UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2016

OPTIMIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL SUMINISTRO DE MINERAL HACIA LAS PLANTAS CONCENTRADORAS EN GRAN EMPRESA MINERA

STURZE ALARCÓN, IAN

http://hdl.handle.net/11673/23384

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE

"OPTIMIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL SUMINISTRO DE MINERAL HACIA LAS PLANTAS CONCENTRADORAS EN GRAN EMPRESA MINERA"

IAN STURZE ALARCÓN

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCION ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. PEDRO SARIEGO PASTÉN

PROFESOR CORREFERENTE: MG. ING. LUIS GUZMÁN BONET

ABRIL, 2016

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución

A mi hermana

Agradecimientos

Junto con este trabajo en el que demuestro las habilidades y capacidades que he desarrollado, quiero agradecer a todos aquellos que han sido parte de mi formación como persona y como profesional, puesto que considero tienen gran mérito del desarrollo de esta memoria.

A mis padres, que me brindaron todo su apoyo y amor para llegar hasta donde estoy y seguir aún más lejos; que sin su elogiable esfuerzo no hubiese podido acceder a este camino, y que sin sus valores y enseñanzas no hubiese podido mantenerme en él.

A mi familia que me brindo todo su cariño para que pueda dar lo mejor de mí, siempre demostrándome su preocupación por mi salud y bienestar.

A mis amigos, que me acompañaron con alegrías aún en los momentos más adversos y que me ayudaron a levantarme cuando las situaciones parecían sobrepasarnos, encontrando juntos la forma de seguir adelante.

A mis profesores, que me compartieron sus conocimientos y experiencias, no solo de ciencia y tecnología, sino además de ética y profesionalismo; y por sobretodo transmitirme el legado de nuestra universidad de nunca dejar la búsqueda del conocimiento.

A mi casa de estudios por brindarme un ambiente que fue tanto acogedor como exigente, ayudándome a conocerme mejor para decidir mis metas y que rumbos seguiré de ahora en adelante.

Finalmente, un especial agradecimiento a BHP Billiton, Minera Escondida y a su Superintendencia de Ingeniería Mina, quienes me permitieron la gran oportunidad de realizar este trabajo. Al Superintendente Manuel Paz R. por recibirme y apoyar mi trabajo, y a todo el equipo de la superintendencia por su disposición a ayudarme, enseñarme y guiarme hasta lograr lo mejor; especialmente agradezco a Oscar Leiva S. y a Cristian Carvajal quienes sin su apoyo y respaldo, este trabajo no habría sido posible.

De corazón gracias.

Resumen ejecutivo

Las correas transportadoras que envían material a las concentradoras son alimentadas por una configuración de cuatro fuentes distintas y separadas por grandes distancias, esto se traduce que ante un imprevisto en cualquiera de las fuentes de mineral impacta sobre la carga de la correa, pero no necesariamente de forma inmediata por lo que hay un desfase dependiendo en donde se produce la falla. Esto genera una alta variabilidad en la carga transportada.

Para entender la situación y la raíz de los problemas, se comienza por entender la configuración del sistema de chancado y correas, y se visita de forma habitual a distintos operadores de chancado para conocer los problemas regulares a los que se enfrentan, como se resuelven, cuanto tardan en resolverse y cómo impactan al sistema.

Se consiguen los registros del pesómetro de la correa overland minuto a minuto de todo el mes de Junio, esta data incluye información de mantenciones, ensayos, quiebres operacionales y fallas. Ante la gran cantidad de variables se decide evaluar la situación de mayor interés, "el desempeño durante la operación normal". Para esto se proponen varios tipos de muestreo y finalmente se opta por escoger un horario pertinente para el turno día y para el turno noche. De esta forma se grafica la media y mediana de la carga de cada día durante sus 24 horas, con esto se visualiza que los horarios de 16:30 a 19:30 durante el día, y de 22:00 a 01:00 durante la noche son menos susceptibles a los quiebres operacionales como colaciones o cambios de turno. Antes de continuar con el desarrollo se debe filtrar la información obtenida correspondientes a mantenciones y fallas aguas abajo de la correa overland.

Se busca la distribución más adecuada, al no ajustarse correctamente a ninguna, se proponen dos análisis en paralelo, uno específico en el cual se busca segregar la información según criterios relevantes para poder facilitar el estudio, y un análisis general en el cual se pueda interpretar el desempeño general percibido por la empresa.

En el análisis específico, se propone segregar la data en base a los turnos de operadores, jornada día o noche y horario administrativo, ya que un ANOVA demostró que estos factores son relevantes se procede a separar la data, y debido a unos casos de multimodalidad se consiguen 23 subconjuntos, los cuales son transformados según cada caso para normalizar y estandarizar. Posteriormente, se realizan análisis de capacidad para evaluar desempeños, para esto fue necesario definir un desviación estándar objetivo.

Con esto se consigue identificar que operadores trabajan mejor o peor en que instancias y en qué medida, logrando así conocer cuando se requiere poner mayor atención a la labor de los operadores, coordinación con despacho, etc.

Para el análisis general se busca aquella distribución que tenga el menor índice de Anderson-Darling y el mayor coeficiente de correlación, consiguiéndose así una curva a la cual asociar el análisis de capacidad.

Para la estimación del beneficio se propone un caso ideal en el cual se corrigen las fallas alcanzando un aumento de mineral enviado de un 11,58%, este factor deberá ser castigado de forma que se adecue al impacto de cada alternativa propuesta.

Abstract

The belt conveyors that deliver the crushed ore to the concentration plants, are fed by an arrangement of four different sources, and separated by long distances, this means that if a failure occurs at any of the sources, it will affect the load in the belt conveyors, but not necessarily it means an immediate effect so there is a gap depending where the incident occurred, these produces a high variability in the delivered load.

For a better understanding of the situation and the troubles the comprehension of the arrangement of crushers and belt conveyors is needed, also the crusher´s operators are visited on a weekly basis for a grasp of their most common operational troubles, how they deal with them and how it affects the production.

