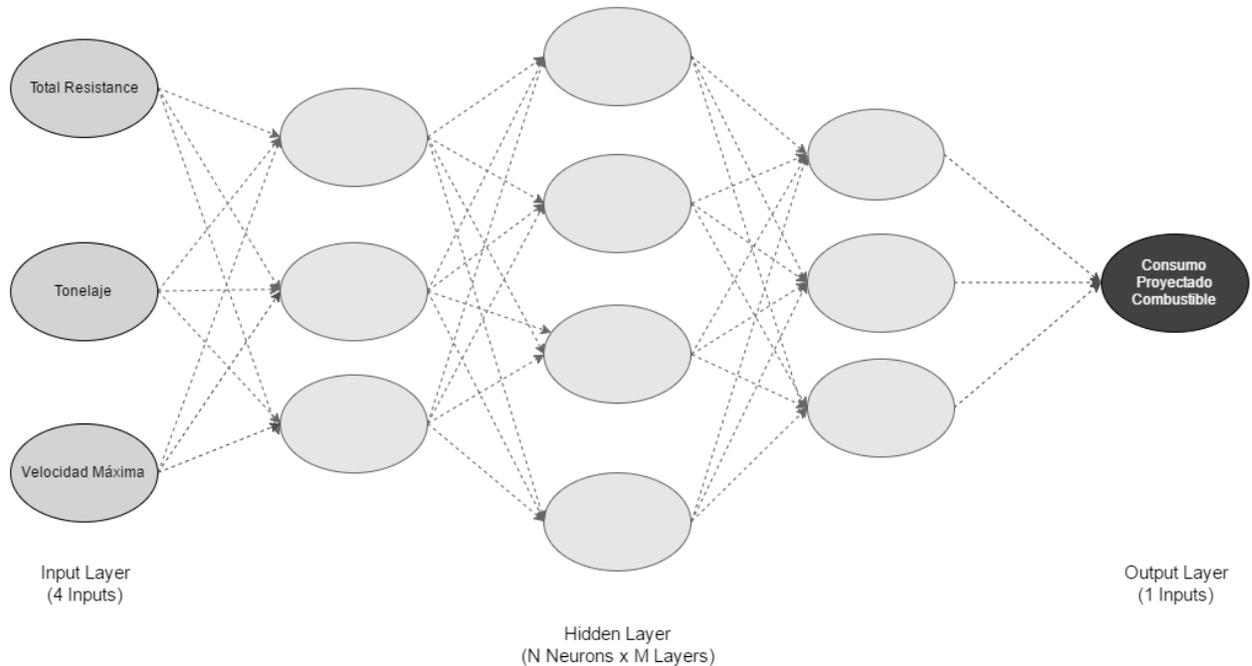


Ilustración 38: Arquitectura Red Neuronal Abastecimiento de Combustible.

5.2.2 Proceso de optimización del abastecimiento de combustible

Una vez conocido los consumos de combustible proyectados, gracias a la red neuronal, se tiene que existen caminos en los cuales los tiempos de traslado, son conocidos dentro de un intervalo y por el contrario, hay otros que no se sabe el tiempo que conllevara, hasta ocurrido el ciclo en cuestión, esto se debe a la proceso de asignación dinámica que existe dentro de las faenas.

Los tiempos que toma el camión de extracción desde el equipo de carguío, orígenes en la ilustración 39, a la zona de descarga, destinos, es conocido, ya que, durante el turno o gran parte de este, cada pala está cargando un tipo de material, por lo que tiene un destino relativamente fijo. Por otra parte, una vez que el equipo de transporte descarga el material, este es asignado a uno de carguío, el cual no se sabe de antemano. A causa de esto, se desconoce el tiempo estimado hasta el siguiente punto de carga, lo que genera que ese consumo de combustible sea diferente al proyectado, ya que variara de punto a punto. Esto implica una variación positiva o negativa, del tiempo en que el equipo llegara a la reserva de combustible respecto a lo proyectado. Por último, existe el trayecto entre las descargas a los puntos de abastecimiento de combustible, petroleras, distancia que es relativamente constante en periodos cortos de tiempo, por lo que el tiempo de viaje entre ellos es conocido con cierto grado de confianza.

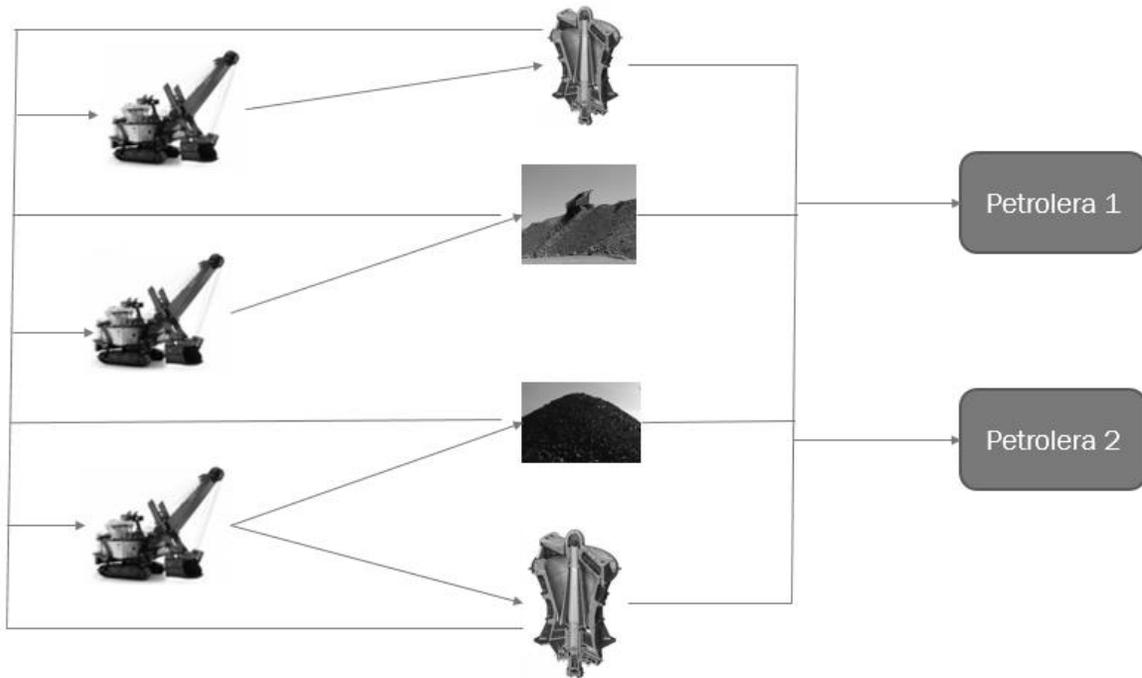


Ilustración 39: Trayectos entre orígenes (izquierda), destinos (centro) y petroleras (derecha).

Para llevar a cabo la optimización del proceso, se generan bloques de tiempo en los cuales se asigna un camión a cargar combustible, la cantidad creada depende del número de equipos de transporte que exista en faena, por lo que se hace evidente que entre menos estén circulando menor número de bloques habrá por día y estos tendrán una mayor duración, lo que implica y otorga una mayor flexibilidad al sistema.

Sin embargo, el sistema no está exento de complicaciones, debido a que por el hecho de desconocer el trayecto asignado desde el punto de descarga al de carguío, los equipos de transporte no llegan al bloque que se les había asignado, teniendo que cargar combustible en el bloque de otro equipo o una vez llegada su reserva, lo que de una u otra forma afecta a los camiones que, si llegaron durante la asignación correspondiente, generando filas e incrementando el tiempo detenido de los equipos.

Lo anterior se solucionó de la siguiente manera, una vez que se estima que un equipo llegará a su bloque asignado en los próximos dos ciclos, es el sistema de asignación de estaciones petroleras, quien controla y selecciona los recorridos de acuerdo al tiempo necesario para llegar a la estación de abastecimiento correspondiente, de tal manera de hacer que el desfase entre el comienzo de su bloque y el arribo a petrolera sea el menor posible, y no se afecte a los equipos posteriores.

Entonces para decidir después de que ciclo enviar a abastecer, se debe evaluar cuando el desfase es mínimo, esto se hace comparando dos circunstancias. La primera es evaluar cuanto será la diferencia de tiempo asociada al bloque correspondiente, en caso de enviar a recargar el camión inmediatamente. La segunda, es cuánto será si se le envía a realizar un determinado ciclo una vez más y luego es dirigido a la estación. El criterio de decisión es que diferencia es menor. En términos prácticos, el primer caso está dado por la sustracción entre el tiempo restante para que comience el bloque asignado y el de trayecto desde el destino en donde está el equipo a la petrolera asignada. La segunda diferencia, se calcula restándole al tiempo faltante para llegar al bloque asignado, el del ciclo por el cual se mandará el equipo y el de trayecto mencionado anteriormente. Se hace notorio que en el segundo caso existe una mayor variabilidad e incertidumbre, por las interferencias operacionales que podrían existir en el trayecto.

En consideración a lo anterior, para optimizar el proceso se utiliza un sistema de asignación dinámica a petroleras, donde se prioriza cargar los equipos cuando el combustible está cercano a la reserva, ya que esto implicara abastecerlos un menor número de veces en el largo plazo. Este sistema comienza la asignación de los equipos cuando han alcanzado el 40% de su estanque.

Como se observa en la ilustración 39, se consideraron dos petroleras y se simularon cuatro condiciones de flotas para realizar la simulación y asignación dinámica, en esta existen tres reglas para asignar un equipo a un bloque de tiempo determinado.

En las ilustraciones 40, 41 y 42, se representan los bloques de tiempo, mientras más a la izquierda en la ilustración se encuentre un bloque, el camión asignado tiene menos tiempo de combustible restante para operar y por lo tanto debe cargar combustible en el bloque en el cual su identificador está escrito. En aquellos casos en donde un bloque contiene el texto “[N]”, significa que aún no hay una unidad de transporte asignada para cargar en ese bloque de tiempo.

5.2.2.1 Caso 1.

En el caso 1, ilustración 40, el camión al alcanzar el punto de asignación, el sistema proyecta el consumo de combustible e identifica los bloques correspondientes a ese tiempo, si en ambas petroleras estos están desocupados, se selecciona la estación más cercana al destino de descarga de los dos últimos ciclos controlados.

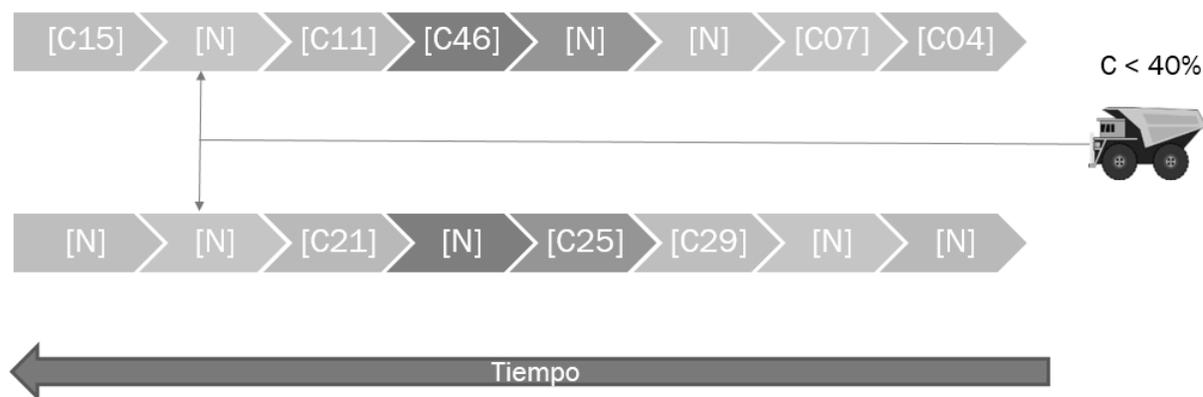


Ilustración 40: Caso 1 de asignación dinámica – Abastecimiento de Combustible.

5.2.2.2 Caso 2.

En este segundo caso, se tiene que el camión va a ser asignado a un conjunto de bloques, en donde una petrolera tiene ocupado el bloque respectivo, es decir ya tiene un camión asignado, esto se ve en la ilustración 41, en donde la estación superior posee al camión 46 (C46) asignado. En este caso el sistema evalúa si ubicar al camión en el bloque de la petrolera más lejana, el cual está disponible, o bien adelantar su recarga de combustible al bloque previo al camión 46, esto dependerá de cómo serán los últimos dos ciclos controlados y la distancia que existirá a la petrolera.

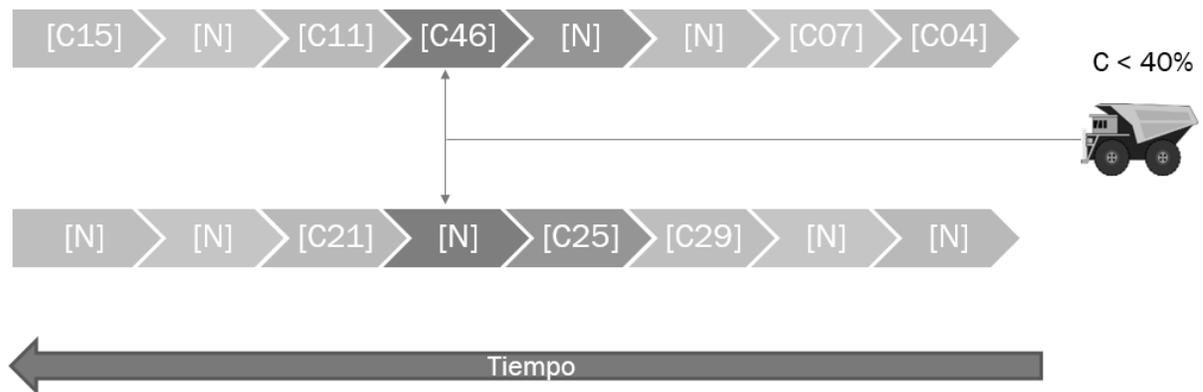


Ilustración 41: Caso 2 de asignación dinámica – Abastecimiento de Combustible.

5.2.2.3 Caso 3.

El último caso a discutir, ocurre cuando la reserva del camión está proyectada para un conjunto de bloques ocupados en ambas petroleras, ilustración 42, en esta situación el sistema en primer lugar evalúa cual tiene cupos disponibles previo al bloque que se intenta asignar, si ambas tienen disponibilidad, se elige por la petrolera que tenga el bloque más cercano habilitado. Luego, se compara el combustible del camión que se quiere asignar con el que estaba previamente fijado a ese bloque, el equipo que proyecte una menor cantidad de combustible a ese tiempo es adelantado, ya que se debe asegurar que ningún camión tenga riesgo de estar bajo la reserva. Por ejemplo, si el camión se va asignar a la petrolera superior, el sistema compara el combustible de este con el de C11, el que sea menor será adelantado de lugar, al suceder esto el adelantado se compara con C46 donde el proceso será el mismo y así sucesivamente hasta encontrar el espacio disponible.



Ilustración 42: Caso 3 de asignación dinámica – Abastecimiento de Combustible.

5.2.3 Simulaciones del Proceso de Abastecimiento de Combustible

Al contrario de las simulaciones realizadas para el proceso anterior, estas se realizaron usando los tiempos de ciclos de faena para los intervalos conocidos y dejando que las asignaciones a los equipos de carguíos fueran aleatorias. Esto para cuantificar cuánto mejora la producción, sin alterar los procesos de forma predeterminada y finalmente, comparar los resultados obtenidos con los de la realidad. Para las simulaciones se consideraron los siguientes supuestos:

- No se considera en la simulación ningún tipo de fallo en los equipos, tanto en los de carguío, transporte y petroleras.
- Se simula dos petroleras, disponibles todo el tiempo excepto 1,5 horas por colación de los operadores.
- Los tiempos de ciclos son aleatorios y representan los de faena.
- El objetivo es ver como se reduce el tiempo de espera en petrolera al usar el algoritmo de asignación dinámica.
- Se simulan situaciones en donde hay 40, 60 ,80 y 100 CAEX circulando por la mina.
- Se realizan 1.000 simulaciones para cada caso de 24 horas cada una.
- La resistencia al rodado se usa como parámetro fijo en las simulaciones.

5.2.4 Modelamiento

El modelamiento, se lleva a cabo de tal forma que represente la realidad y la variabilidad de esta lo más posible. Los tiempos de ciclos, tonelajes y velocidades se crean mediante la distribución de probabilidad asignada.

La lógica de simulación utilizada se representa en el siguiente modelo conceptual:

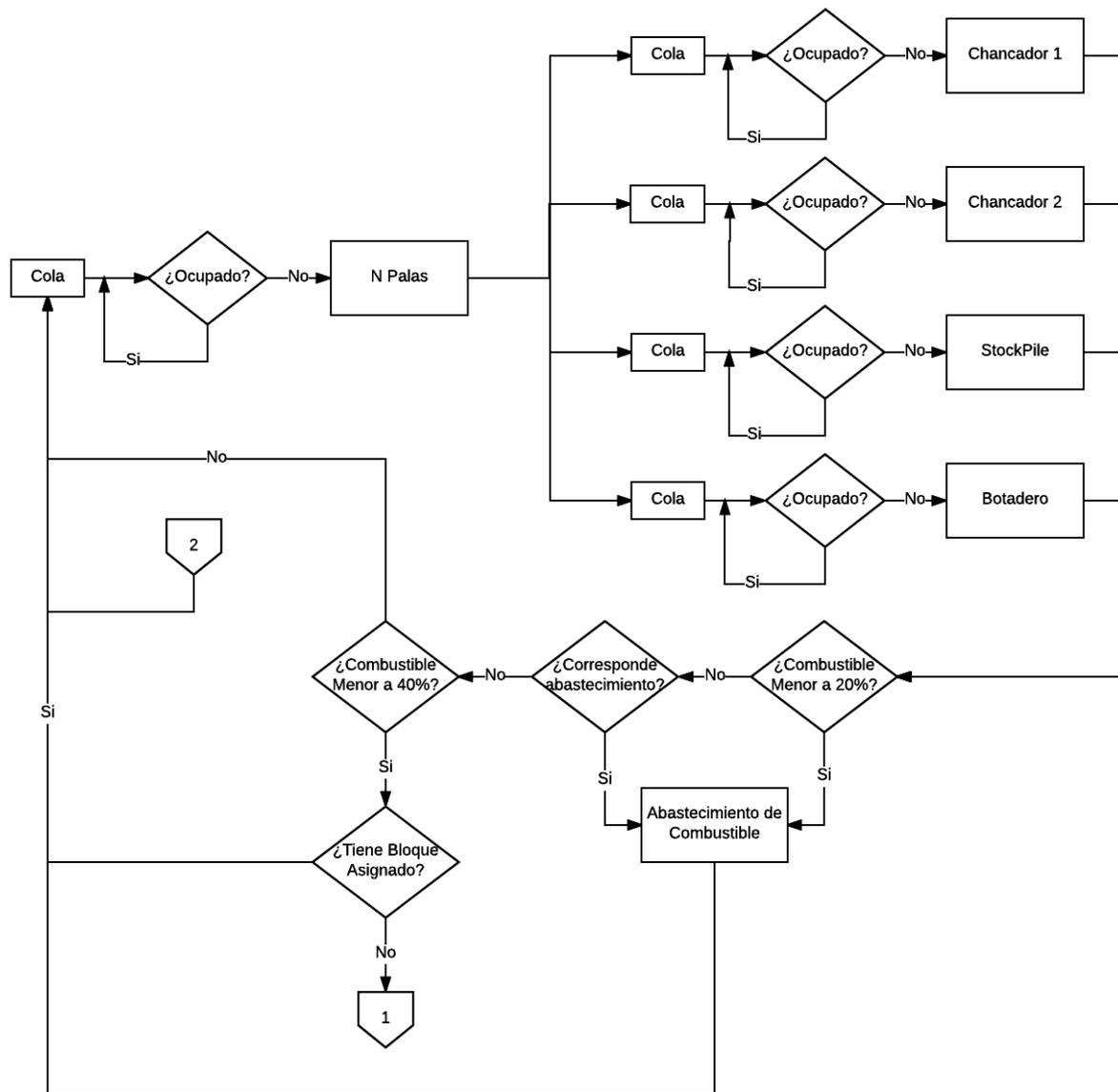


Ilustración 43: Modelo Conceptual - Abastecimiento de Combustible Parte 1

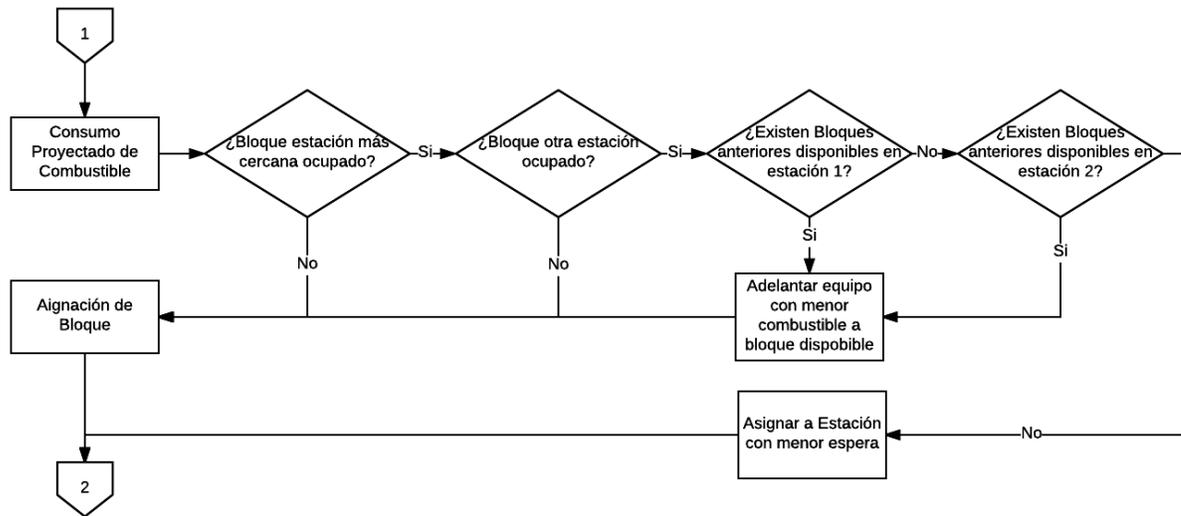


Ilustración 44: Modelo Conceptual - Abastecimiento de Combustible Parte 2.