The record of the belt conveyor´s weightometer are obtained, this information covers minute by minute the whole month of June, which includes the influence of maintenance, tests, operational breakdowns and failures. Given the large number of variables, it´s decided to evaluate most relevant situation, "the performance during normal operation". For this, several sampling methods are proposed and ultimately a sampling is chosen in which a suitable lapse is selected for the day shift and another for the night shift. Thereby, the median and the average of the load of each day are plotted for the 24 hours, this way it´s shown that during 16:30 to 19:30 for the day shift and from 22:00 to 01:00 for the night shift, there is the lesser chance of occurrence for the operational breakdowns as shift change or collation. Before continuing with further analysis, the information obtained must be filtered from the influence of maintenance and failures downhill from the belt conveyor.

The most adequate distribution is looked for the database obtained, but no good fit is achieved, therefor two parallel analyses are proposed, a specific one in which information will be segregated by relevant criteria in order to grasp a better understanding inside the data; and a general one in which performance can be read into as perceived by company.

In the specific analysis, the data is segregated by operator´s groups, day and night shifts and administrative schedule, since an ANOVA proved that those were relevant factors, and due to some cases of multimodality 23 subsets are obtained, which were respectively transformed to normalize and standardize. Later on, a capability analysis is made for each one to evaluate the performance, for this a goal had to be set for the standard deviation.

With this, is achieved an identification of which operator works best or worse in which instances and in which measure, knowing when attention is needed for the operators, coordination with dispatch, etc.

For the general analysis it´s looked for the distribution with the lower Anderson-Darling index and the highest correlation coefficient, thereby attaining a distribution to associate the capability analysis.

For the estimation of the benefit, an ideal case is proposed in which all failures are corrected achieving an increase in the ore delivery of 11.58%, this factor must be lowered so that it suits the impact of each alternative proposal.

Glosario

A-D: Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

ANOVA: Análisis de varianza (Analysis Of Variance)

DMAIC: Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar (Define, Measure, Analyze, Improve, Control)

DPMO: Defectos por millón de oportunidades

Feeder: Alimentador de descarga que alimenta a las correas transportadoras tras un chancador, silo o stockpile en el proceso.

Forecast: Proyección de producción y consumos, sujeta a correcciones a medida que se progresa en el tiempo.

HMI: Interfaz humano-maquina (Human – Machine Interface)

LEI: Límite inferior estadístico

LES: Límite superior estadístico

LSL: Ver "LEI" (Lower Statistic Limit)

MEL: Minera Escondida Limitada

NPI: Área a cargo de la infraestructura no relacionada al proceso productivo (Non-Process Infrastructure)

OEE: Eficiencia global de los equipos (Overall Equipment Efficiency)

OGP1: Proyecto de crecimiento orgánico 1 (Organic Growth Project 1)

PERT CPM: Técnica de revisión y evaluación de proyectos (Project Evaluation and Review Technic) y método de la ruta crítica (Critic Path Method)

PC: Planta concentradora

PHVA: Planificar, Hacer, Verificar, Actuar

PLC: Programador lógico programable (Programmable Logic Controller)

Pullcord: Sistema de alarma basado en un cable o cordón, el cual si es tensado activa la alerta y detiene el equipo. Utilizado principalmente en correas transportadoras.

Ramp up: Hace referencia al periodo entre el comienzo del funcionamiento de un proceso con un firme incremento en la producción, hasta alcanzar la máxima capacidad de utilización; caracterizado por la experimentación en el proceso y mejoras implementadas.

ROM: Mineral en bruto sacado de la mina (Run Of Mine)

SAG: Molienda semiautógena (Semi-Autogenous Grinding)

SEV: Distribución Valor extremo mínimo (Smallest Extreme Value)

SI: Superintendencia

Stockpile: Pila de acopio, en este caso, de mineral extraído de la mina y que ha pasado por al menos un proceso de conminución.

Target: Valor objetivo

Tph: toneladas por hora

TUM: Modelo de utilización de tiempo de BHP Billiton (Time Usage Model)

USL: Ver "LES" (Upper Statistic Limit)

α: Nivel de significación

β: Parámetro de forma de distribución Weibull

η: Parámetro de escala de distribución Weibull

λ: Parámetro de transformación de Box-Cox

μ: Media aritmética

σ: Desviación estándar

φ: Parámetro de escala de distribución Valor extremo mínimo

ω: Parámetro de localización de distribución Valor extremo mínimo

Contenido

Agradecimientos ii
Resumen ejecutivo iii
Abstract iv
Glosario v
Contenido vii
Índice de tablas ix
Índice de Ilustraciones x
Capítulo I: Introducción 1
1.1. Problema 1
1.2. Antecedentes 1
1.2.1. Antecedentes de la Faena 1
1.2.2. Proceso productivo 4
1.2.2.1. Extracción del mineral 4
1.2.2.2. Chancado del mineral y transporte 4
1.2.2.3. Proceso de lixiviación de óxidos 5
1.2.2.4. Proceso de biolixiviación de sulfuros de baja ley 6
1.2.2.5. Proceso de plantas concentradoras 7
1.2.2.6. Proceso Planta Coloso 8
1.2.3. Antecedentes Superintendencia Ingeniería Mina 9
1.2.4. Antecedentes bibliográficos 9
1.2.4.1. Six Sigma 9
1.2.4.2. Ajuste de distribución 10
1.2.4.3. Bondad de ajuste: Prueba de Anderson-Darling y Valor p 10
1.2.4.4. Distribución Weibull y Valor extremo mínimo 11
1.2.4.5. Preparación de la data para modelamiento 11
1.2.4.6. Análisis de capacidad 13
1.2.4.7. El principio de Pareto, la regla de 80/20 14
1.2.4.8. Análisis de varianza (ANOVA) 14
1.2.4.9. Simulación de Monte Carlo 15
1.2.4.10. Clasificación de estimaciones económicas 15
1.2.4.11. Modelo de Utilización de Tiempo y Eficiencia global de los equipos 16
1.2.5. Antecedentes del proyecto 18
1.3. Objetivos 19