5.2.5 Tiempo de espera en abastecimiento de combustible

Luego de realizadas las simulaciones, se analizan los tiempos de esperas. De las tablas a continuación se observa, que la detención promedio que tendrá cada camión para abastecerse de combustible dependerá directamente de la cantidad que exista en circulación. Esto se hace claro al pensar que entre más equipos circulen por faena, menos tiempo va a tener cada bloque, hasta llegar al punto en donde el tiempo de abastecimiento sea mayor a la duración del mismo, por lo que existirá una espera obligada por parte de cada equipo. Los histogramas se pueden encontrar en el anexo C (8.3.2) y las tablas con las desviaciones estándar y resúmenes de resultados en el E.

Tabla V: Resultados Simulación - 40 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	0,3	3.661
Máx.	2,6	3.753
Min.	0,0	3.544

Tabla VI: Resultados Simulación - 60 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	1,7	3.556
Máx.	5,3	3.610
Min.	0,0	3.490

Tabla VII: Resultados Simulación - 80 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	3,1	3.483,7
Máx.	25,5	3.567,3
Min.	0,1	3.429,5

Tabla VIII: Resultados Simulación - 100 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	38,8	3.520,3
Máx.	153,2	3.600,4
Min.	2,9	3.438,6

Además, es importante comprender que cargar una mayor cantidad de litros por recarga, implica realizar un menor número de detenciones por este concepto, para explicar esto asumamos que el estanque de los camiones fuera de 1.100 litros y que tienen una autonomía de 12 horas hasta la reserva de 100 litros. Esto implica que, si el estanque se rellena en la reserva, este proceso se realizaría dos veces al día, por el contrario, si se realiza el mismo procedimiento cuando solo se han consumido 500 litros, el estanque se rellenara cuatro veces en el mismo periodo de tiempo. Lo anterior implica esperar el doble del tiempo y aumentar los tiempos de trayectos hacia petrolera. En la situación actual de la faena los camiones cargan en promedio 2.647 litros, lo que significa que por cada 5 abastecimientos que se hacen, solo se requerirán 4 con los promedios logrados por el proceso de optimización.

Si se comparan las cuatro tablas anteriores, se determina que los litros promedios por carga van disminuyendo a medida que se aumenta el número de camiones, lo que es lógico si se considera que, al tener más en circulación, se deben adelantar los abastecimientos para reducir la espera por equipo, que es lo que se está optimizando. Pero nótese, que cuando se simulan 100 camiones, los litros promedios por carga vuelven a aumentar, esto sucede ya que el sistema al no ser capaz de priorizar equipos por estar sobresaturado, solo manda a rellenar el estanque según requerimiento o, mejor dicho, cuando el equipo está cercano a la reserva.

En resumen, al tener menos equipos en circulación existen mayores opciones de acomodar los equipos a los distintos bloques, los cuales serán de mayor duración y por lo tanto tendrán mayor flexibilidad, pero al llegar a valores altos de número de camiones el tiempo de espera se dispara.

5.2.6 Resumen de resultados – Abastecimiento de Combustible

En esta sección, se presentan los principales resultados para las 1.000 simulaciones realizadas de 24 horas cada una, con flotas de 40, 60, 80 y 100 CAEX. La optimización realizada se expresa por la siguiente función lógica:

$$f(CPC, tv, Np, Nc) = \min(\text{Tiempo de espera}) \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde:

- CPC: Consumo proyectado de combustible.
- tv: Tiempo de viaje.
- Np: Número de petroleras disponibles.
- Nc: Número de camiones en circulación.

De la Ecuación 7, depende de los parámetros mencionados anteriormente. Esto se comprende, al analizar que el tiempo de espera será menor si se cuenta con un mayor número de petroleras disponibles y menor cantidad de equipos de transporte en circulación. Además, de si existen mayores diferencias de tiempo para que los camiones de extracción alcancen su reserva, con lo cual se requerirán menores reabastecimiento de manera simultánea.

El caso más similar a faena es el de 60 camiones en circulación, el tiempo máximo de espera que hubo en terreno fue de 22,3 minutos y promedio por camión de 5,6 minutos. Si se compara con el caso más representativo, se llega a las siguientes mejoras:

- Se recuperan 3,9 minutos de espera por camión. Considerando que se realizan entre 50 a 70 cargas por día, se tiene un ahorro de 195 a 273 minutos. Lo que es aproximadamente, recuperar las demoras no programadas de 4 CAEX en el día.
- Esto implica que, si se considera una disponibilidad del 100% de los camiones y que el tiempo recuperado se traslada totalmente a productividad, la utilización de los camiones aumenta en un 3,2% aproximadamente. Esto se explica por la disminución del número de cargas de combustible y el tiempo recuperado en cada abastecimiento.

En la ilustración 45, se observan las tendencias mencionadas anteriormente:

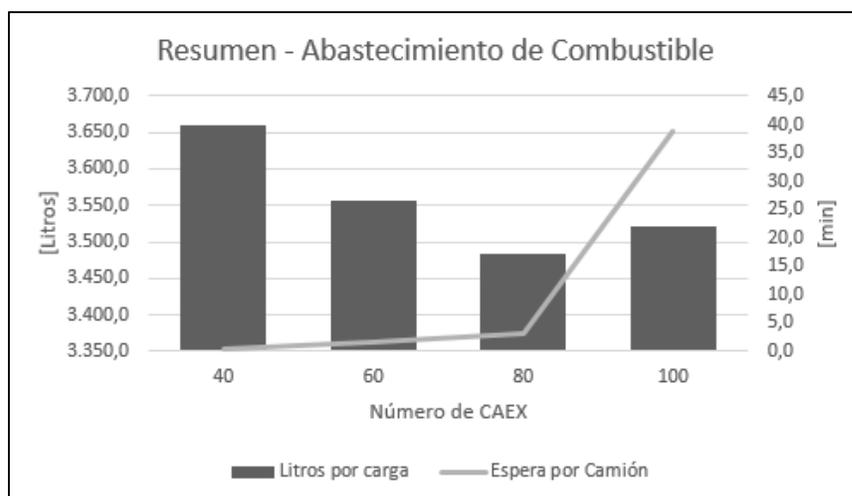


Ilustración 45: Resumen Resultados – Abastecimiento de Combustible

CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La optimización de los procesos productivos es esencial en las faenas mineras, ya que permite obtener el mejor retorno de los activos y generar una posición sólida a nivel de industria. En este marco, el uso de redes neuronales para la predicción de parámetros desconocidos, en conjunto con modelos de optimización, otorgan beneficios adicionales considerables.

Los sistemas tradicionales de gestión como Jigsaw, Modular y otros, a la fecha, no han integrado sistemas como el mencionado, entregando información deficiente y conduciendo a medidas equivocadas.

Las herramientas de análisis no deben simplemente evaluar de manera independiente los procesos, sino que deben incorporar información de los distintos sectores, para de esta forma, decidir en base a experiencia e historia. Con esto, se evalúan de manera conjunta y se optimizan de acuerdo a la información obtenida de los pasos anteriores.

Gracias a trabajos multidisciplinarios y a los nuevos avances tecnológicos en el área de la informática, se consiguió desarrollar modelos capaces de adaptarse al entorno en el que se desarrollan, evaluando las condiciones para mejorar los procesos aguas abajo y el negocio.

En cuanto al proceso de optimización de chancado que es primordial para el negocio, ya que marca la producción de mineral, las mejoras obtenidas al aplicar el modelo dependerán de la cantidad de camiones en el circuito y el largo de este. De los casos estudiados el con 11 CAEX en un circuito de 5 km, representa un óptimo, en este se obtuvieron los siguientes resultados.

- Se reduce la espera total en un 9,0% en la descarga a chancado y un 11,5% en la carga, esto se debe principalmente a una mejor distribución de los equipos de transporte en el circuito, gracias al reordenamiento en el proceso de chancado.
- Gracias a lo anterior, se aumenta la utilización de los CAEX en el circuito en un 1,9% y la del chancado en 2,0%, esto significó un incremento en la producción de un 2,4%.
- Finalmente, recordando que los valores anteriores son por equipo y considerando valores promedios para los procesos, además de un precio del cobre de 2 US\$/lb, se obtienen ingresos de 16,8 MUS\$/año por cada chancador en faena.

Para el proceso de optimización de abastecimiento de combustible, las mejoras al aplicar el modelo dependerán de la calidad de los datos en línea que se disponga en faena. De los casos estudiados, el más representativo de la realidad es el de 60 CAEX en circulación y dos estaciones de abastecimiento, en este se obtuvieron los siguientes resultados:

- Gracias al algoritmo de asignación dinámica, se reducen entre un 60 a 70% la espera promedio por camión en petrolera, recuperando 3,9 minutos por cada carga de combustible.
- Se aumentan los litros promedio por carga, reabasteciendo los equipos en un 79% en promedio contra el 60% en faena, lo que significa disminuir el número de recargas en el horizonte de tiempo e incrementar la descongestión de la petrolera.

- Considerando los dos puntos anteriores y que la disponibilidad de los equipos es un 100% (caso con menor incremento) se aumenta la utilización de la flota en un 3,2%, lo que significa que en caso de mantener los demás parámetros operacionales constante se puede lograr un incremento similar en el movimiento de material.

Se concluye del trabajo, que la aplicación de algoritmos de predicción y optimización en la minería pueden generar grandes beneficios a costos relativamente bajos, creando herramientas de gestión que mejoren los procesos productivos y la continuidad operacional de estos. Para el caso particular de los modelos desarrollados, se evidencia el impacto que tendría en la operación el uso de sistemas como los descritos.

6.2 Recomendaciones

Como recomendaciones futuras de investigación, se debe considerar la viabilidad de realizar pruebas en terreno de ambos modelos, con la respectiva integración a los sistemas de información de la faena, esto para determinar cuánto es lo efectivamente recuperado en los procesos descritos a mejoras productivas y no se pierda en otros problemas operacionales.

Previamente a lo anterior, también resulta interesante evaluar el caso de negocio, que genera el incremento en la productividad de los equipos, ya que, si bien en este trabajo se consideró ingresos, no se analizó el efecto que tendría el aumento en los costos.

Es importante considerar que, en las modelaciones realizadas, se dejó fuera cualquier tipo de falla de los equipos y no se consideraron interferencias operacionales. Estas no se consideraron debido a que el objetivo del trabajo es demostrar el beneficio de los algoritmos creados, eliminando la mayor cantidad de variabilidad posible. Por su parte, no se consideró en los procesos de predicción el desempeño del operador, parámetro que en la práctica podría ser altamente relevante, ya que no se contaba con información detallada respecto a los trabajadores.

Para mantener los beneficios mencionados, se debe considerar al momento de implementar en faena este tipo de soluciones, el riesgo asociado a la cultura interna en las actuales empresas mineras, ya que las condiciones de trabajo cambiarán, particularmente con el modelo de chancado. Esto significaría un gran trabajo de adaptación y comunicación de parte de los supervisores hacia los operadores, con la finalidad de reducir esta incertidumbre, y por tanto llegar a los valores esperados en periodos cortos de tiempo.

Las principales complicaciones de implementar estos modelos en faena es que se deberá identificar si existe espacio disponible para poder reordenar los equipos de transporte llegando al sector de chancado, ya que por lo general las zonas abiertas en faena son reducidas. Además, el sistema de evaluación de desempeño de los trabajadores, se basa principalmente en el tonelaje trasladado o movido, por lo que los operadores podrían sufrir una disminución en sus índices. Lo anterior, se soluciona modificando paulatinamente el sistema interno de cada faena.

Otro riesgo asociado al proceso de reabastecimiento de combustible, es el no seguir los últimos ciclos controlados por el modelo y mantenerse bajo el esquema actual de trabajo, lo que podría quitar funcionalidad al algoritmo o incluso incrementar las horas de espera para reabastecer. También, para que el sistema funcione de manera adecuada es recomendable la implementación de sensores de combustible en línea, con la finalidad de corregir el proceso.

Un método alternativo al propuesto, sería realizar un proceso estático de asignación a reabastecer combustible, es decir, que cada equipo o conjunto de estos vaya en un horario previamente establecido, esto con la finalidad de agrupar la flota en macro bloques de tiempo. Para el proceso de chancado, se comenzaría realizando un sistema de reasignación a stockpile o botadero cuando un camión de extracción cumple con condiciones que afectaran el proceso de chancado significativamente. Estas medidas podrían generar mejoras inferiores a las previstas, pero sería una alternativa para comenzar el proceso de adaptación.

Por último, es sumamente relevante hacer un llamado a los altos cargos a incorporar estas nuevas tecnologías en la operación, ya que significan cambios disruptivos en los procesos, los cuales se han realizado de la misma manera en los últimos años, sin adoptar metodologías que conlleven una toma de decisiones basada en información.

CAPITULO 7 BIBLIOGRAFÍA

Ayala, W. (2014). *Procesos Constructivos y Productivos de la Minería*. Diplomado en Gerencia de Estudios y Presupuestos. Minera El Brocal.

Cardinal, D. (2016). *IBM's resistive computing could massively accelerate AI and get us closer to Asimov's positronic brain*.

Carvajal, D. (2015). *Evaluación de metodologías de estimación de tiempos de ciclo en Minería Escondida*. Universidad de Chile.

Dastani, M. M. (1991). *Functie-Benadering met Feed-Forward Netwerken*. Universidad de Amsterdam.

Gómez, J. (2011). *Aplicación de técnicas de simulación para optimizar las operaciones de carga y transporte en una mina a tajo abierto*. Escuela Profesional de Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de San Agustín.

Grossberg, S. (1976). *Adaptive pattern classification and universal recoding I & II*. Biological Cybernetics, 23, 121{134, 187{202

Krose, B. & Van der Smagt, P. (1996) *An introduction to neural networks*.

Lagos, E. (2007) *Gestión operativa del Sistema de despacho estudio técnico y económico*, Universidad de Chile.

McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.

Pearlmutter, B. A. (1990). *Dynamic Recurrent Neural Networks* (Tech. Rep. Nos. CMU-CS-90-196). Pittsburgh, PA 15213: School of Computer Science, Carnegie Mellon University.

Soofastaei, A., Saied, A., Mohammad, A. & Mehmet, A. (2016). *Development of a multi-layer perceptron artificial neural network model to determine haul trucks energy consumption*. International journal of Mining Science and Technology pg. 285-293

Viñuela, I., Galván, P. (2004). *Redes Neuronales Artificiales*. Un enfoque Práctico. Prentice Hall

Yarmuch, J. (2014) *Apuntes del curso MI5071 Sistemas mineros*, Universidad de Chile.

CAPITULO 8 ANEXOS

8.1 Anexo A: Contexto Empresa

Hexagon es una empresa enfocada en tecnologías de medición industrial, la cual se ha expandido a soluciones geoespaciales y software que generan sinergias, para de esta forma establecerse como líder mundial en soluciones con tecnologías de información. La cual está presente en 46 países y cuenta con 16.000 empleados.

Además, es una empresa enfocada en la innovación y desarrollo, invirtiendo el 11% de sus ventas en esta área y contando con más de 3.400 empleados y 3.200 patentes.



Ilustración 46: Principales enfoques de Hexagon.

8.1.1 Visión

En Hexagon se aspira a desempeñar un rol de líderes en el esfuerzo para resolver los desafíos que enfrenta nuestro mundo, proporcionando tecnologías de la información innovadoras que hacen un impacto positivo y duradero.

8.1.2 Misión

Hexagon está dedicada a ofrecer información útil a través de tecnologías que permiten a los clientes cambiar de forma inteligente a través de los diversos pasajes de la industria.

8.1.3 Sectores de Negocio

Hexagon se enfoca en dos grandes áreas de negocio, las soluciones geoespaciales y para empresas industriales, llegando a los distintos mercados por uno u otro aspecto. El resumen de industrias en las cuales se encuentran soluciones de esta empresa, se encuentran en la ilustración 47.

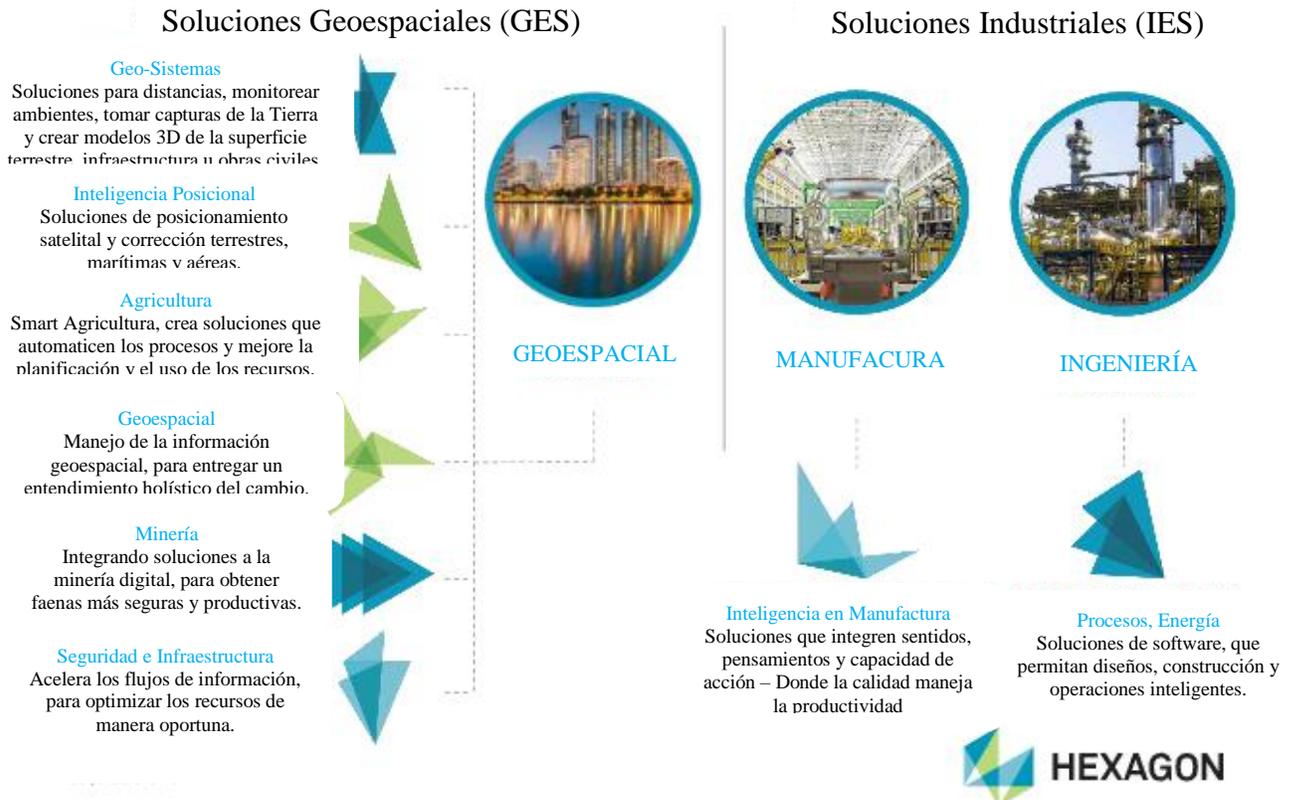


Ilustración 47: Sectores de Negocios – Hexagon (Fuente: Presentación Corporativa).

En la ilustración 48, se encuentran los ingresos por ventas que ha tenido la empresa desde el año 2000, en el cual se comenzó con la estrategia de negocios actual, llegando a su record de ventas el año 2015 alcanzado los 3.000 millones de Euros y una utilidad de un 22,8% aproximadamente. Además, en el mismo grafico se puede ver la transición al nuevo sector de negocios de Hexagon y como fueron aportando al ingreso neto anual.

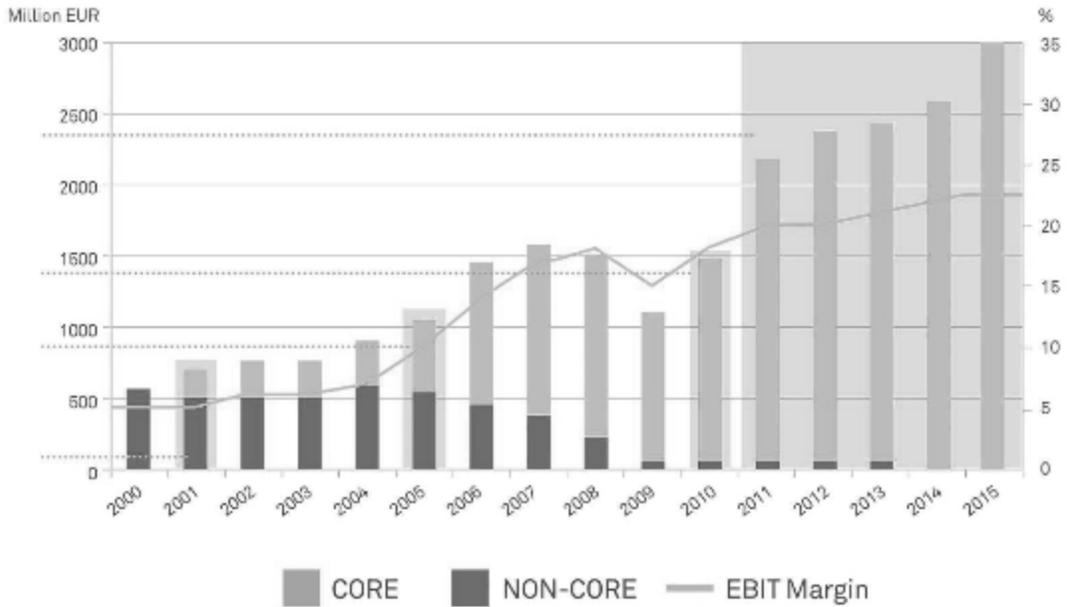


Ilustración 48: Ventas y márgenes anuales de Hexagon (Fuente: Presentación Corporativa).

Ahora, también es relevante observar como contribuye cada una de las grandes áreas de negocios en la empresa, esto se puede observar en la ilustración a continuación:

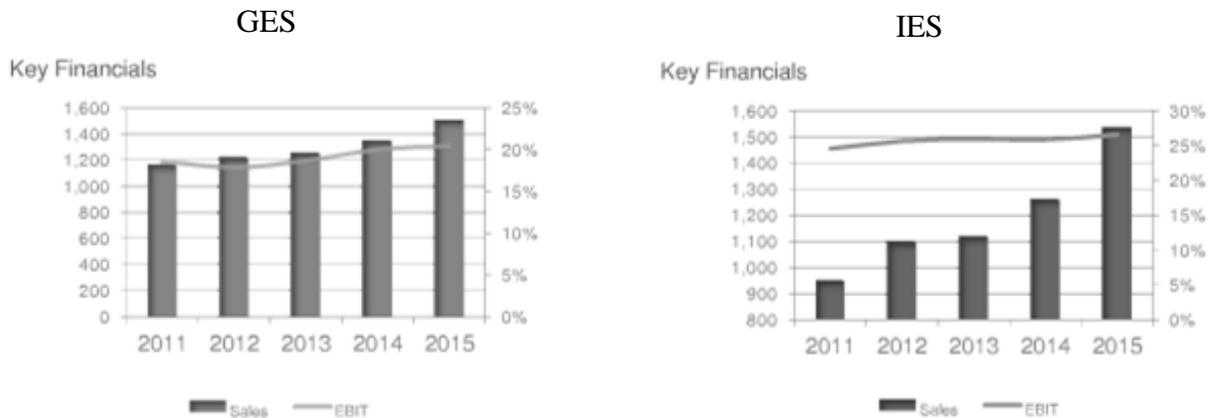


Ilustración 49: Ingresos por área de negocio - Hexagon (Fuente: Presentación Corporativa).

En la ilustración 49, la situación de la izquierda se explica por un fuerte desarrollo en Europa Occidental y América del Norte, sumado a las nuevas iniciativas y productos geoespaciales de Leica. Por su parte el grafico de la derecha se debe a un desarrollo en la inteligencia en las industrias de automovilismo, aeroespacial y electrónica, principalmente.

En el ámbito minero, Hexagon se ha posicionado como una de las grandes empresas colaboradoras de tecnologías a la industria, llegando al segundo lugar del ranking realizado por Mining Journal, en donde se evaluaron más de 100 parámetros y proveedores desde la exploración hasta el procesamiento de mineral. La lista completa se puede observar en la tabla VIII.

Tabla IX: Ranking de empresas líderes en tecnología en minería.

Mining technology supply leaders 2015				
Major software/hardware suppliers to miners: SAP, IBM, Microsoft, Oracle, Autodesk, Pitney Bowes				
Mining/mineral processing equipment manufacturers also supplying technology: Atlas Copco, Caterpillar, Sandvik, Outotec, Joy Global, Boart Longyear, Komatsu*, Hitachi**				
Leading dedicated technology suppliers to the mining/metals industry (including exploration)				
	Company	Headquartered	Principal mining technology business/s	Public/private
1	ABB/ABB Ventyx	Switzerland	Monitoring, control and automation systems; software	Public
2	Hexagon/Hexagon Mining	Sweden	Software; monitoring and control systems	Public
3	Glencore Technology	Australia	Develops, markets and supports technologies for mineral processing/metals smelting and refining	Public
4	Dassault Systemes	France	Software	Private
5	Siemens	Germany	Industrial process control technologies	Public
6	Rajant Corporation	USA	Communications technology/software	Private
7	Trimble Navigation	USA	Surveying/communication technologies; software	Public
8	Honeywell	USA	Process control/automation technologies	Public
9	Schneider Electric	France	Plant monitoring/automation technologies	Public
10	Bentley Systems	USA	Software	Private
11	Becker Mining Systems	Germany	Communications technology/software	Private
12	Modular Mining Systems	USA	Software/monitoring, control and automation systems	Public (part of Komatsu)
13	Endress+Hauser	Germany	Instrumentation/monitoring and control technologies	Private
14	Maptek	Australia	Software; surveying technology	Private
15	Mine Site Technologies	Australia	Communications technology/software	Private
16	Krohne Group	Germany	Industrial process control technologies	Private (KROHNE Messtechnik is public-listed entity)
17	Thermo Fisher Scientific	USA	Elemental analysis technologies	Public
18	Immersive Technologies	Australia	Training simulation technologies	Private
19	GroundProbe	Australia	Surveying/communication technologies; software	Private
20	Rockwell Automation	USA	Plant monitoring/automation technologies	Public
21	Remote Control Technologies	Australia	Remote control, machine guidance, machine monitoring technologies	Private
22	Downer Group	Australia	Software (Otraco, Snowden)	Public
23	Wenco	Canada	Software/monitoring, control and automation systems	Public (part of Hitachi)
24	Tiefenbach Control Systems	Germany	Automation/control technologies	Private
25	TOMRA Sorting Solutions	Norway	Mineral sorting technologies	Public
26	Micromine	Australia	Software	Private
27	Davey Bickford	France	Mine blast initiation technologies	Private
28	Cavotec	Switzerland	Remote control, machine guidance, machine monitoring technologies	Private
29	ARANZ Geo	New Zealand	Software	Private
30	acQuire	Australia	Software	Private

*Komatsu includes Modular Mining Systems sales. **Hitachi includes Wenco Mining Systems sales

8.2 Anexo B: Curvas de probabilidad para los parámetros de entrada.

De los parámetros mencionados en el capítulo 4, sólo algunos son estudiados, esto principalmente porque existen datos como la dureza, modelo de chancadores, entre otros que son fijo o propios de un sector. Por lo tanto, los datos a los cuales se les estimara las distribuciones de probabilidad son:

- Tiempo de Acuatamiento.
- Tiempos de Carga y Descarga.
- Tonelajes
- Tiempos de ciclos.
- Tiempo excavación y/o rendimiento pala.

Las distribuciones de probabilidad son estimadas de los datos recolectados a través de los sistemas de información de la faena y contrarrestadas con el GPS del equipo. Una vez realizado este primer paso, se realizó una prueba de bondad de ajuste para asegurar la representatividad de la distribución acorde a los datos obtenidos. Para cada conjunto de datos, se define la hipótesis nula y alternativa, para aplicar el test estadístico de Anderson Darling con un nivel de confianza del 5%, es decir cuando p valor sea mayor a este valor, se acepta la hipótesis nula.

8.2.1 Tiempo de acuatamiento

El Acuatamiento, es el proceso por el cual un equipo de transporte se posiciona en el lugar adecuado, ya se frente a un equipo de carguío o para descargar el material.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos ($n=140$), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0): Los datos distribuyen como una distribución Log-normal.
- Hipótesis Alternativa (H_a): Los datos no distribuyen como una distribución Log-normal.

Los datos fueron agrupados en clases como se observa en la ilustración 50, El valor calculado de los datos es menor al crítico, por lo cual se acepta la hipótesis nula y se obtiene que efectivamente los datos distribuyen acorde a lo esperado, esto se puede observar en la ilustración 51.

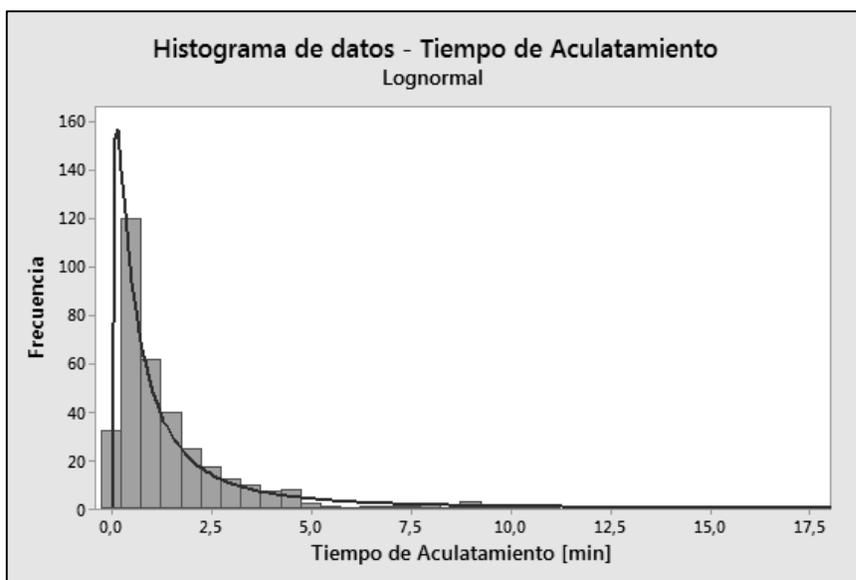


Ilustración 50: Histograma de datos - Tiempo de Acuatamiento

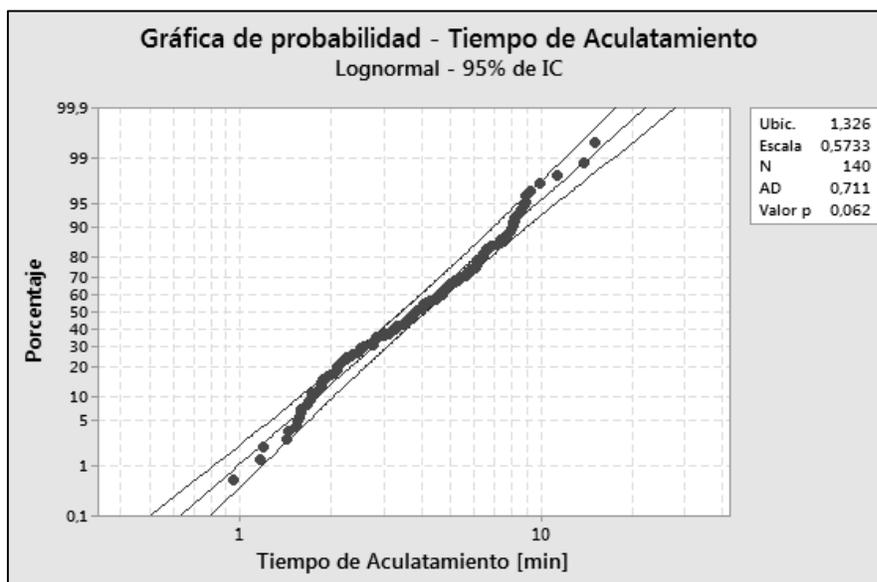


Ilustración 51: Gráfica de probabilidad de Tiempo de Acuatamiento

Como el p valor es 0,062 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla X: Resumen Tiempo de Acuatamiento

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Acuatamiento	1,48	1,71

8.2.2 Tiempo de Carguío

El tiempo total de carguío para este caso es el tiempo que demora la pala eléctrica en cargar el camión de extracción, antes de poder efectuar este proceso el equipo de transporte debe acularse. Una vez terminado el proceso de carguío el camión comienza su recorrido hasta el punto de descarga asignado.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=140), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0): Los datos distribuyen como una distribución Log-normal.
- Hipótesis Alternativa (H_a): Los datos no distribuyen como una distribución Log-normal.

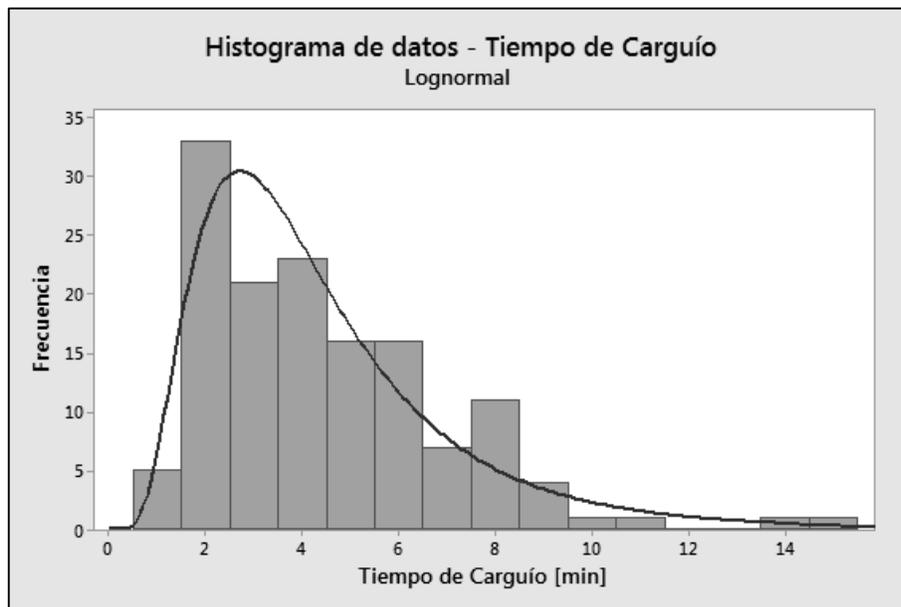


Ilustración 52: Histograma de datos - Tiempo de Carguío

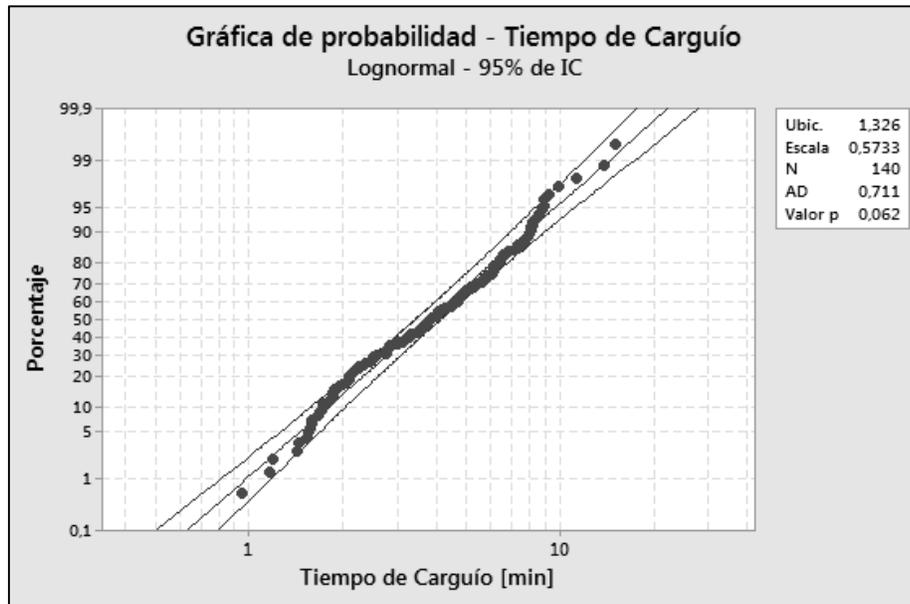


Ilustración 53: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Carguío

Como el p valor es 0,062 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XI: Resumen Tiempo de Carguío

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo total de Carguío	4,41	2,54

8.2.3 Tiempo de Descarga

Para el caso de las descargas se consideran los tiempos de descarga en chancado, botadero y stockpile, estos se estudian de manera conjunta, debido a que se evalúa el tiempo efectivo para el proceso, por lo que no depende de donde se esté realizando. Al igual que en el proceso anterior, el equipo de transporte antes de poder descargar debe acularse.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos, para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0): Los datos distribuyen como una distribución Log-normal.
- Hipótesis Alternativa (H_a): Los datos no distribuyen como una distribución Log-normal.