1.4. Alcance 19
Capítulo II: Identificación de la situación 20
2.1. Sistema de correas trasportadoras 20
2.2. Situación del operador de sala de control de chancado 22
2.3. Fallas comunes del proceso 23
2.4. Justificación 24
2.5. Registros de carga 25
Capítulo III: Propuestas de mejora 27
3.1. Reentrenamiento operadores de sala de control de chancado 27
3.2. Implementación sistema experto 27
3.3. Protocolo Transversal 29
Capítulo IV: Análisis estadístico 29
4.1. Muestreo 29
4.2. Meta objetivo 32
4.2.1. Primera etapa 32
4.2.2. Segunda etapa 33
4.3. Análisis y manejo de la data 34
4.3.1. Identificación de distribución 34
4.3.1.1. Aplicación de ajustes/correcciones 35
4.3.1.2. Conclusión de tendencias y no normalidad 39
4.3.2. Análisis específico 40
4.3.2.1. ANOVA 40
4.3.2.2. Eliminación de “ruido” en el muestreo 41
4.3.2.2.1. Separación por turnos 41
4.3.2.2.2. Separación por jornada día/noche 43
4.3.2.2.3. Separación por operación en horario administrativo 44
4.3.2.2.4. Separación por turnos, jornada y horario administrativo 45
4.3.3. Análisis general 49
4.3.3.1. Determinación de distribución representativa 49
4.3.3.2. Identificación de fallas 51
4.3.3.3. Simulación 52
4.3.3.4. Análisis de sensibilidad 54
4.3.3.5. Estimación de costo y beneficio 55

Capítulo V: Conclusión 56
5.1. Resultados 56
5.2. Recomendaciones 57
5.3. Opinión 58
Bibliografía y referencias 59
Anexos 60
A. Gráficos e histogramas complementarios 61
A-1. Registro mensual de tonelaje en correa overland CV-102 61
A-2. Resumen de los registros correspondientes al año fiscal y al mes de Junio 62
A-3. Comportamiento de la carga en un día regular. Tendencia de Media y Mediana de los días de Junio 63
A-4. Resumen gráfico de la simulación de distribución SEV objetivo 64
A-5. Diagramas complementarios de Jack-Knife 65
A-6. Análisis de capacidad obtenidos para cada intervalo del análisis especifico 66
B. Ecuaciones y tabulaciones 78
B-1. Definición de prueba Anderson-Darling 78
B-2. Función de distribución acumulativa para Valor extremo mínimo y función inversa 78
B-3. Desglose de impactos por iniciativa y por caso para cada tipo de falla 79
C. Información Software Minitab 80

Índice de tablas

Tabla 1: Definiciones índices de capacidad 14
Tabla 2: Matriz de clasificación de estimaciones por clase (AACE international) 16
Tabla 3: Consumo planta concentradora en función del nivel de stockpile 24
Tabla 4: Resultados del análisis por subconjunto 39
Tabla 5: Resultado ANOVA 41
Tabla 6: Resultados de análisis tras separación por turnos, jornada y horario administrativo 46
Tabla 7: Parámetros obtenidos para: turno 3, noche, horario no administrativo 47
Tabla 9: Comparación ajuste de distribuciones 49

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Ubicación de Minera Escondida. 1
Ilustración 2: Ventas de cobre correspondientes al 2014 3
Ilustración 3: Ubicación geográfica de chancadores de sulfuros . 5
Ilustración 4: Diagrama del proceso productivo de concentrado de cobre 8
Ilustración 5: Esquema de definición tiempos según modelo de BHP Billiton 16
Ilustración 6: Diagrama de arreglo de correas. 20
Ilustración 7: Funcionamiento de un chute pantalón 21
Ilustración 8: Pareto de las fallas más influyentes. 23
Ilustración 9: Registro de últimos seis meses en proceso productivo de PC Laguna Seca 24
Ilustración 10: Función de distribución acumulativa para nivel de stockpile 25
Ilustración 11: Concentración de los datos por día 26
Ilustración 12: Diagrama de sistema de control avanzado 27
Ilustración 13: Diagrama del sistema de control actual en chancadores y correas 28
Ilustración 14: Tendencia de Media y Mediana de todos los días de Junio 30
Ilustración 15: Gráfico resumen del muestreo obtenido 31
Ilustración 16: Análisis de capacidad preliminar del intervalo seleccionado 32
Ilustración 17: Análisis de capacidad preliminar para futura referencia 33
Ilustración 18: Bondades de ajuste de las distribuciones más cercanas 34
Ilustración 19: Histograma muestreo original e Histograma tras eliminación de outliers 35
Ilustración 20: Tendencia de desviación estándar en función del poder de transformación λ 36
Ilustración 21: Resultado de análisis de bondad de ajuste tras la transformación de Box-Cox 36
Ilustración 22: Resultado de búsqueda de transformada de Johnson 37
Ilustración 23: Separación de tendencias modales en el conjunto de datos 38
Ilustración 24: Separación lograda del conjunto de datos 39
Ilustración 25: Diagramas de caja de desempeño por turnos 42
Ilustración 26: Diagramas de caja de desempeño por jornada 43
Ilustración 27: Diagramas de caja de desempeño por horario administrativo 44
Ilustración 28: Diagramas de caja de desempeño por turnos, jornada y horario administrativo 45
Ilustración 29: Análisis de capacidad para: turno 3, noche, horario no administrativo 48
Ilustración 30: Distribución SEV como representación del muestreo de datos 49
Ilustración 31: Análisis de capacidad muestreo, situación actual 50
Ilustración 32: Gráfico de Pareto de fallas más comunes acotado al intervalo de muestreo 51
Ilustración 33: Distribución SEV para muestreo y Distribución SEV objetivo. 52
Ilustración 34: Resumen gráfico de las iteraciones de la simulación de Monte Carlo 53
Ilustración 35: Análisis de capacidad simulación 53
Ilustración 36: Resultado gráfico del análisis de sensibilidad 54
Ilustración 37: Diagrama de flujo de mineral ROM 55
Ilustración 38: Diagrama Jack-Knife de análisis específico 56

Capítulo I: Introducción

1.1. Problema

La operación actual del proceso de chancado y correas, dista de su capacidad de diseño a pesar de tener el dimensionamiento y equipamiento necesarios, según comprueba un estudio a cargo de Ingeniero Senior de Operación chancado, Oscar Leiva Sanhueza, en el cual se demuestra que debido a la complejidad del sistema, las grandes distancias y los diversos imprevistos de la operación, se produce una gran variabilidad en la carga contenida en las correas overland, teniendo un OEE de los equipos pertenecientes al proceso de chancado y transporte por correas, de un 57% promedio contra el benchmark de 82% (Compañía minera Antamina), por lo que como compañía se ha propuesta anclar 57% como mínimo y apuntar a un 70% de OEE.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes de la Faena [1] [2]

Ubicada en la región de Antofagasta en la cordillera de Domeyko, a 175 km al Sureste de la ciudad de Antofagasta, situada a una altura geográfica de 3150 m.s.n.m.; coordenadas geográficas: 26°16´ Latitud Sur, 69°04´ Longitud Sur.