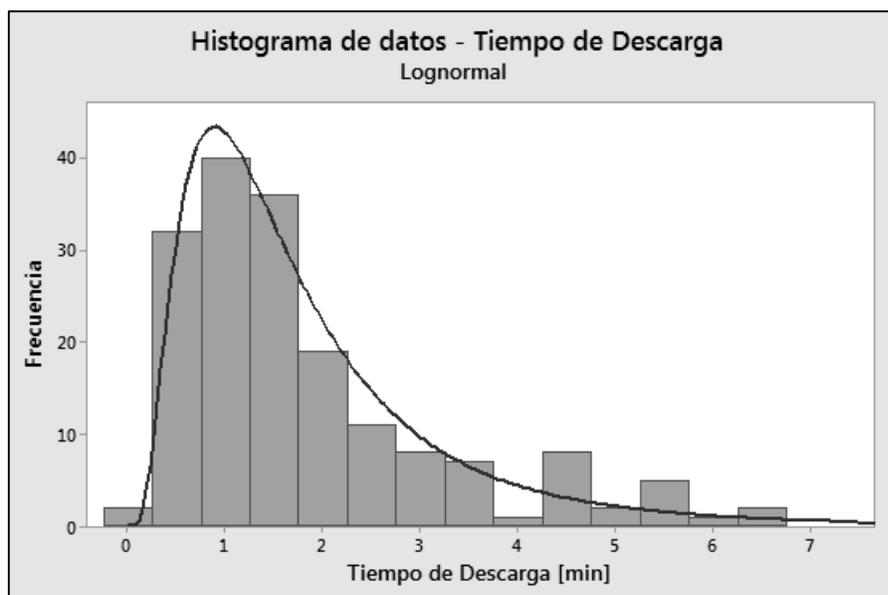


Ilustración 54: Histograma de datos - Tiempo de Descarga

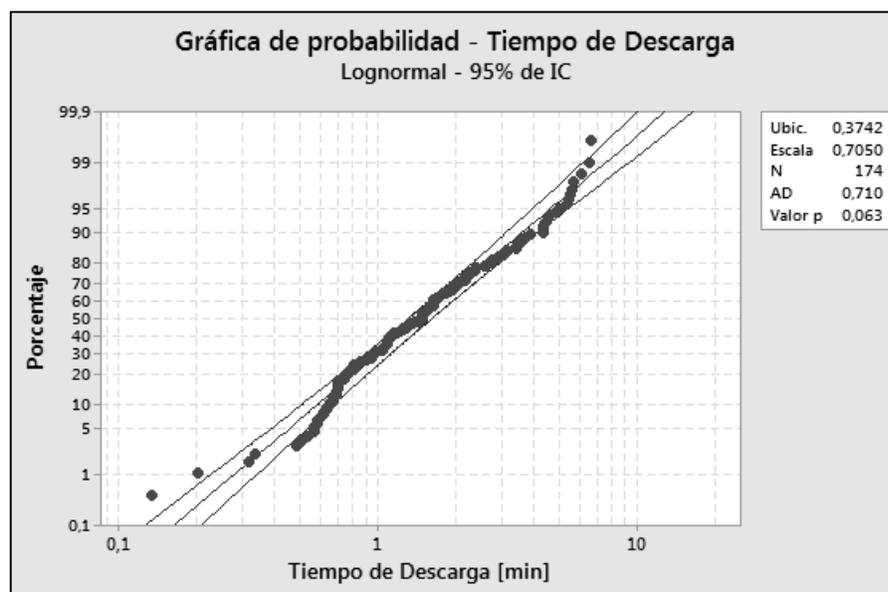


Ilustración 55: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Descarga

Como el p valor es 0,063 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XII: Resumen Tiempo de Descarga

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Descarga	1,84	1,38

8.2.4 Tonelajes

Se busca la distribución de las cargas que transportan los camiones de extracción, estas dependen del modelo del equipo de transporte.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos ($n=1.777$), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0): Los datos distribuyen como una distribución Normal.
- Hipótesis Alternativa (H_a): Los datos no distribuyen como una distribución Normal.

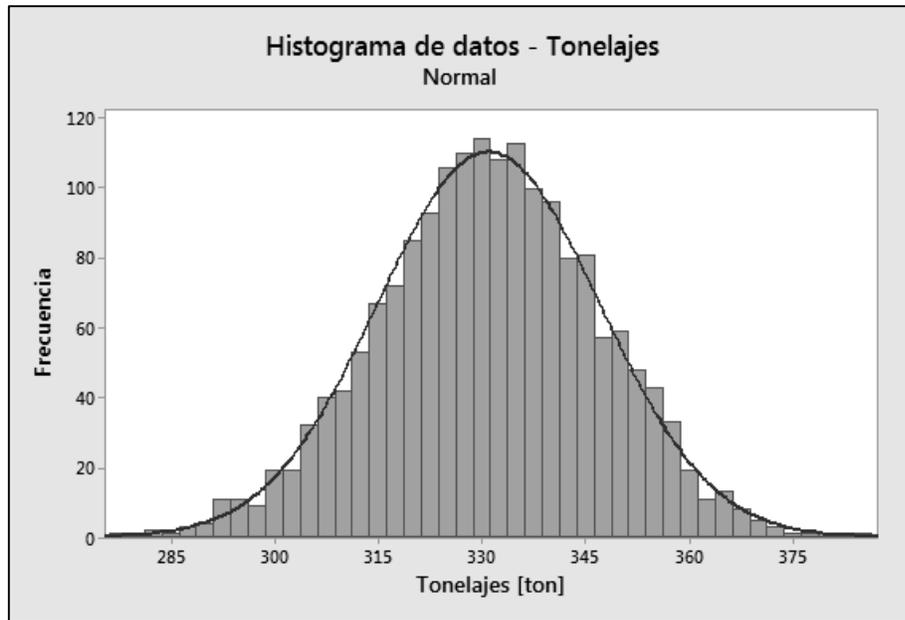


Ilustración 56: Histograma de datos – Tonelajes

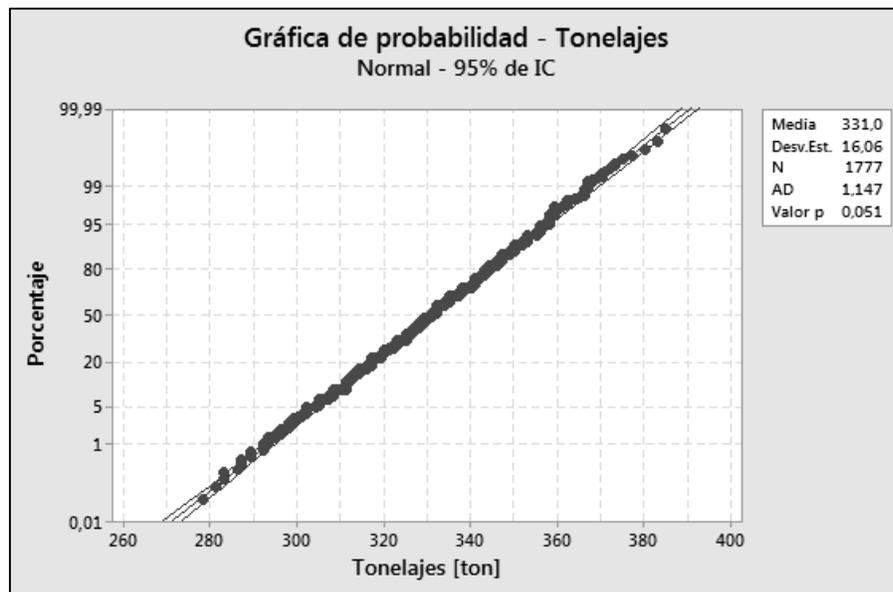


Ilustración 57: Gráfica de probabilidad - Tonelajes

Como el p valor es 0,051 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XIII: Resumen Tonelajes

	Media [ton]	Desviación Estándar [ton]
Tonelajes	331	16

8.2.5 Tiempos de Viajes

Con respecto a los tiempos de viajes se analizaron circuitos estáticos a cada destino, es decir el tiempo de viaje de una pala a cierto punto de descarga y no todas las configuraciones posibles de recorrido. También, se consideran las interferencias operacionales en el trayecto, pero no los tiempos de espera en destino, y se estiman por separados los tiempos de viaje cargado y vacío para cada caso.

8.2.5.1 Tiempo de viaje Pala – Chancado

Tiempo de viaje cargado.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=318), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (Ho): Los datos distribuyen como una distribución Weibull.
- Hipótesis Alternativa (Ha): Los datos no distribuyen como una distribución Weibull.

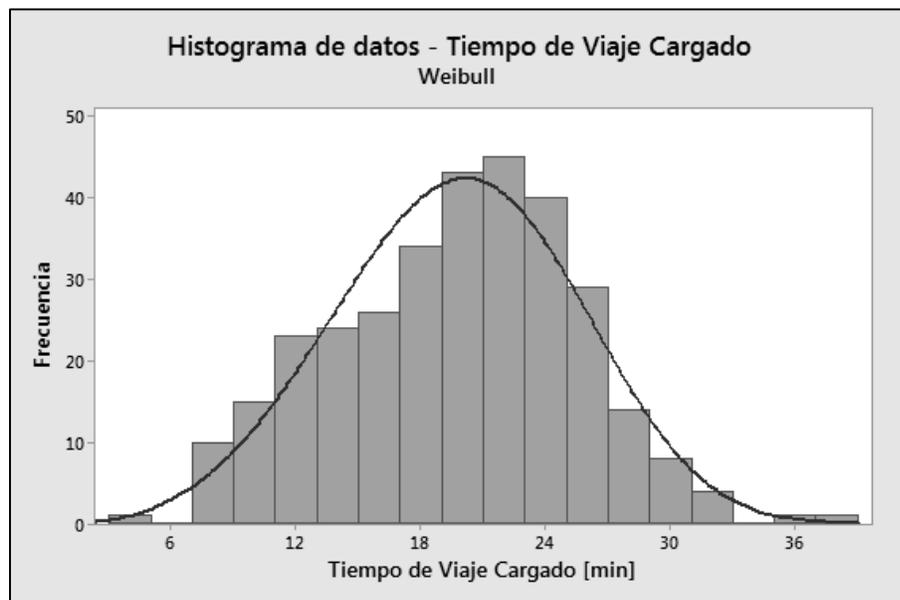


Ilustración 58: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Chancado)

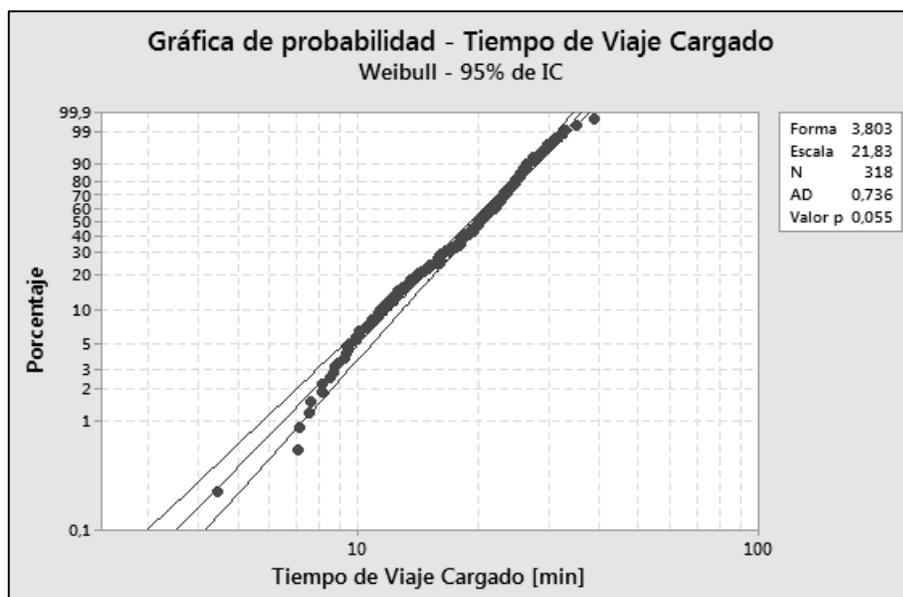


Ilustración 59: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Chancado)

Como el p valor es 0,055 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XIV: Resumen Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Chancado)

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Viaje Cargado	19,3	6,5

Tiempo de viaje vacío.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=219), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H₀): Los datos distribuyen como una distribución Log-normal.
- Hipótesis Alternativa (H_a): Los datos no distribuyen como una distribución Log-normal.

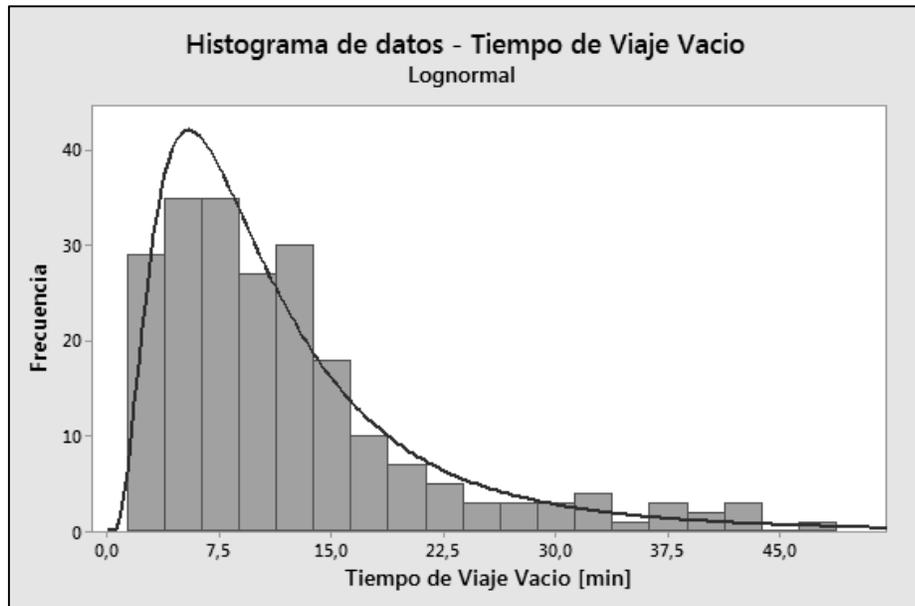


Ilustración 60: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Vacío (Pala - Chancado)

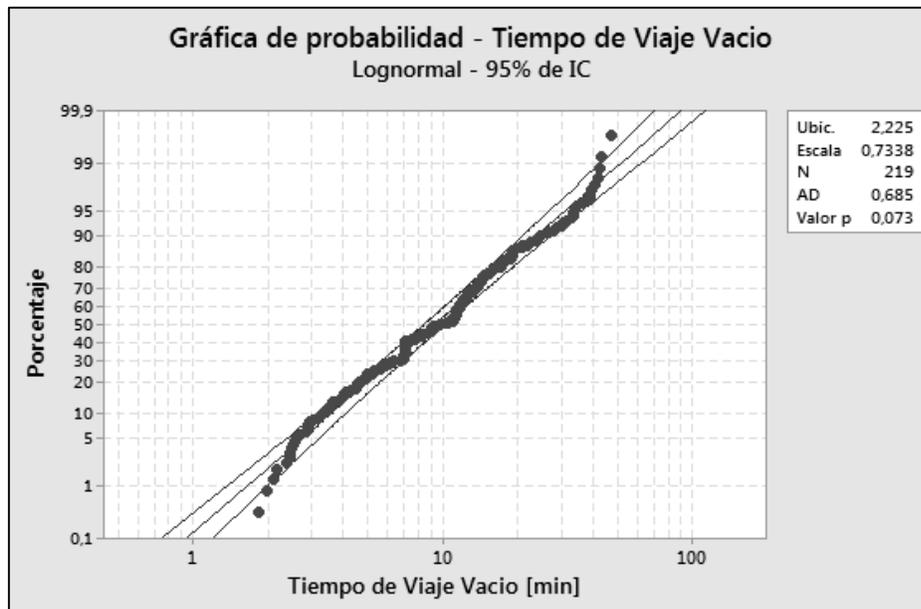


Ilustración 61: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Vacío (Pala - Chancado)

Como el p valor es 0,073 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XV: Resumen Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Chancado)

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Viaje Vacío	12,0	9,2

8.2.5.2 Tiempo de viaje Pala – Botadero

Tiempo de viaje cargado.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=82), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (H₀): Los datos distribuyen como una distribución Weibull.
- Hipótesis Alternativa (H_a): Los datos no distribuyen como una distribución Weibull.

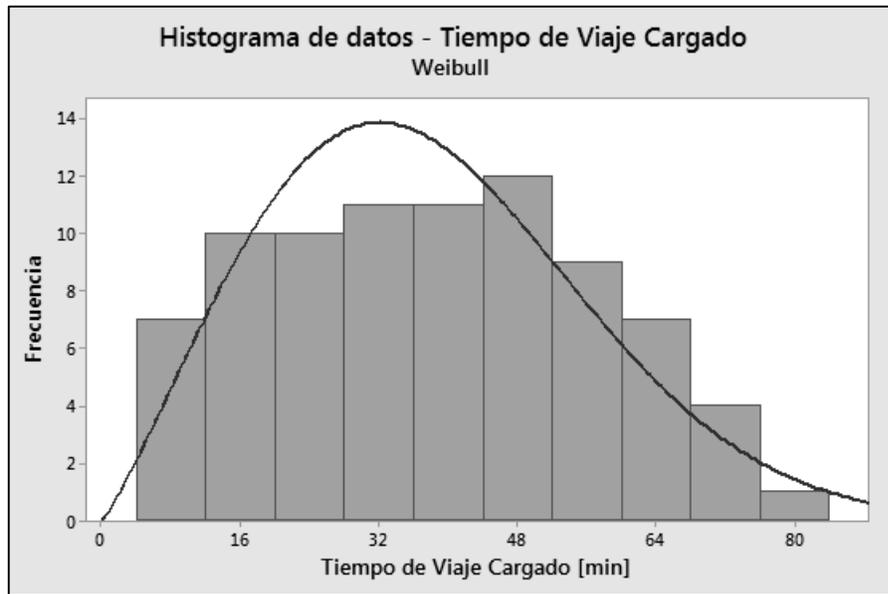


Ilustración 62: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Botadero)

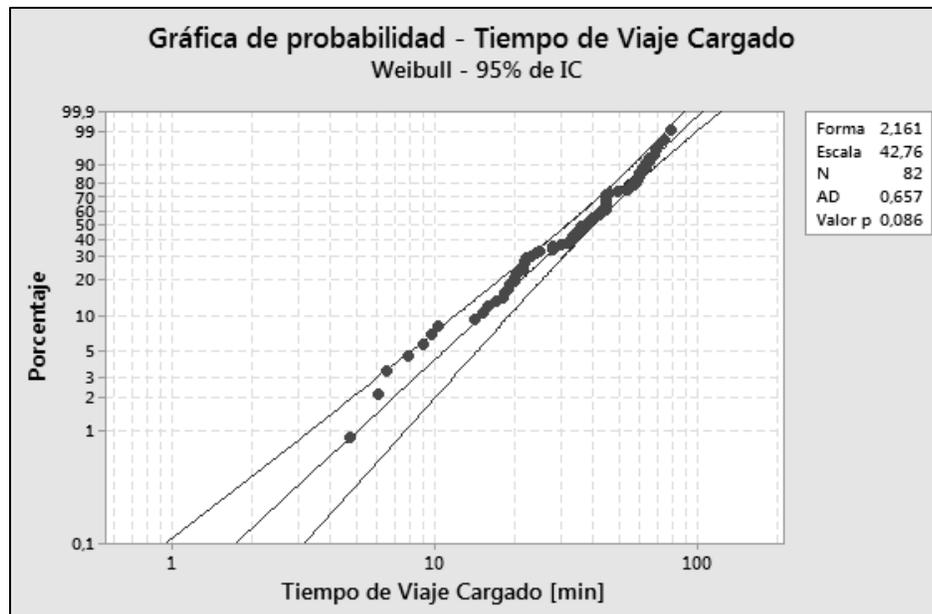


Ilustración 63: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Cargado (Pala - Botadero)

Como el p valor es 0,086 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XVI: Resumen Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Botadero)

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Viaje Cargado	37,9	18,6

Tiempo de viaje vacío.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=79), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (Ho): Los datos distribuyen como una distribución Log-normal.
- Hipótesis Alternativa (Ha): Los datos no distribuyen como una distribución Log-normal.

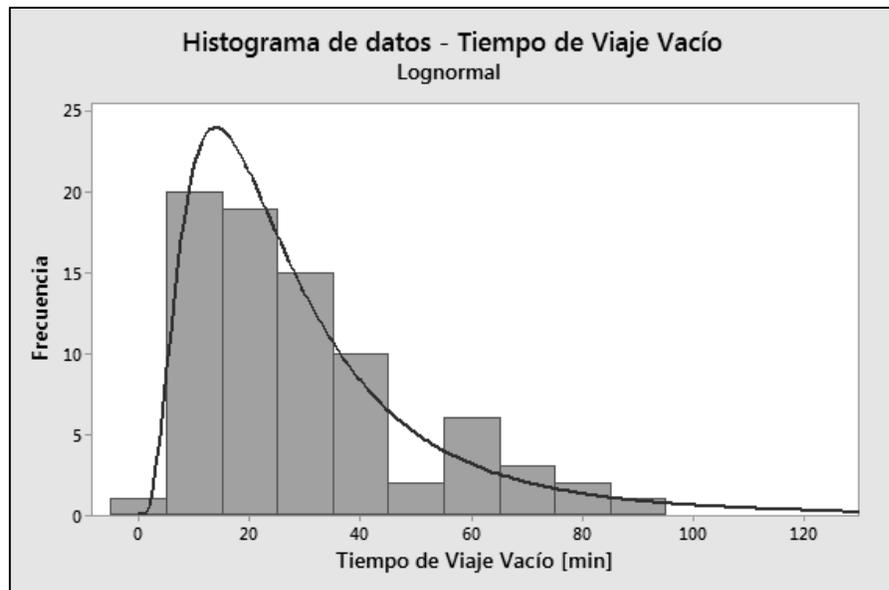


Ilustración 64: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Botadero)

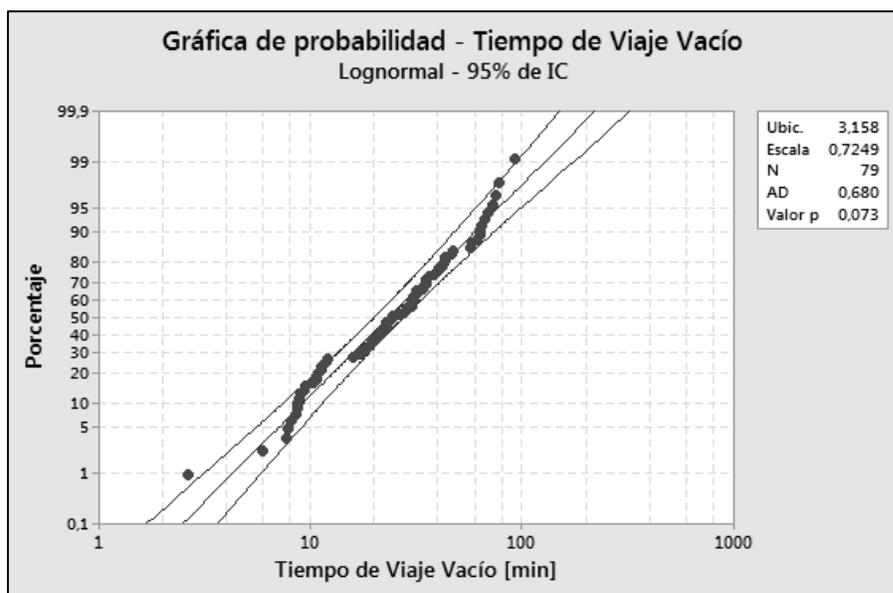


Ilustración 65: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Botadero)

Como el p valor es 0,073 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XVII: Resumen Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Botadero)

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Viaje Vacío	29,8	19,9

8.2.5.3 Tiempo de viaje Pala – Stockpile

Tiempo de viaje cargado.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=125), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (Ho): Los datos distribuyen como una distribución Log-normal.
- Hipótesis Alternativa (Ha): Los datos no distribuyen como una distribución Log-normal.

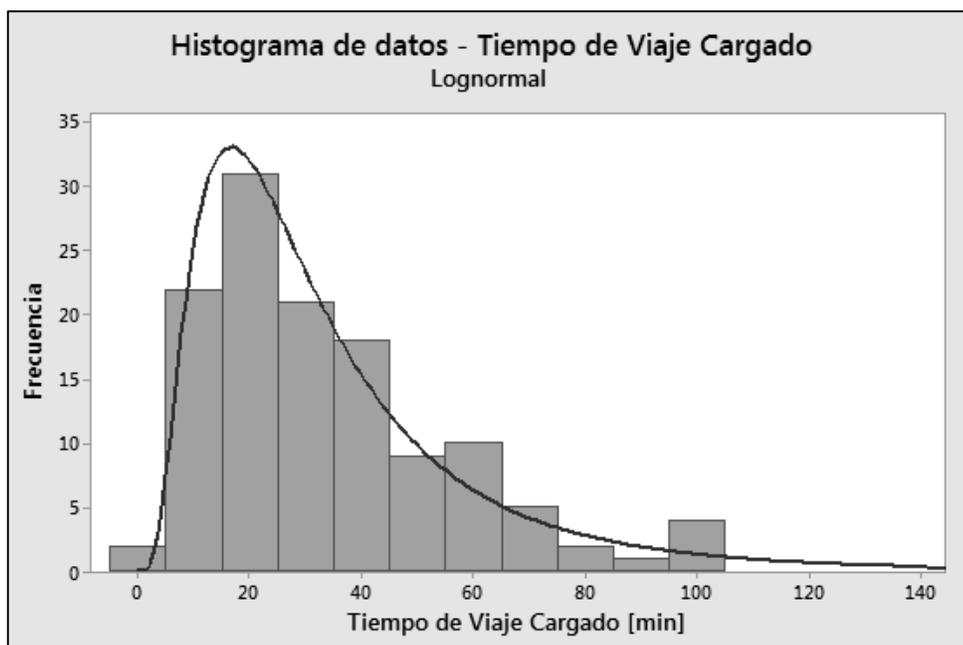


Ilustración 66: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Stockpile)

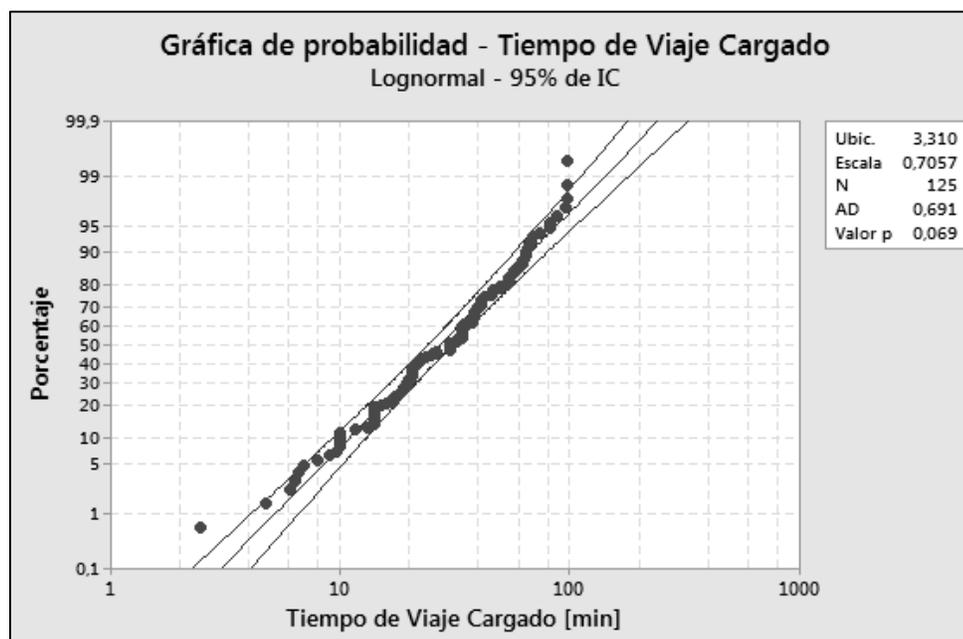


Ilustración 67: Gráfica de datos - Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Stockpile)

Como el p valor es 0,069 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XVIII: Resumen Tiempo de Viaje Cargado (Pala – Stockpile)

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Viaje Cargado	34,1	21,9

Tiempo de viaje vacío.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=112), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (Ho): Los datos distribuyen como una distribución Log-normal.
- Hipótesis Alternativa (Ha): Los datos no distribuyen como una distribución Log-normal.

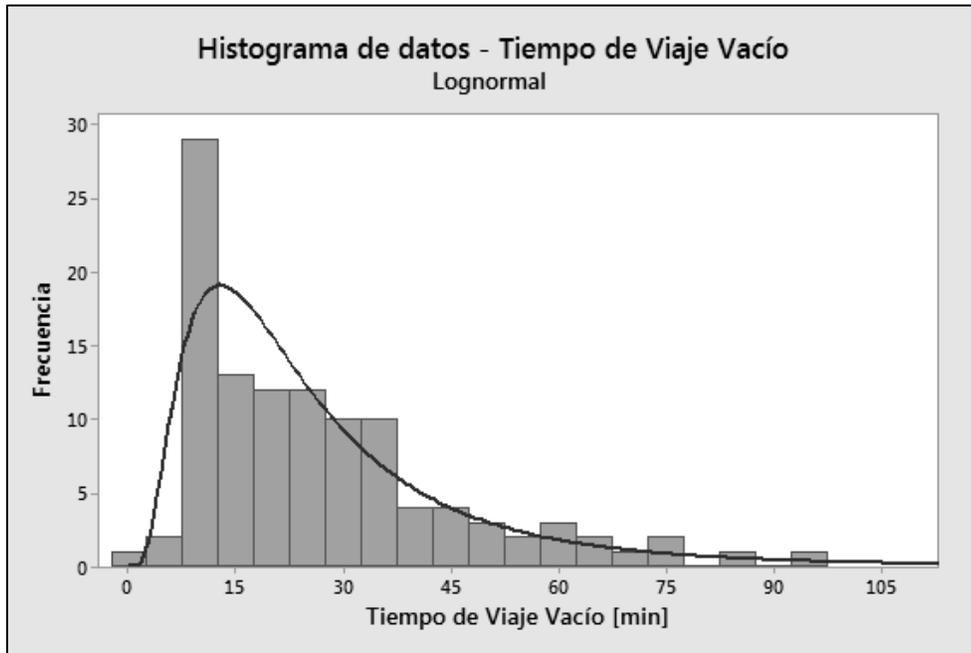


Ilustración 68: Histograma de datos - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Stockpile)

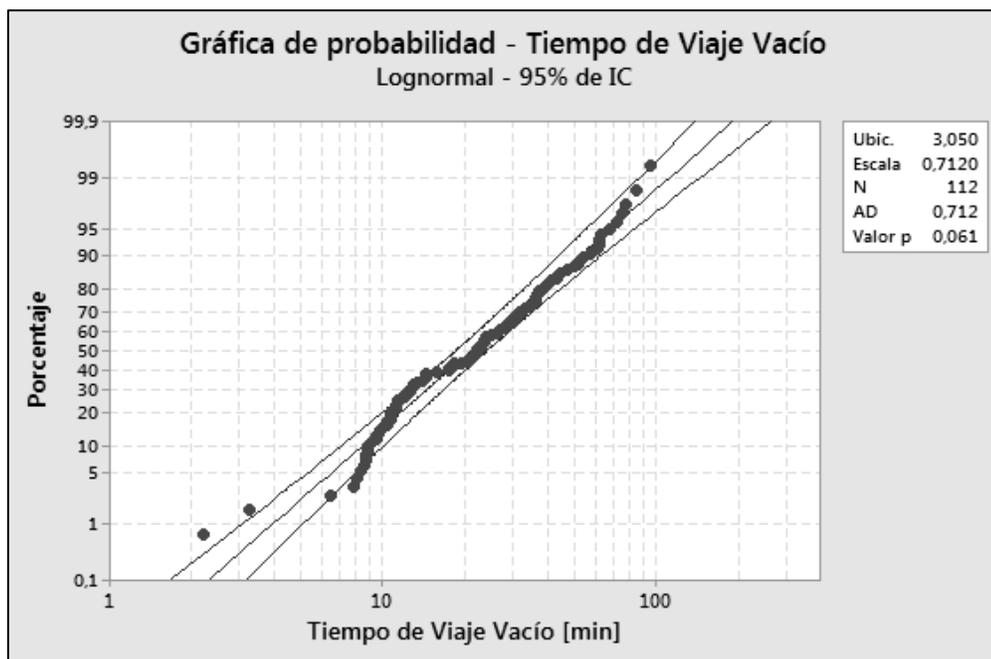


Ilustración 69: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Stockpile)

Como el p valor es 0,061 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XIX: Resumen Tiempo de Viaje Vacío (Pala – Stockpile)

	Media [min]	Desviación Estándar [min]
Tiempo de Viaje Vacío	26,8	19,0

8.2.6 Tiempo excavación pala.

El tiempo de excavación de las palas, corresponde al tiempo que se demora está en cargar su balde, en otras palabras, es cuando comienza a cargar hasta que termina de contactar al frente. A su vez, el rendimiento efectivo es el tonelaje que carga el equipo de carguío en un equipo de transporte dividido por el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso.

Se generan el histograma de frecuencia de los datos (n=154), para así agruparlos en clase y llevar a cabo el test, para lo cual se definen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula (Ho): Los datos distribuyen como una distribución Weibull.
- Hipótesis Alternativa (Ha): Los datos no distribuyen como una distribución Weibull.

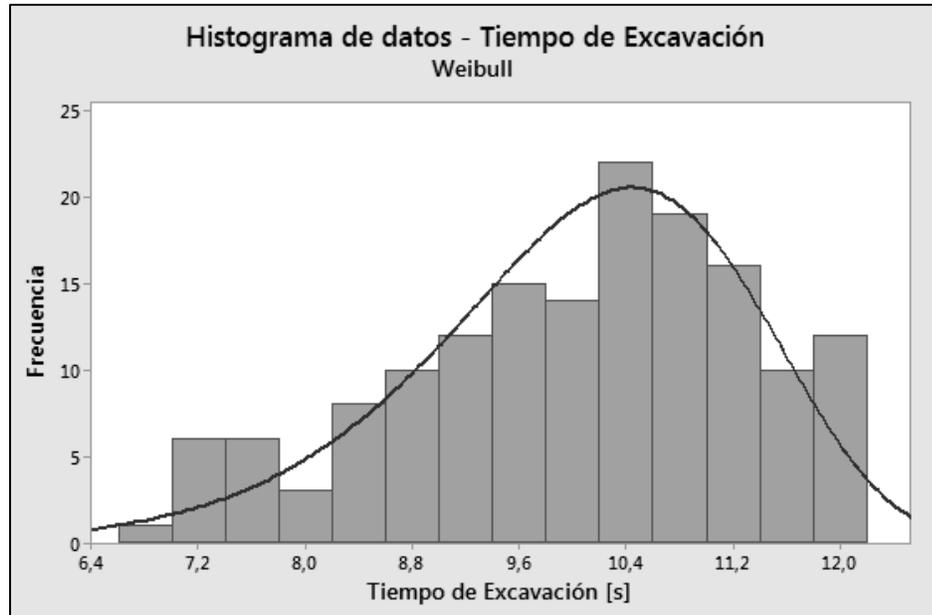


Ilustración 70: Histograma de datos - Tiempo de Excavación Pala

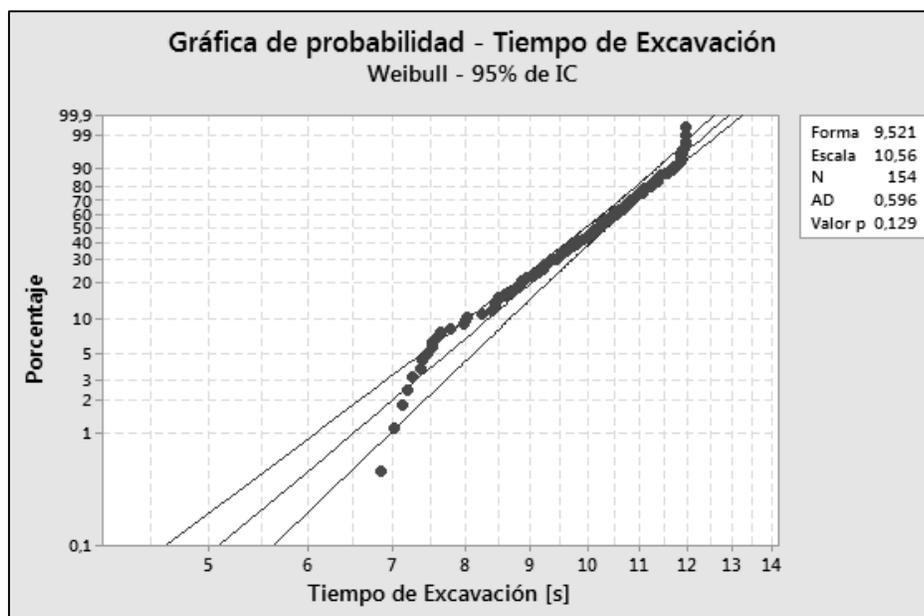


Ilustración 71: Gráfica de probabilidad - Tiempo de Excavación Pala

Como el p valor es 0,129 se acepta la hipótesis nula y se obtiene, en resumen:

Tabla XX: Resumen Tiempo de Excavación Pala

	Media [s]	Desviación Estándar [s]
Tiempo de Excavación Pala	10,0	1,3

8.3 Anexo C: Histogramas para los resultados obtenidos

Este análisis se llevó a cabo para determinar la convergencia y distribución de los resultados obtenidos en las simulaciones, además de observar el comportamiento de cada caso base para poder compararlo cuando se optimizan los procesos. Esta sección se dividirá entonces en los resultados del proceso de chancado y abastecimiento de combustible.

8.3.1 Optimización del Proceso de Chancado

Los resultados analizados en esta etapa corresponden al tiempo de espera total en chancado, la utilización de los equipos de transporte y tonelaje procesado, para el caso base como el optimizado.

8.3.1.1 Espera total en Chancado

Caso 5 CAEX

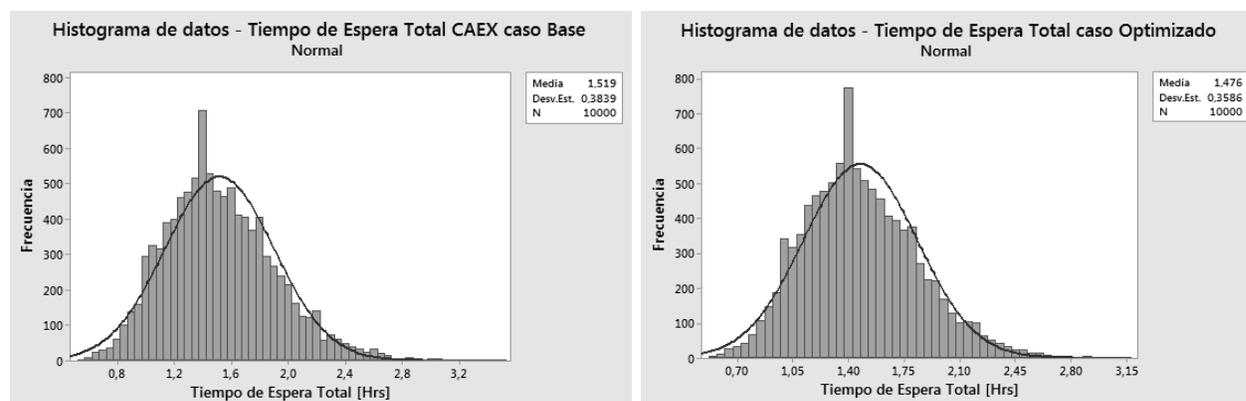


Ilustración 72: Espera total en Chancado - Caso 5 CAEX

Caso 6 CAEX

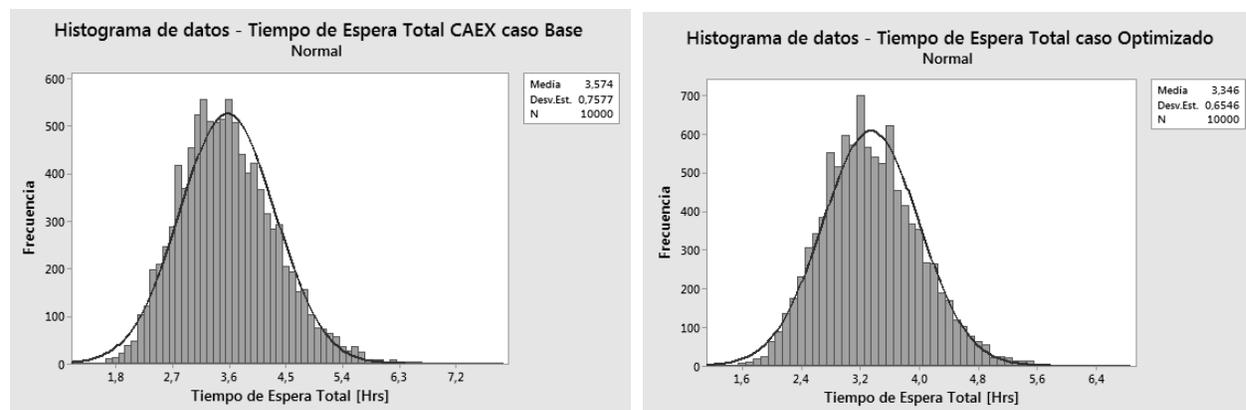


Ilustración 73: Espera total en Chancado - Caso 6 CAEX

Caso 7 CAEX

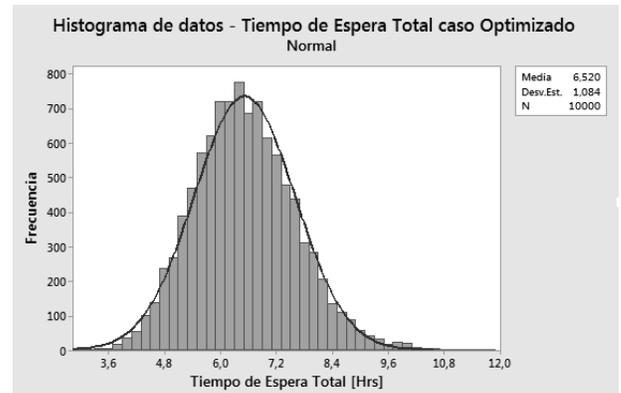
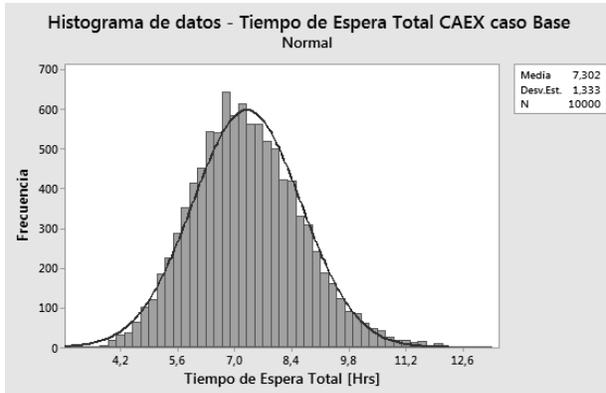