El acceso a las instalaciones se realiza por la ruta B-28, salida Sur desde Antofagasta, tomando posteriormente Av. La minería en dirección Este. Al llegar a la intersección con la ruta 5, en el sector de la Negra, se continúa el camino en dirección Este por la ruta 475, recorriendo aproximadamente 130 km hasta llegar a la garita de control de acceso.

Ilustración 1: Ubicación de Minera Escondida. [1]

En 1978 la minera “Utah International” y “Getty Minerals” inician el proyecto Atacama, que trataría de un sistemático programa de exploración de recónditos depósitos en el norte de Chile. Ya con 5 sondajes negativos se decide llevar a cabo el plan de exploración programado y es en el sexto sondaje perforando la ladera del cerro Colorado Grande que nace el mito el 14 de Marzo de 1981 quedando el nombre de “Escondida” debido a las manifestaciones mineras.

En 1984 Utah y Getty son adquiridas por BHP Australia, autorizándose ese mismo año la autorización para construir un puerto en el sector de Coloso.

Y desde 1985 se formaliza la propiedad inicial de Escondida entre BHP (60%), Rio Tinto Zinc (30%) y JECO (10%), con lo que desde el 1 de septiembre de ese año se oficializa de manera tal Minera Escondida Limitada, suscribiendo un contrato de inversión extranjera de 1100 millones de dólares el 16 de marzo de 1988, un record para la época y realidad chilena; comenzando formalmente su construcción el 25 de julio de ese año y realizando su primera tronadura el 23 de octubre en la ladera sur de cerro Colorado Chico.

En 1989 se construye en paralelo Puerto Coloso, el primer chancador y la primera planta concentradora de Minera Escondida, llamada “Los Colorados”, con una capacidad de proceso de 35.000 toneladas diarias de cobre utilizando dos molinos semiautogenos (SAG) y dos molinos de bolas. Las celdas de flotación en columna de 4x4 metros eran las más grandes instaladas y convirtieron a Escondida en la única planta en el mundo que dependía exclusivamente de ellas para la etapa de limpieza. Otra gran innovación que marcó un avance en la minería del cobre fue el método de traslado del concentrado de cobre en forma de pulpa, a través de un mineroducto de 170 kilómetros de largo, que aprovechaba la gravedad en los sectores con pendiente para su cometido desde la planta concentradora Los Colorados hasta Puerto Coloso, en el cual desde su primer embarque en diciembre de 1990 hasta el día de hoy llega el concentrado para ser filtrado, almacenado y posteriormente embarcado.

En 1993 comienza el primer plan de expansión, la Fase 1 de crecimiento, la cual consistía en elevar la capacidad de procesamiento de 35.000 a 37.500 toneladas por día por medio de la implementación de nuevos equipos, una moderna pala eléctrica y 12 camiones de 240 toneladas, e incrementando el personal de 252 a 340 trabajadores.

Para abril de 1996, Escondida ya contaba con 1919 trabajadores y seguía creciendo. Se pondría en marcha ese mismo año la Fase 3, elevando la capacidad de proceso hasta las 105.000 toneladas por día, logrando una producción anual de 800.000 toneladas de cobre fino entre la producción de concentrado y cátodos, conviniéndose en la mina privada de mayor producción a nivel mundial.

En 1999 se vuelve a incrementar la capacidad de procesamiento con la inauguración de la Fase 3.5 y la construcción de la Planta de óxidos logrando las 127.500 toneladas por día.

A principios del año 2001 se lleva a cabo la Fase 4 con la nueva planta concentradora Laguna Seca que fue clasificada como la más moderna a nivel mundial con capacidad para procesar 110.000 toneladas diarias, esto trae consigo un aumento de los equipos de operación en la mina y la contratación de 200 trabajadores de planta.

A fines del año 2002 se instituyen las “Conductas esperadas” y “Reglas cardinales” de Escondida, que establecen e impulsan acciones específicas para fomentar el comportamiento seguro y evitar fatalidades o accidentes graves, lo cual culmina en la implementación de la política de sustentabilidad HSEC (Salud, Seguridad, Medio ambiente y Comunidad), y en 2003 nace además uno de los ejes más férreos de Escondida, el “Cero daño” el cual reúne en una sencilla, pero contundente expresión las expectativas y aspiraciones de respeto por la vida, la cual aplican no solo a Escondida y sus colaboradores, sino a todas las personas y organismos vinculados con la Compañía.

El 1 de Octubre del 2005, el segundo rajo de Escondida, Escondida Norte, completa su etapa de desarrollo. Ubicado a aproximadamente 5 kilómetros del rajo Escondida, proveyendo mineral de alta ley a las concentradoras y de óxidos.

A fines de este año entra en operación el proyecto de “biolixiviación de sulfuros” para procesar mineral de baja ley en las pilas de lixiviación de sulfuros más grande en su tipo a nivel mundial, entregando su primer cátodo en Junio del 2006. Este innovador proceso se realiza mediante lixiviación bacteriana, cuyas soluciones son tratadas posteriormente en una planta de extracción por solventes y de electro obtención para producir los cátodos.

Actualmente Minera Escondida se compone de dos rajos (Escondida y Escondida Norte), 180 camiones, 18 palas, 5 chancadores (cuatro de sulfuros y uno de óxidos), dos plantas concentradoras (Los Colorados y Laguna Seca) más una tercera planta concentradora (OGP1) en proceso de marcha blanca, un puerto de carga (Puerto Coloso), una planta desalinizadora, 4608 trabajadores de propios y 8707 trabajadores de empresas colaboradoras.

Minera Escondida es la principal empresa minera privada en Chile y, por lo tanto, un actor relevante en la economía nacional, en 2013 el total de impuestos pagados por operaciones sumó un total de US$ 881 millones. Durante 2014, Minera Escondida produjo el equivalente a 1.171.648 toneladas métricas de cobre, lo que representa el 20,2% del total de la producción nacional y el 6,3% de la producción mundial.

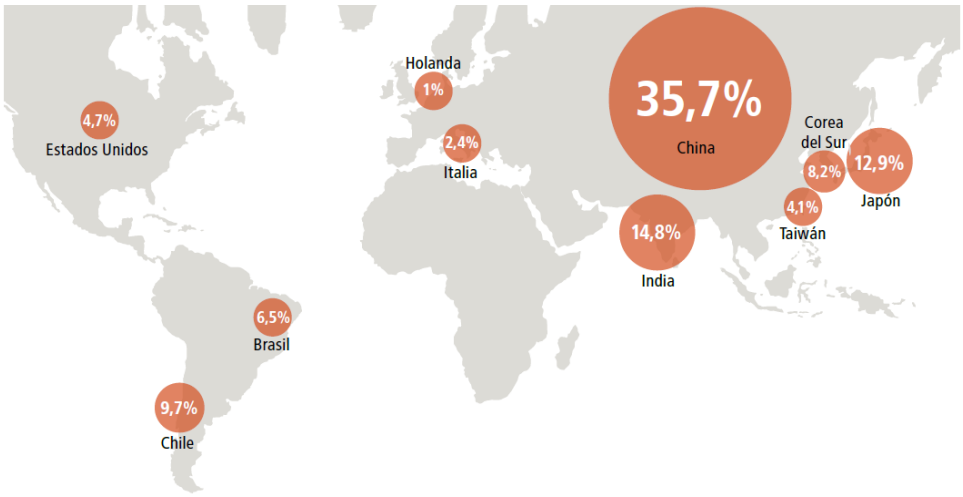


Ilustración 2: Ventas de cobre (concentrado y cátodos) correspondientes al 2014. [2]

1.2.2. Proceso productivo [2]

En Minera Escondida se obtienen dos productos comerciales: concentrado de cobre que es obtenido a partir de los sulfuros de cobre, y cátodo de cobre de alta pureza (99,99% Cu) obtenido a partir de los óxidos de cobre y sulfuros de baja ley.

1.2.2.1. Extracción del mineral

La extracción del mineral procede de dos minas a rajo abierto, Rajo Escondida y Rajo Escondida Norte, siendo este último valorado por su mayor ley. El cobre extraído se encuentra de tres formas: sulfuro de alta ley, sulfuro de baja ley y óxidos de cobre. Los sulfuros y óxidos son enviados a chancado y pilas de biolixiviación, además el lastre o material estéril es derivado a los botaderos.

El proceso se realiza en base a la planificación anual, elaborada por el área de planificación, la cual define los sectores de explotación y determina la cantidad y el tipo de mineral a extraer, además de la cantidad de lastre necesaria para despejar el mineral. De esta forma se definen las mallas de perforación que indican los puntos que se deberán perforar para la instalación de cargas explosivas y accesorios de detonación necesarios para la tronadura.

Luego de la tronadura, palas y/o cargadores frontales cargan el mineral fragmentado en camiones de alto tonelaje. Los destinos de descarga de los camiones son definidos y coordinados por despacho dependiendo del material en cuestión: óxidos de cobre son destinados al chancador 4, sulfuros de baja ley son trasladados directamente al sector de apilamiento sin pasar por chancado, y sulfuros de alta ley son destinados a chancadores 1, 2 y 3 para el caso del mineral de Rajo Escondida y al chancador 5 para el mineral de Rajo Escondida Norte.

1.2.2.2. Chancado del mineral y transporte

El proceso de chancado cuenta con cinco chancadores, uno destinado a los óxidos de cobre (chancador 4) y tres chancadores destinados a sulfuros de alta ley provenientes del Rajo Escondida (chancadores 1, 2 y 3) y un chancador destinado a los sulfuros de alta ley del Rajo Escondida Norte (chancador 5).

El objetivo del proceso de chancado y correas es mantener los stockpiles abastecidos de carga viva para que tanto las plantas concentradoras como la pila de lixiviación de óxidos puedan procesar material de forma continua.

El mineral proveniente del Rajo Escondida Norte tiene mayor ley, pero mayor dureza; por lo que la carga enviada a las plantas concentradoras es una mezcla de mineral entre ambos rajos, esta mezcla se produce en las líneas críticas de correas: línea overland para Laguna Seca, New Overland para OGP1, y línea B para los Colorados.

La línea de proceso conminutivo para óxidos de cobre es bastante sencilla ya que es solo un chancador, seguido de una línea de correas hasta la pila de óxidos. En el caso de los sulfuros de alta ley, se tiene un arreglo de correas capaz alimentar los stockpiles de las concentradoras con diversas configuraciones para adaptarse a mantenimientos e imprevistos.