Ilustración 74: Espera total en Chancado - Caso 7 CAEX

Caso 8 CAEX

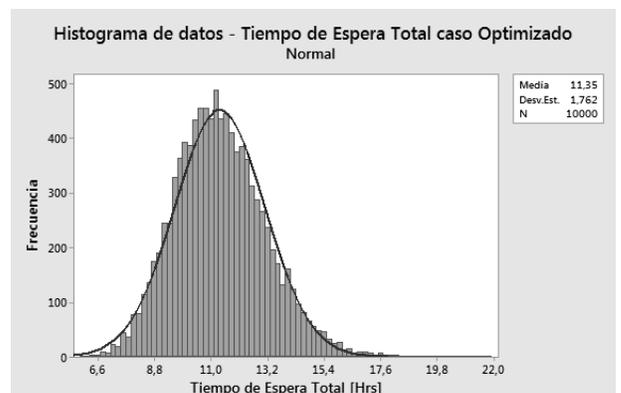
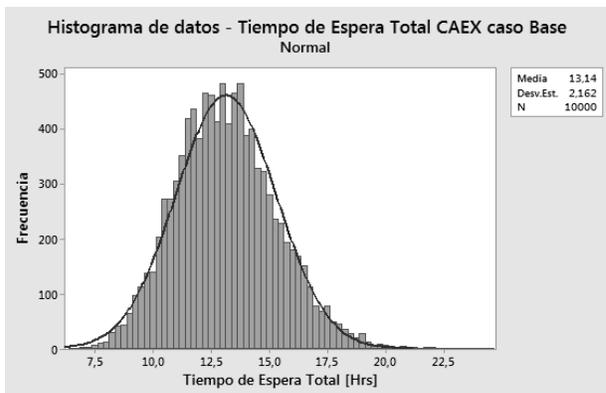


Ilustración 75: Espera total en Chancado - Caso 8 CAEX

Caso 9 CAEX

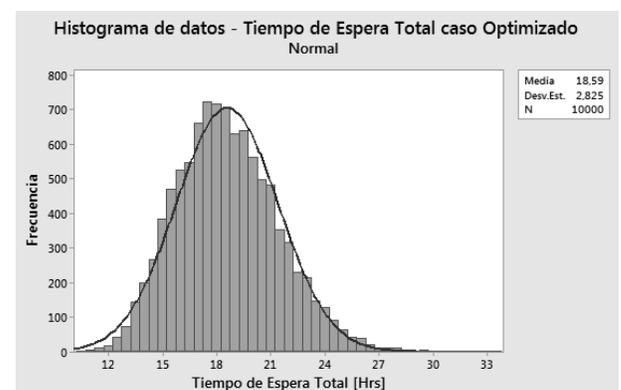
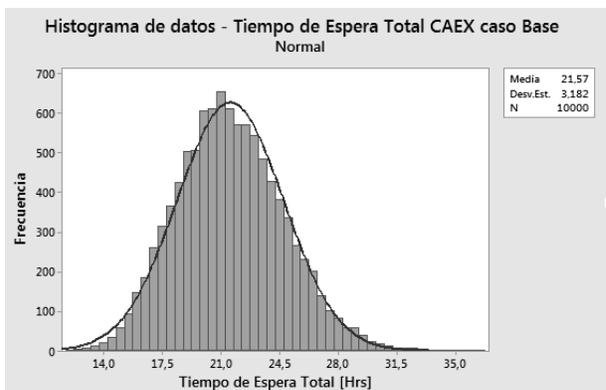


Ilustración 76: Espera total en Chancado - Caso 9 CAEX

Caso 10 CAEX

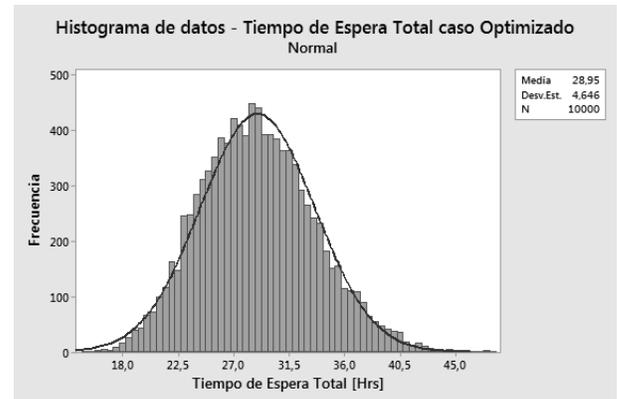
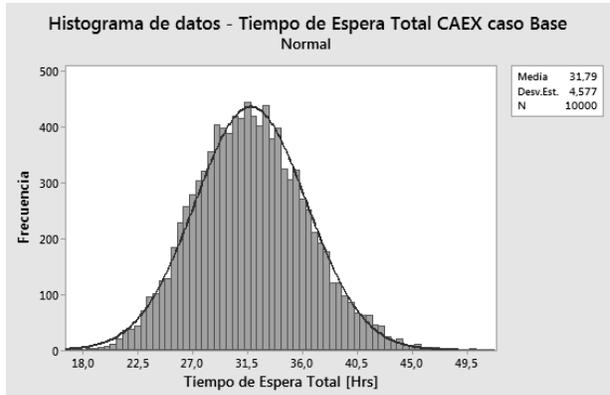


Ilustración 77: Espera total en Chancado - Caso 10 CAEX

Caso 11 CAEX

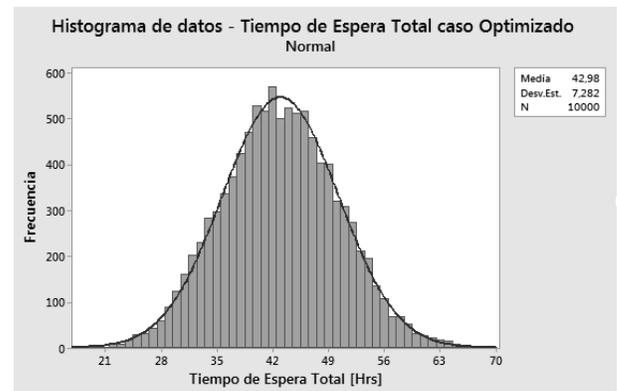
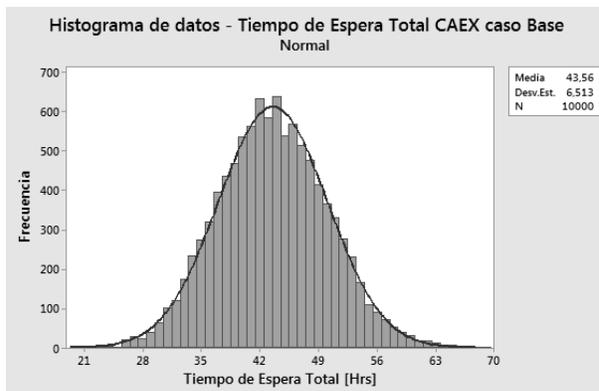


Ilustración 78: Espera total en Chancado - Caso 11 CAEX

Caso 12 CAEX

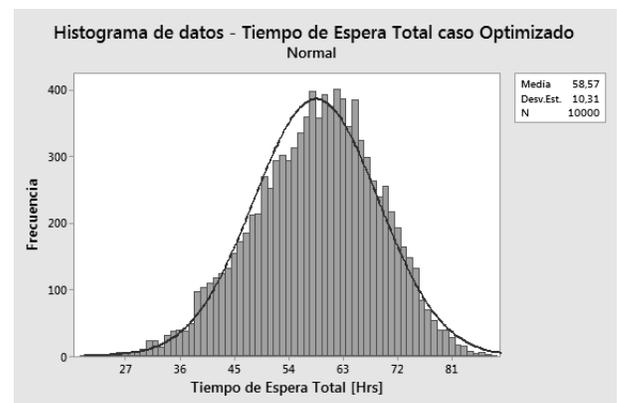
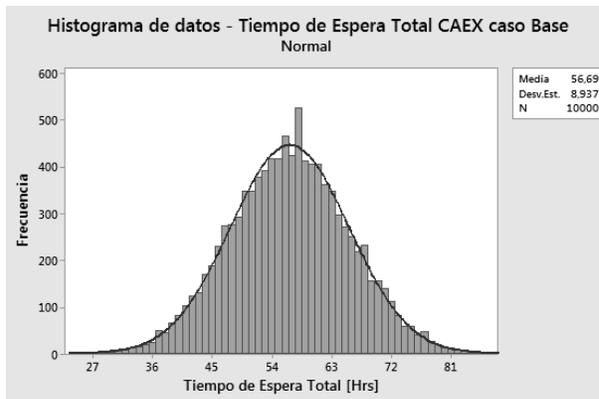


Ilustración 79: Espera total en Chancado - Caso 12 CAEX

Caso 13 CAEX

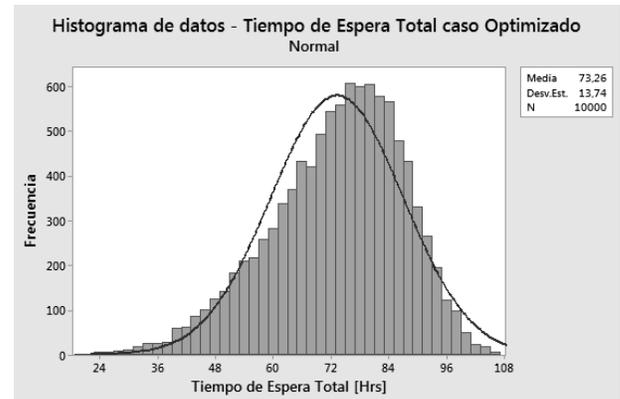
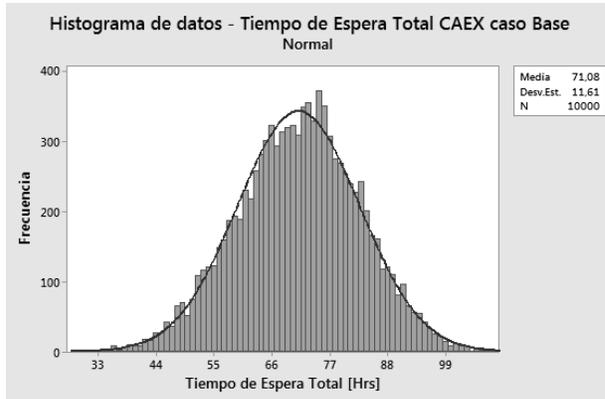


Ilustración 80: Espera total en Chancado - Caso 13 CAEX

Caso 14 CAEX

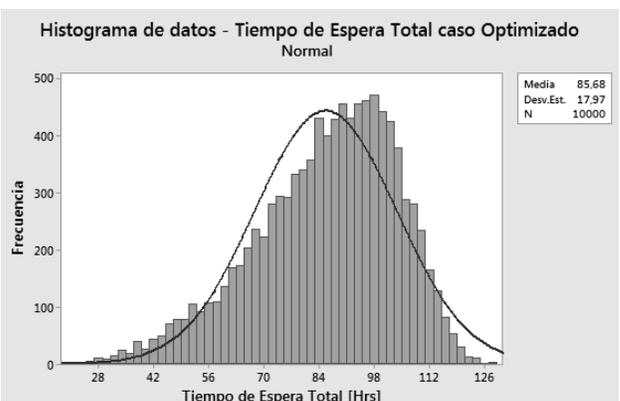
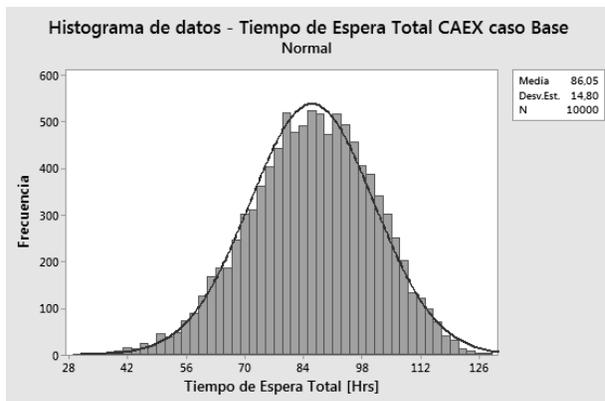


Ilustración 81: Espera total en Chancado - Caso 14 CAEX

8.3.1.2 Utilización de los CAEX

Caso 5 CAEX

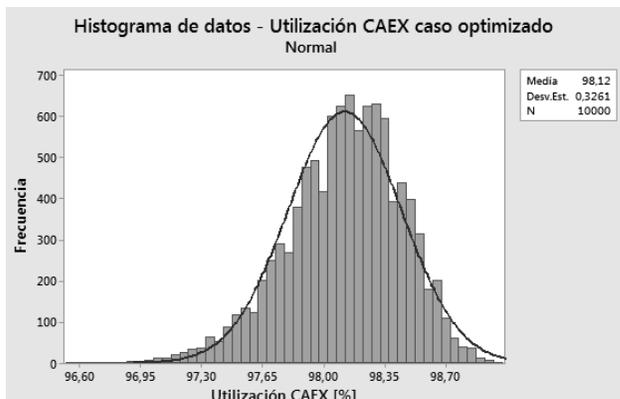
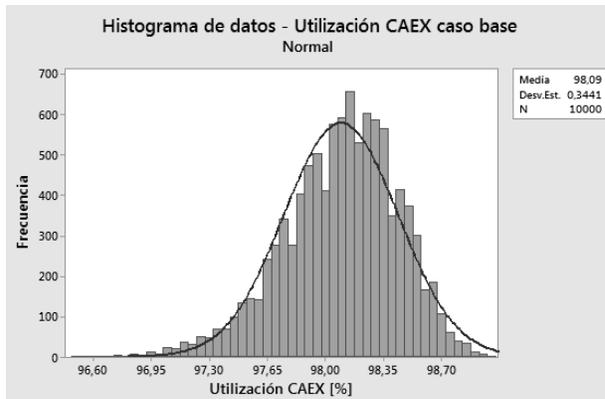


Ilustración 82: Utilización de los CAEX - Caso 5 CAEX

Caso 6 CAEX

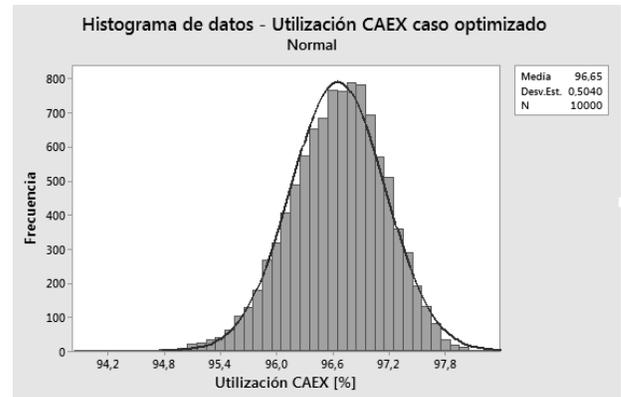
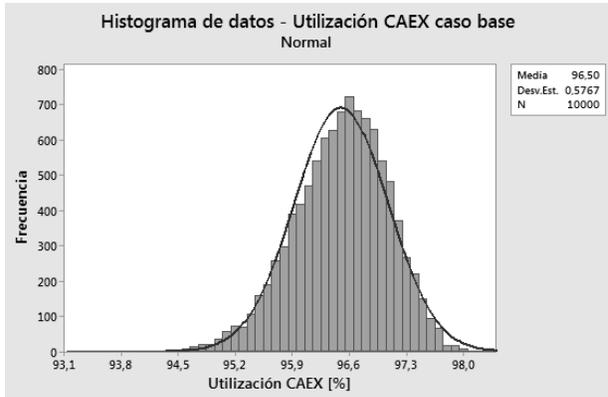


Ilustración 83: Utilización de los CAEX - Caso 6 CAEX

Caso 7 CAEX

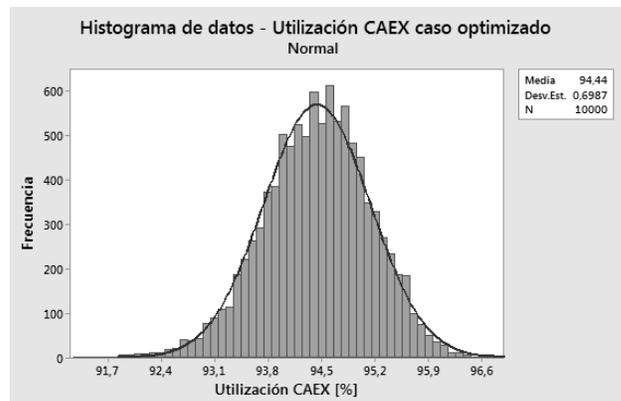
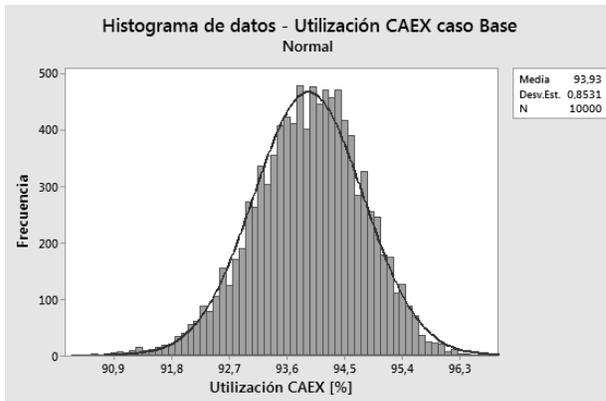


Ilustración 84: Utilización de los CAEX - Caso 7 CAEX

Caso 8 CAEX

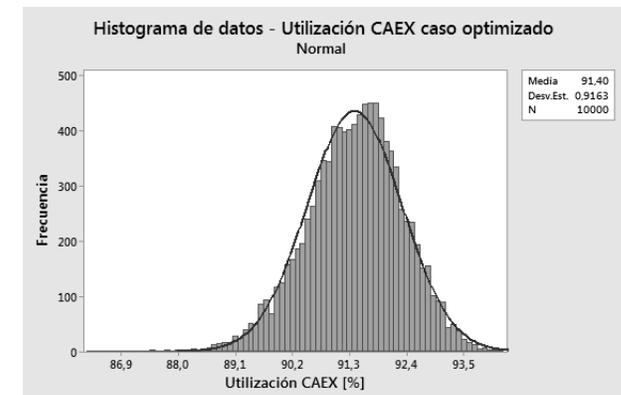
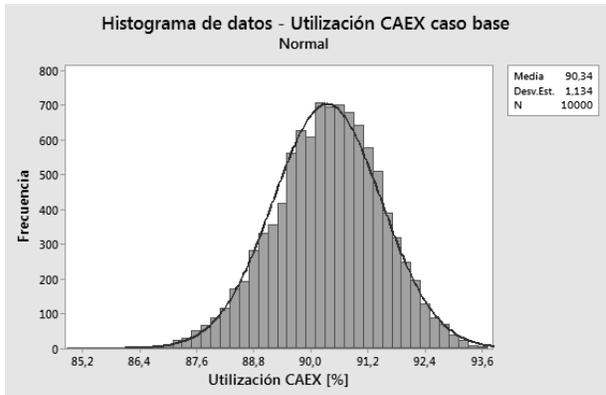