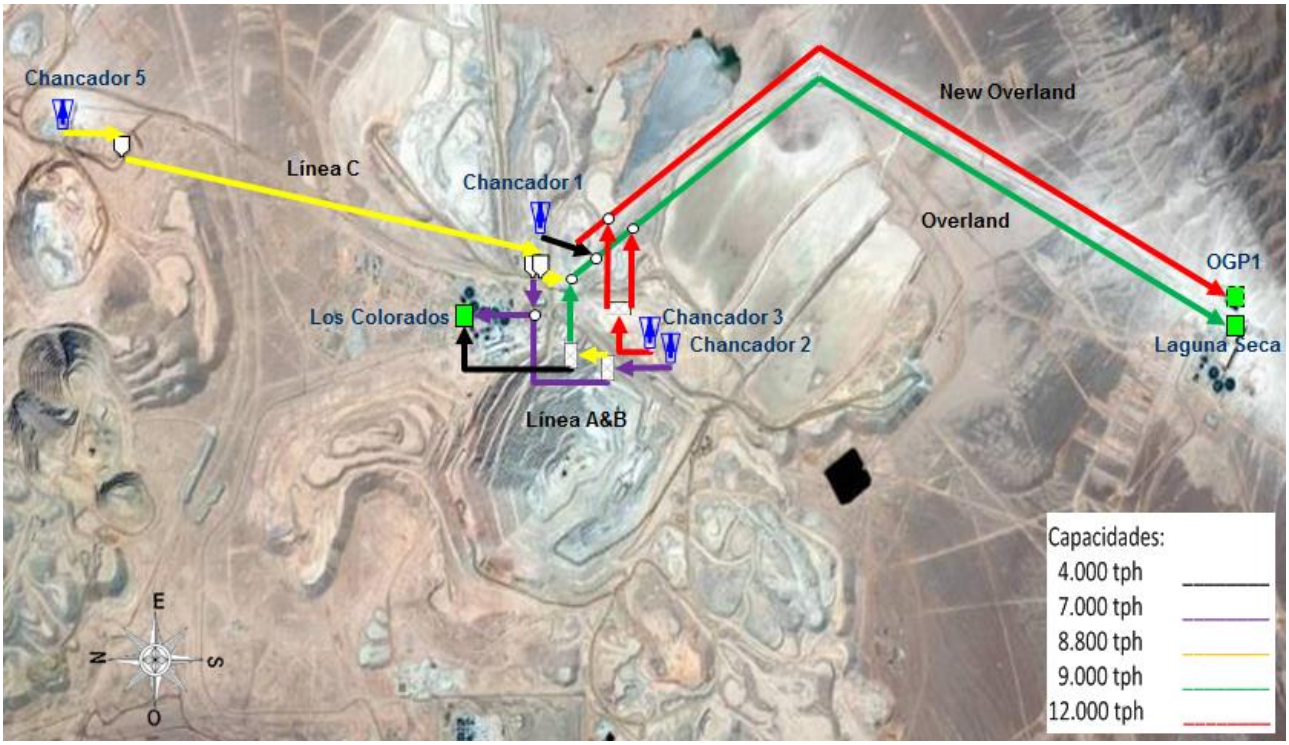


Ilustración 3: Ubicación geográfica de chancadores de sulfuros y representación de conexiones con correas.

1.2.2.3. Proceso de lixiviación de óxidos

Este proceso tiene como objetivo obtener el cobre contenido en los minerales oxidados a través de la aplicación de una solución de ácido sulfúrico y agua. Una vez que el mineral oxidado ha sido triturado y depositado en un stockpile, se somete a etapas de chancado secundario y terciario para obtener una granulometría P80 de ¾ de pulgada, es transportado hasta un silo de almacenamiento y luego derivado a tambores aglomeradores.

En los aglomeradores el mineral es rociado con ácido sulfúrico y una solución de refino, provocando la unión del mineral hasta formar partículas llamadas glómeros, estos son transportados mediante correas transportadoras hasta un apilador radial, el cual acopia el mineral formando pilas de lixiviación permanentes sobre bases impermeabilizadas.

Al finalizar el apilamiento se inicia el proceso de lixiviación, en el cual se extrae el cobre del mineral oxidado, basándose en la propiedad de la solubilidad en acido que posee el mineral de cobre. Para ello, se instalan tuberías y accesorios de riego sobre la pila con el fin de irrigar al mineral con solución de refino e ILS que disolverá lentamente el cobre, dando paso a una solución de cobre llamada PLS, que posee una concentración de 4 a 6 gramos por litro de cobre. Esta solución percola a través de la pila hasta la base impermeabilizada, desde donde escurre hasta ductos absorbentes que la transportan a las piscinas de PLS.

A partir de la obtención del electrolito rico en cobre, el proceso se desarrolla en la nave de electro-obtención, tanto para el electrolito proveniente del mineral oxidado como el que viene de la biolixiviación de sulfuros de baja ley.

En celdas ubicadas al interior de las naves de electro-obtención, se disponen alternadamente placas de acero inoxidable con carga eléctrica negativa (cátodo) y placas de plomo con carga eléctrica positiva (ánodo). Por estas celdas se hace circular energía eléctrica que permite que las partículas presentes de cobre en la solución sean atraídas a las placas de acero formando así el cátodo de cobre.

Posteriormente se realiza la cosecha, que consiste en el retiro de las placas de acero con cobre adherido a ellas y desprender el cobre mediante el uso de la maquina despegadora de cátodos.

Finalmente los cátodos de cobre son clasificados, apilados y embalados para ser transportados mediante ferrocarril hasta el puerto de Antofagasta, donde son embarcados.

1.2.2.4. Proceso de biolixiviación de sulfuros de baja ley

Este proceso, también conocido como lixiviación bacteriana de sulfuros, tiene como objetivo transformar el mineral sulfurado de cobre en mineral oxidado. Para ello se utilizan bacterias específicas que, en presencia de oxígeno y condiciones especiales de riego, provocan la oxidación biológica de los sulfuros de cobre, permitiendo su posterior lixiviación por medio de la solución acida de refino.

Se inicia en la etapa de apilamiento, donde el mineral sulfurado de baja ley es enviado desde los rajos con la granulometría obtenida tras la tronadura. Este mineral es apilado sobre una base impermeable, formando pilas permanentes.

Una vez que el mineral es apilado, tuberías instaladas sobre las pilas permiten regarlo mediante una solución de cultivo de bacterias y refino a 25°C, a la vez que le es inyecto aire. El riego se desarrolla en ciclos con una duración de 250 a 350 días, obteniéndose una solución de PLS de 3 a 4 gramos por litro de cobre.

Posteriormente, la solución PLS ingresa a la etapa de extracción por solventes SX, cuya función es transferir selectivamente el cobre contenido en el PLS a una solución llamada electrolito. En esta etapa, un extractante orgánico reacciona con la solución PLS extrayendo el cobre contenido. Luego, en la etapa de reextracción, el extractante orgánico es puesto en contacto con una solución de alta acidez provocando una reacción en la cual el cobre es transferido desde el extractante hacia el electrolito.

El electrolito rico en cobre entra ahora a la etapa de electro-obtención descrito anteriormente para producir cátodos de cobre de alta pureza.

1.2.2.5. Proceso de plantas concentradoras

Se cuenta con tres plantas concentradoras, Los Colorados, Laguna Seca y OGP1, en estos se llevan a cabo los procesos de molienda, clasificación y flotación que permite obtener una pulpa de concentrado de cobre.

El proceso inicia con la alimentación del mineral sulfurado proveniente del stockpile, a la molienda SAG a través de correas transportadoras, en este proceso se ingresa agua de forma dosificada.

La pulpa proveniente de la molienda SAG es enviada a una etapa de clasificación en un Harnero de Pebbles, donde son separados los bolones del resto de la pulpa y son enviados a un chancador de Pebbles en el cual se les reduce de tamaño para reingresarlos al molino SAG. La pulpa de baja granulometría que sale del Harnero de Pebbles es enviada a una segunda clasificación de Baterías de Hidrociclones. El mineral que ha alcanzado las dimensiones adecuadas es denominado bajo tamaño u "overflow", este es enviado a un cajón distribuidor para iniciar el proceso de flotación, en cambio el material sobre tamaño u "underflow" es dirigido a la etapa de molienda secundaria en molinos de bolas. Desde estos molinos, la pulpa es reenviada a la etapa de clasificación en Baterías de Hidrociclones.

Desde el cajón distribuidor, la pulpa es dirigida a las celdas de flotación Rougher, donde llega acondicionada con espumantes y acondicionadores selectivos que mejoran las propiedades de las partículas de cobre, haciéndolas hidrofóbicas y acrofílicas; además se inyecta aire para lograr la formación de burbujas a las que se adherirán las partículas de cobre.

Las partículas hidrofóbicas acopladas a las burbujas emergerán a la superficie y serán retenidas allí gracias a la acción de los espumantes, completándose esta etapa del proceso con el reboce de la espuma enriquecida. La cola obtenida de este proceso de flotación de este proceso de flotación Rougher es el primer relave obtenido, el cual se conduce hacia Espesadores de Relaves para recuperar parte del agua y reingresarla al proceso, mientras que el relave remanente se bombea hasta un deposito final llamado Tranque de relaves.

El concentrado de cobre obtenido en la etapa Rougher es enviado a una nueva etapa de clasificación en Baterías de Hidrociclones del área de remolienda, donde el material underflow pasa a una etapa de remolienda en molinos de repaso, donde lo obtenido es llevado nuevamente a las Baterías de Hidrociclones. El material overflow es enviado a una etapa de Flotación Cleaner.

La cola de Flotación Cleaner se procesa en una etapa de Flotación Scavenger. Aquí nuevamente se incorporan acondicionadores, espumantes y aire, logrando la flotación de las partículas de cobre que se retorna a las Baterías de Hidrociclones del área de flotación. El concentrado obtenido en la Flotación Cleaner contiene 35% de cobre y es enviado a los Espesadores de concentrado.

En los Espesadores de concentrado se retira parte del agua contenida en la pulpa. Como resultado del espesado se obtiene concentrado de cobre con una concentración de solidos del 62%. El agua recuperada es retornada al proceso al igual que el agua recuperada de la etapa de espesamiento de relaves. Por su parte, el concentrado de cobre, con 8% de humedad, es enviado a estanques de almacenamiento para ser impulsado a través de un mineroducto de 170 km hasta Puerto Coloso.

1.2.2.6. Proceso Planta Coloso

La Planta Coloso se encuentra ubicada a 14 km al Sur de la ciudad de Antofagasta y consta de una Planta de Filtros y un puerto de embarque para el concentrado de cobre.

La Planta de Filtros tiene por objetivo recibir la pulpa de concentrado de cobre que llega de las plantas concentradoras para retirar el agua y seleccionar las diferentes calidades. Luego es enviado por medio de una correa transportadora hasta un stockpile. Desde ahí el concentrado es almacenado en barco o es transportado en camiones para los diferentes destinos finales mostrados en la ilustración 2.

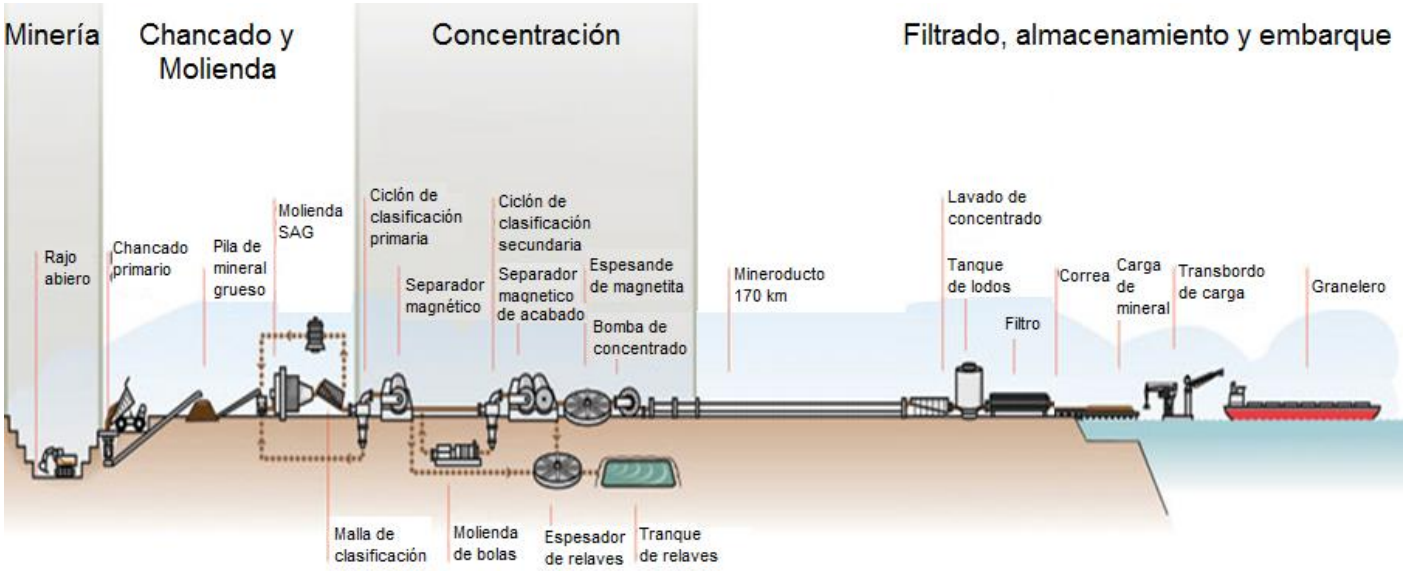


Ilustración 4: Diagrama del proceso productivo de concentrado de cobre en Minera Escondida [2]

1.2.3. Antecedentes Superintendencia Ingeniería Mina

La Superintendencia Ingeniería Mina es el área en la cual quien suscribe ha sido asignado para el desarrollo de este trabajo de título.

Se forma el área en Enero del 2012 al interior de la Gerencia de Ingeniería Mina con el nombre de Superintendencia Soporte Técnico (SI Governance & Technical Stewardship), un equipo multidisciplinario de ingenieros con el propósito de validar proyectos e iniciativas a implementarse en el proceso productivo de Minera Escondida sin que estos se desvíen de sus objetivos ni de las buenas practicas.