Ilustración 85: Utilización de los CAEX - Caso 8 CAEX

Caso 9 CAEX

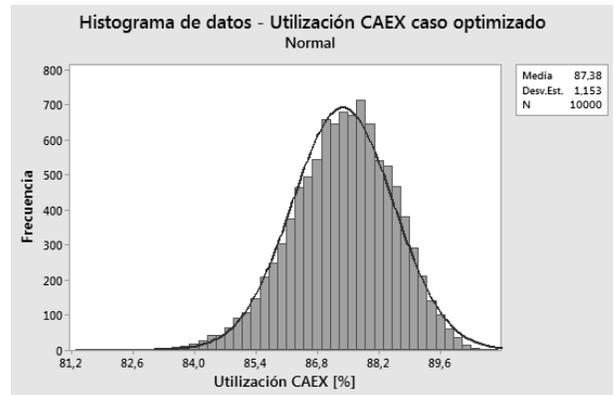
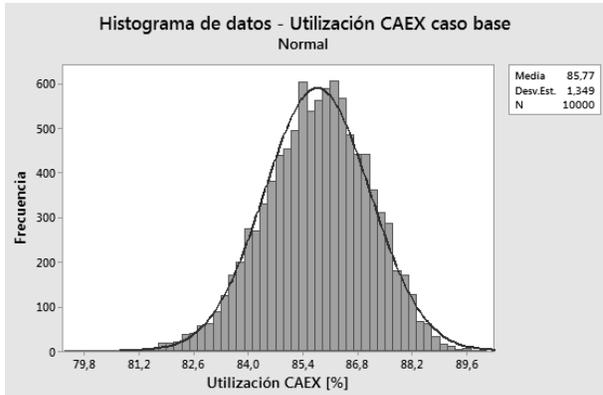


Ilustración 86: Utilización de los CAEX - Caso 9 CAEX

Caso 10 CAEX

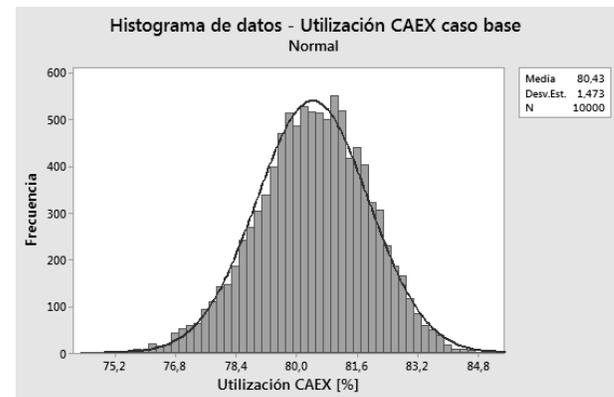
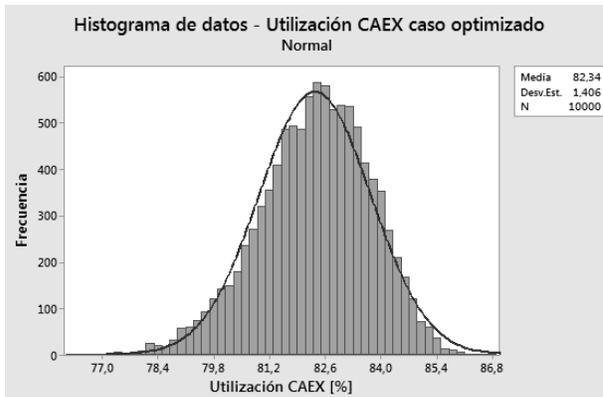


Ilustración 87: Utilización de los CAEX - Caso 10 CAEX

Caso 11 CAEX

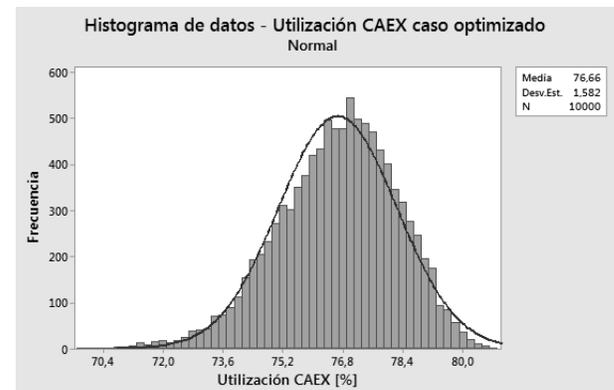
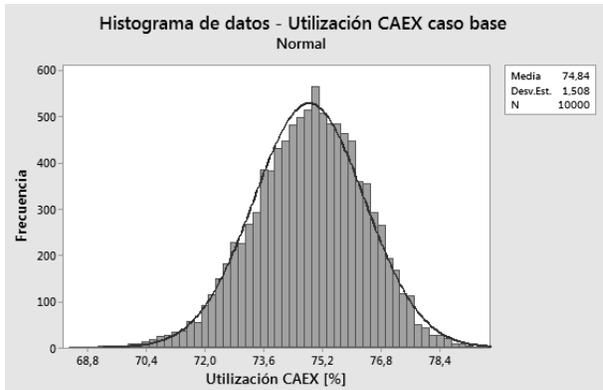


Ilustración 88: Utilización de los CAEX - Caso 11 CAEX

Caso 12 CAEX

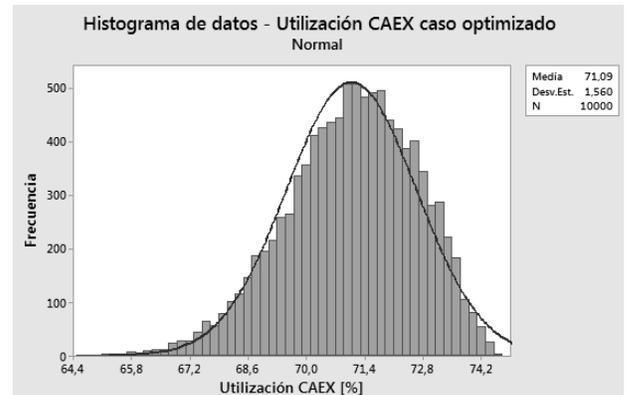
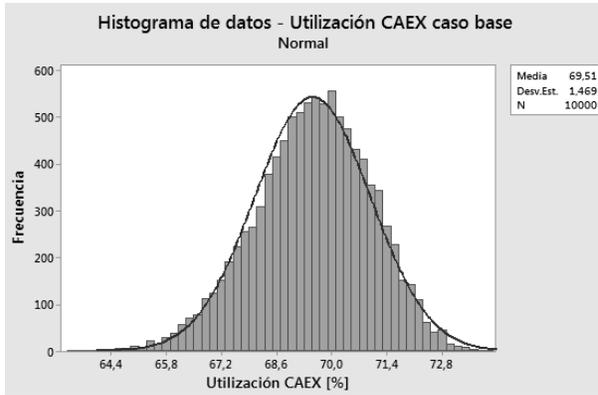


Ilustración 89: Utilización de los CAEX - Caso 12 CAEX

Caso 13 CAEX

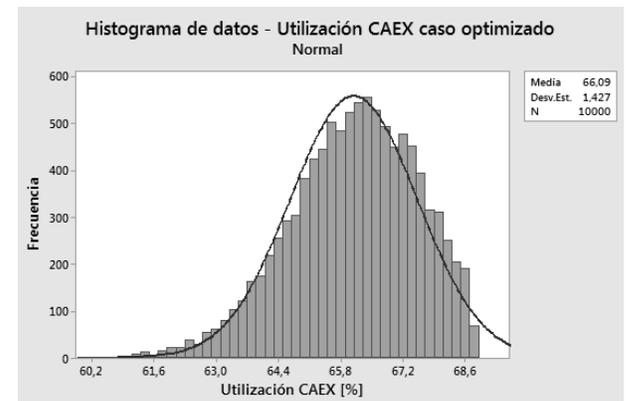
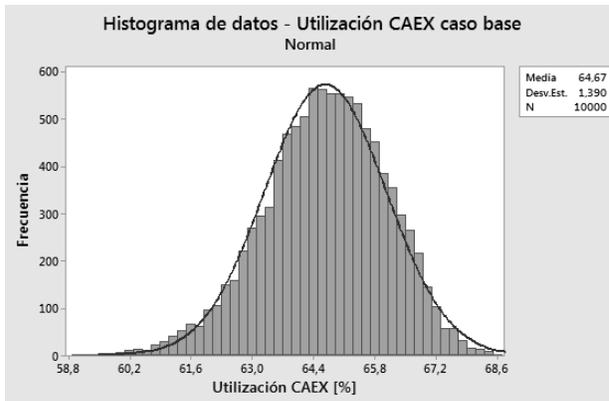


Ilustración 90: Utilización de los CAEX - Caso 13 CAEX

Caso 14 CAEX

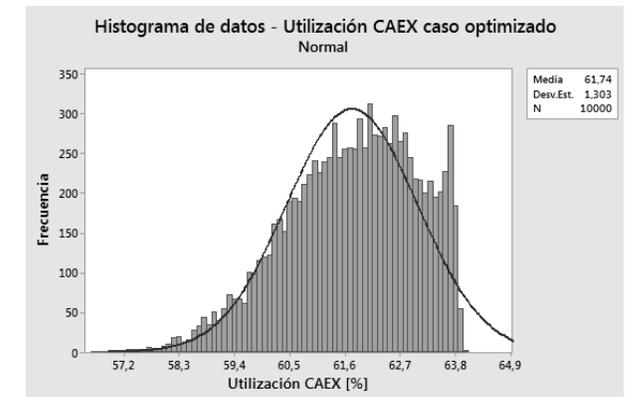
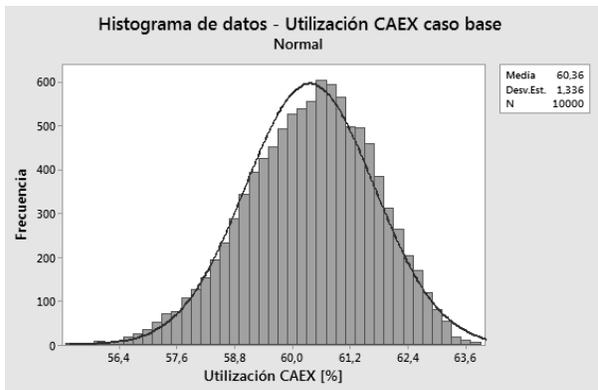


Ilustración 91: Utilización de los CAEX - Caso 14 CAEX

8.3.1.3 Tonelaje Procesado

Caso 5 CAEX

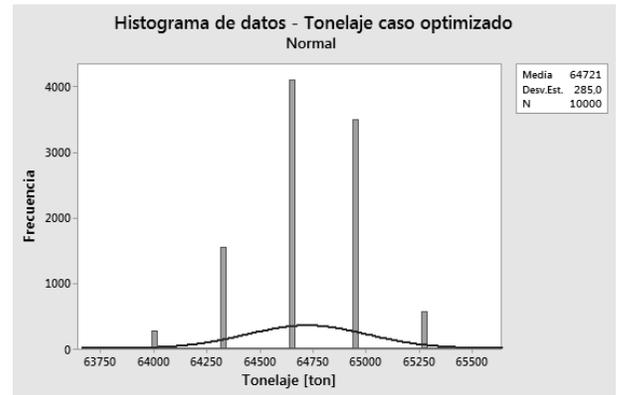
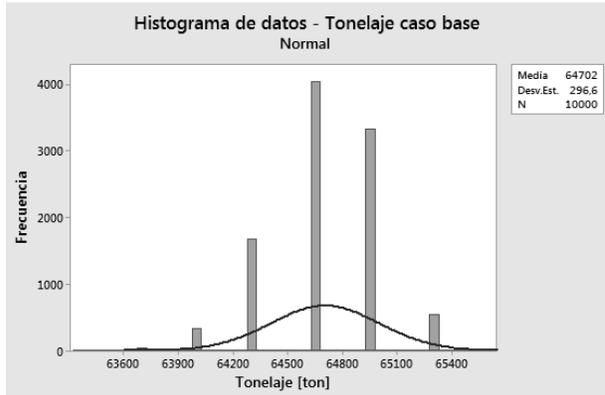


Ilustración 92: Tonelaje Procesado - Caso 5 CAEX

Caso 6 CAEX

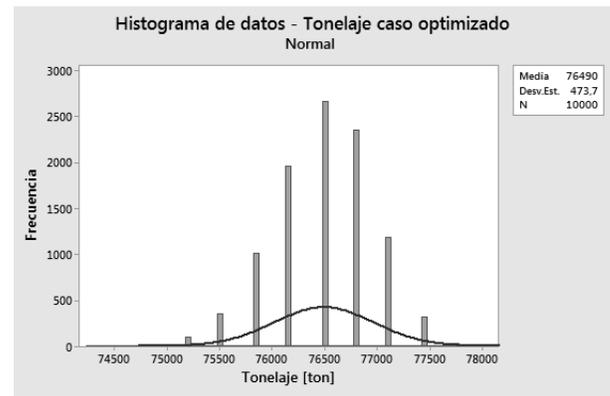
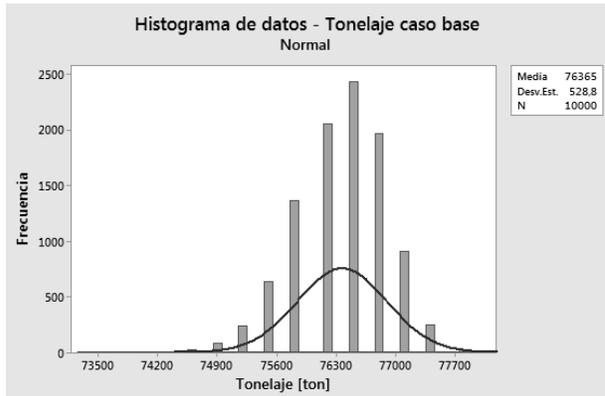


Ilustración 93: Tonelaje Procesado - Caso 6 CAEX

Caso 7 CAEX

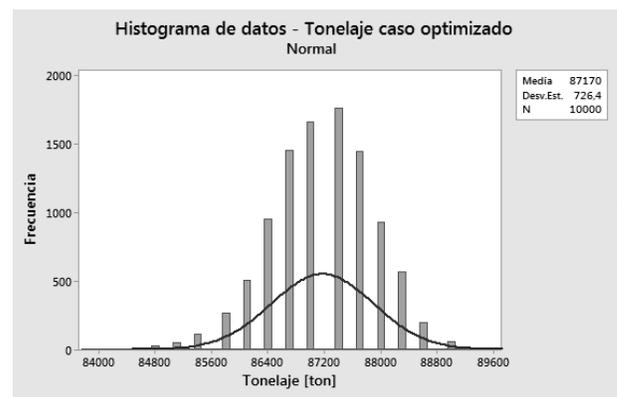
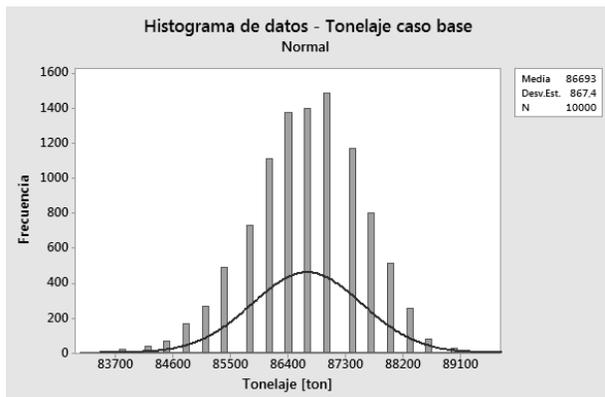


Ilustración 94: Tonelaje Procesado - Caso 7 CAEX

Caso 8 CAEX

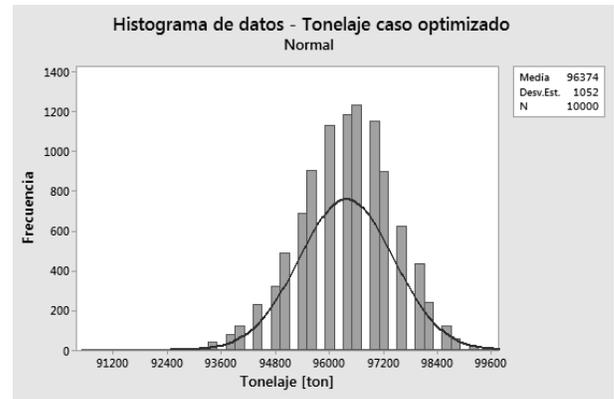
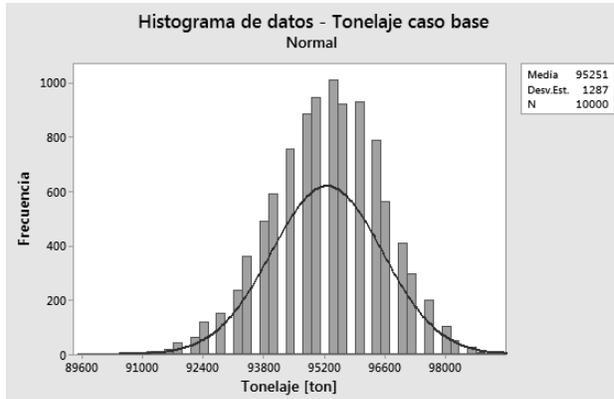


Ilustración 95: Tonelaje Procesado - Caso 8 CAEX

Caso 9 CAEX

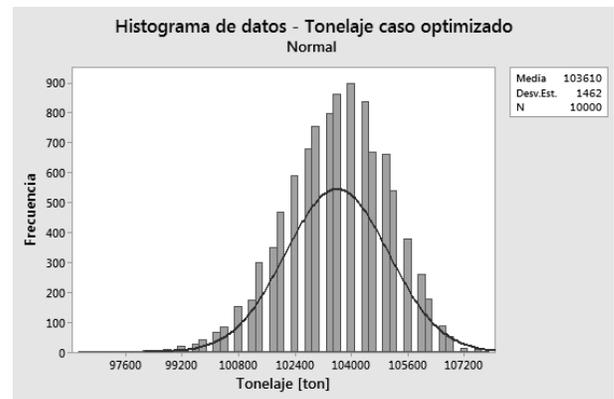
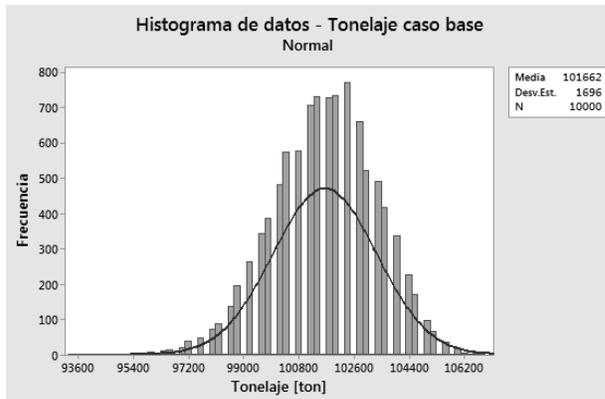


Ilustración 96: Tonelaje Procesado - Caso 9 CAEX

Caso 10 CAEX

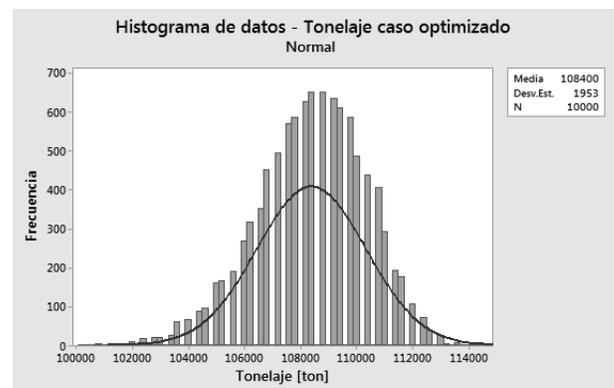
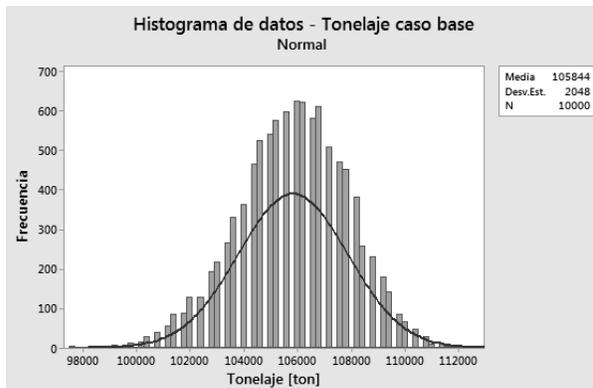


Ilustración 97: Tonelaje Procesado - Caso 10 CAEX

Caso 11 CAEX

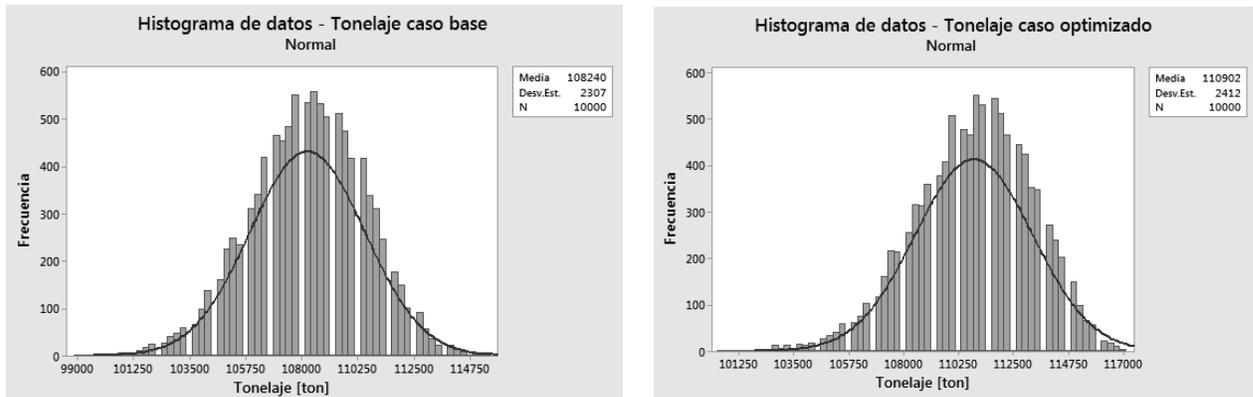


Ilustración 98: Tonelaje Procesado - Caso 11 CAEX

Caso 12 CAEX

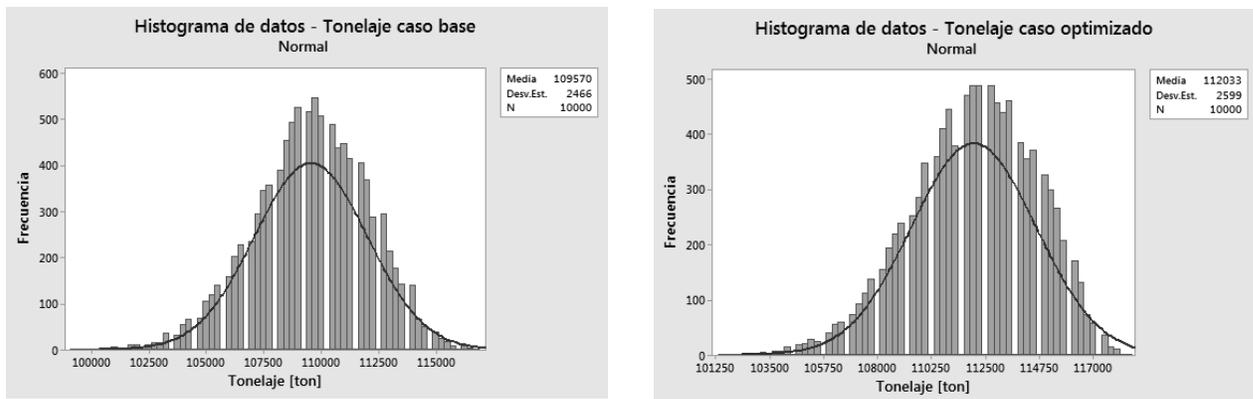


Ilustración 99: Tonelaje Procesado - Caso 12 CAEX

Caso 13 CAEX

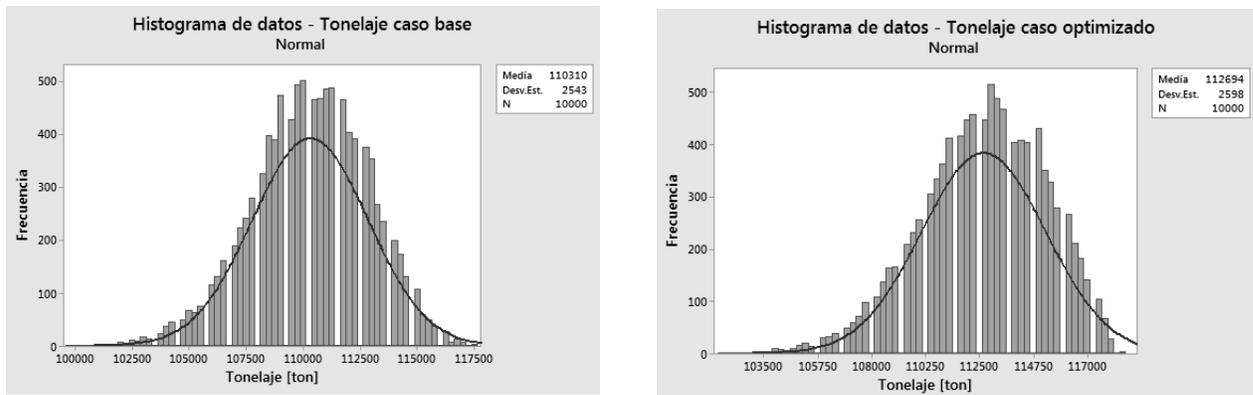


Ilustración 100: Tonelaje Procesado - Caso 13 CAEX

Caso 14 CAEX

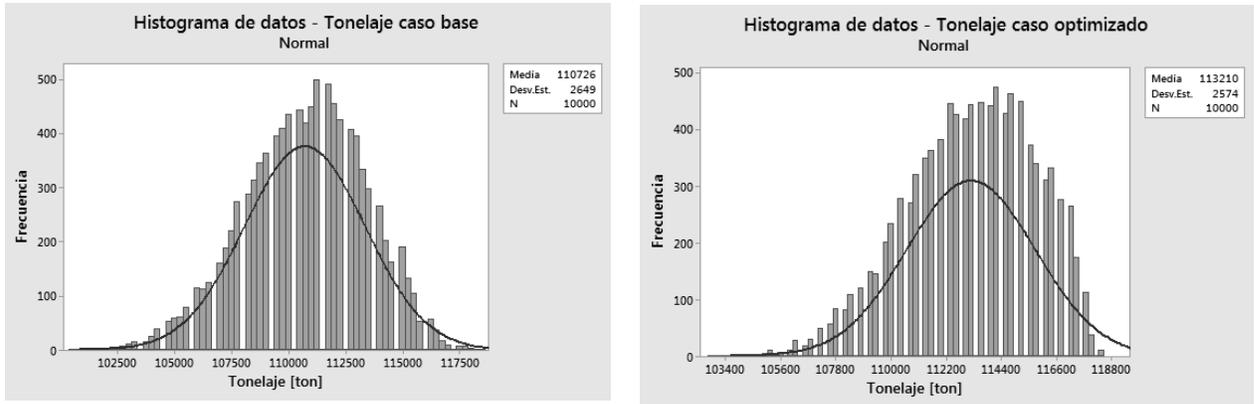


Ilustración 101: Tonelaje Procesado - Caso 14 CAEX

8.3.2 Optimización del Proceso de Abastecimiento de Combustible

Los resultados analizados en esta etapa corresponden al tiempo de espera promedio en petrolera y los litros promedio por carga, para el caso optimizado.

8.3.2.1 Espera promedio en Petrolera

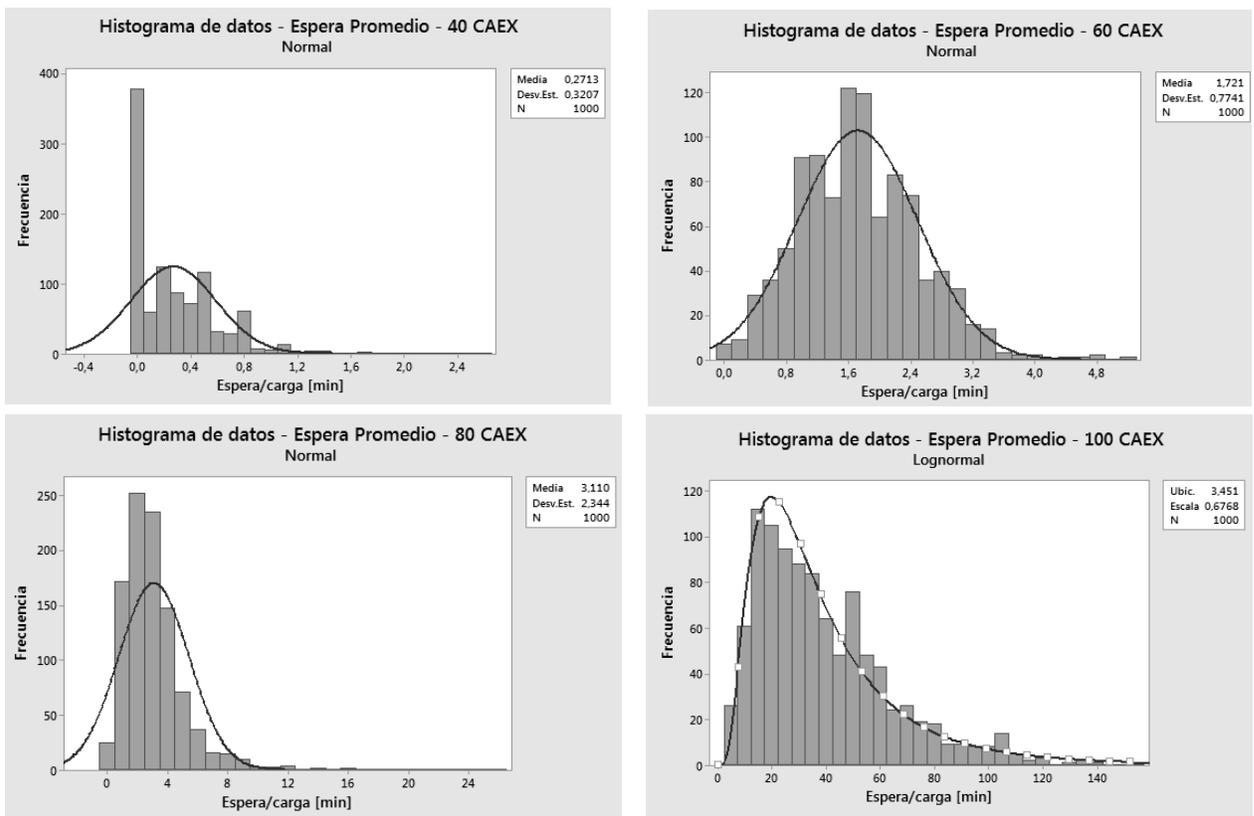


Ilustración 102: Espera Promedio en Petrolera

8.3.2.2 Litros promedio por Carga

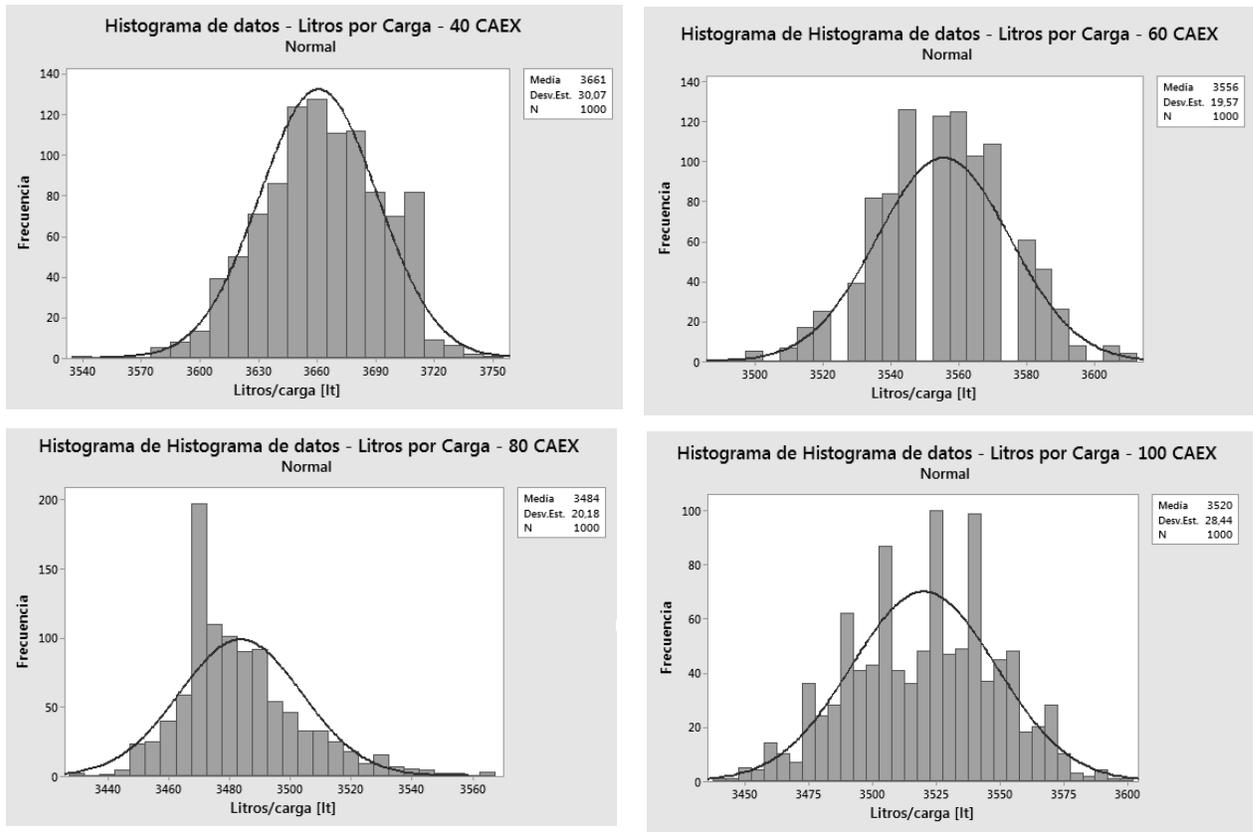


Ilustración 103: Litros promedio por carga en petrolera

8.4 Anexo D: Resultados de simulaciones de chancado

En esta sección, se presentan las tablas resúmenes de las simulaciones y con que se construyeron los gráficos del capítulo 5.1

Tabla XXI: Resumen Resultados Simulaciones Proceso de Chancado

Número de Camiones	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Utilización Caso Base [%]	98,1	96,5	93,9	90,3	85,8	80,4	74,8	69,5	64,7	60,4
Utilización Caso Opt. [%]	98,1	96,7	94,4	91,4	87,4	82,3	76,7	71,1	66,1	61,7
Espera Total en Ch. Caso Base [Hrs]	1,5	3,6	7,3	13,1	21,6	31,8	43,6	56,7	71,1	86,1
Espera Total en Ch. Caso Opt. [Hrs]	1,5	3,3	6,5	11,3	18,6	28,9	43,0	58,6	73,3	85,7
Tonelaje Procesado Caso Base [KTon]	64,7	76,3	86,7	95,3	101,7	105,8	108,2	109,6	110,3	110,7
Tonelaje Procesado Caso Opt. [KTon]	64,7	76,5	87,2	96,4	103,6	108,4	110,9	112,0	112,7	113,2

Tabla XXII: Datos para construcción de Gráfico Tonelaje e Ingreso por Mes.

Número de Camiones	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
[KTon/mes]	0,5	3,7	14,3	33,7	58,44	76,7	79,9	73,9	71,5	74,5
Ingreso Mes [MUS\$]	0,0	0,1	0,2	0,6	1,0	1,3	1,4	1,4	1,2	1,3

8.5 Anexo E: Resultados de simulaciones de abastecimiento de combustible

En esta sección, se presentan las tablas resúmenes con los cuales se construyeron los gráficos del capítulo 5.2

Tabla XXIII: Resultados abastecimiento de combustible - 40 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	0,3	3.661
Máx.	2,6	3.753
Min.	0,0	3.544
Desviación Estándar	0,3	30

Tabla XXIV: Resultados abastecimiento de combustible - 60 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	1,7	3.556
Máx.	5,3	3.610
Min.	0,0	3.490
Desviación Estándar	0,8	19

Tabla XXV: Resultados abastecimiento de combustible - 80 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	3,1	3.484
Máx.	25,5	3.567
Min.	0,1	3.430
Desviación Estándar	2,3	20

Tabla XXVI: Resultados abastecimiento de combustible - 100 CAEX

	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]
Promedio	38,8	3.520
Máx.	153,2	3.600
Min.	2,9	3.439
Desviación Estándar	24,8	28

Tabla XXVII: Datos para construcción de gráfica de resumen de resultados

Número de Camiones	Espera/Camión [min]	Litros/Carga [lt]	Porcentaje Cargado [%]
40	0,3	3.661	81,4
60	1,7	3.556	79,0
80	3,1	3.484	77,4
100	38,8	3,520	78,2

8.6 Anexo F: Test de confiabilidad estadística

8.6.1 Chancado

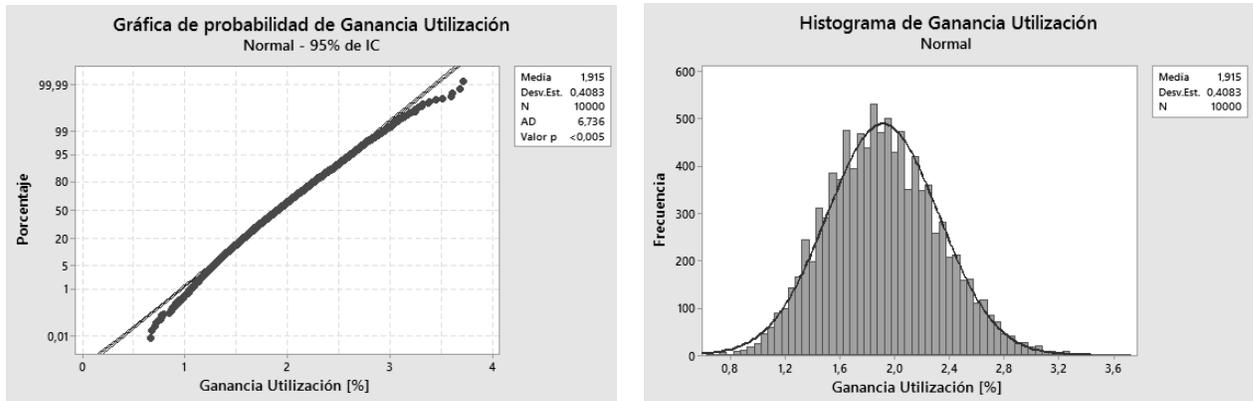


Ilustración 104: Confiabilidad de Datos Chancado

8.6.2 Abastecimiento de Combustible

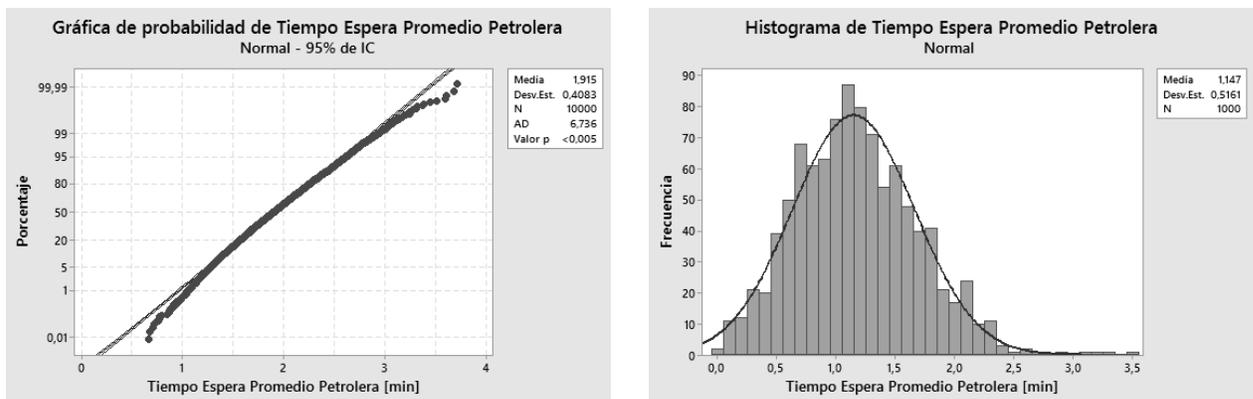


Ilustración 105: Confiabilidad de Datos Abastecimiento de Cobustible