En Abril del 2015 se cierra la Gerencia de Ingeniería Mina, pasando la superintendencia a ser parte de la Gerencia General de Operaciones Mina y llamándose Superintendencia Ingeniería Mina, manteniendo su rol de apoyo a las áreas productivas y además asumiendo las labores de las demás superintendencias que formaban parte de la Gerencia: Superintendencia Modificaciones & Proyectos Menores, y Superintendencia Estándares & Control del Cambio.

1.2.4. Antecedentes bibliográficos [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13]

1.2.4.1. Six Sigma [4]

Six Sigma es una metodología de mejora de procesos que utiliza una serie de técnicas y herramientas estadísticas en busca de reducir la variabilidad del proceso, consiguiendo eliminar o reducir los fallos en la entrega de un producto o servicio hasta 3,4 DPMO que corresponde ser cuando la producción exitosa se confina dentro de seis desviaciones estándar desde la media.

La metodología se basa en el ciclo PHVA de Deming, dando origen al ciclo DMAIC enfocado a procesos existentes:

- **Definir:** Consiste en concretar el objetivo del problema o defecto y validarlo, a la vez que se definen los participantes del programa.
- **Medir:** Consiste en entender el funcionamiento actual del problema o defecto.
- **Analizar:** Pretende averiguar las causas reales del problema o defecto.
- **Mejorar:** Permite determinar las mejoras procurando minimizar la inversión a realizar.
- **Controlar:** Se basa en tomar medidas con el fin de garantizar la continuidad de la mejora y valorarla en términos económicos y de satisfacción del cliente.

En la actualidad, Six Sigma ha ido evolucionando desde su aplicación meramente como herramienta de calidad y se ha visto influida por el éxito de otras herramientas, como “lean manufacturing”, con las que comparte algunos objetivos, lo que ha generado una nueva metodología conocida como Lean Six Sigma, incluyéndose dentro de los valores clave de algunas empresas, como parte de su filosofía de actuación.

1.2.4.2. Ajuste de distribución [5] [8]

El ajuste de curvas es un proceso mediante el cual, dado un conjunto de N pares de puntos (siendo una variable independiente y una dependiente), se determina una función matemática de tal manera que la suma de los cuadrados de la diferencia entre la imagen real y la obtenida mediante la función ajustada en cada punto sea mínima

El objetivo del ajuste de curva es obtener, en base a los puntos obtenidos de medición, una estimación de otros puntos que no fueron medidos empíricamente en base a la tendencia mostrada, pudiendo así estimar un futuro comportamiento.

Para este caso de estudio, la variable de interés es analizada en un histograma para concebir los pares de puntos entre la frecuencia relativa y la marca de clase de cada intervalo, estimándose la probabilidad de obtener una medición exitosa.

1.2.4.3. Bondad de ajuste: Prueba de Anderson-Darling y Valor p [3] [5] [6]

La bondad del ajuste es el grado de acoplamiento que existe entre los datos empíricos y los valores teóricos que se obtienen de la distribución ajustada, cuantificando por medio de una prueba si existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos.

Desde 1990 se han desarrollado diversas pruebas de bondad de ajuste, para el caso de estudio se utilizara la prueba de Anderson-Darling.

La prueba de Anderson-Darling es una prueba no paramétrica sobre si los datos de una muestra provienen de una distribución específica. Esta prueba hace uso de la distribución especificada para calcular valores críticos. Esto tiene la ventaja de permitir una prueba con mayor sensibilidad, a diferencia de otras pruebas como la de Komolgorov-Smirnov, ya que A-D es más susceptible a las desviaciones en las colas de la distribución.

La fórmula de la prueba de A-D se basa en el estadístico A, que luego se puede comparar contra las distribución especificada para determinar el valor p. (Para la definición matemática de la prueba de A-D y valores tabulados, ver anexo B-1).

El valor p se puede definir como el menor nivel de significación al que se puede rechazar una hipótesis nula cuando es verdadera.

Se basa en la comparación de la hipótesis que la data coincide con la distribución especificada (hipótesis nula) y la hipótesis que la data no coincide dicha distribución (hipótesis alternativa). Si el valor p es mayor al nivel de significación, se aprueba la hipótesis nula, y en caso contrario se acepta la hipótesis alternativa.

- Si valor $p > \alpha$, se acepta la hipótesis nula.
- Si valor $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

1.2.4.4. Distribución Weibull y Valor extremo mínimo [7]

La distribución Weibull es ampliamente usada en análisis de confiabilidad para modelar tiempos de falla de productos, ya que su principal ventaja es la habilidad de proveer una predicción y análisis de falla con bastante precisión basado en muestras pequeñas de datos, y además provee una gráfica útil y sencilla de interpretar respecto de los registros de fallas. Esta es definida principalmente por dos parámetros, uno de forma (β) y otro de escala (η)

La distribución Valor extremo mínimo (SEV), así como la distribución Valor extremo máximo (LEV), son conocidas como distribución de Gumbel y son casos particulares de la distribución Fisher-Tippett. Estas están relacionadas con la distribución Weibull, particularmente la distribución SEV, ya que equivale ser una distribución LogWeibull.

La distribución SEV se usa comúnmente en una muestra de muchas distribuciones, así como también es usada para datos de medidas sesgadas negativamente. Es definida principalmente por dos parámetros, uno de escala (φ) y uno de localización (ω), y estos se pueden relacionar con los parámetros de la distribución Weibull de la siguiente forma:

$$\omega = log(\eta) \qquad \varphi = \frac{1}{\beta}$$

1.2.4.5. Preparación de la data para modelamiento [3] [11] [12]

Cuando se pretende modelar información, se debe recurrir a algunos procedimientos base para preparar cunado se requieran estimaciones confiables de media y desviación estándar, y/o se necesite una estimación de la capacidad del proceso.

Primero se deben filtrar los registros de modo que se eliminen los outliers, y luego, la data debe ser normalizada y/o estandarizada para que todas las variables queden en proporción entre ellas. De esta forma se pueden considerar comparables al no estar ligadas a una unidad de medida ni tendencias diferentes.

- <u>Outliers</u>

  Se entiende por outliers a todos esos registros que se producen por anormalidades en la operación y que son excepciones del comportamiento del sistema, su causa se puede deber a diversos factores como son: equivocación al registrar la información, anomalía en el proceso o incluso azar. Su efecto en el análisis es de distorsión, ya que provee tendencias excepcionales que no son representativas.

  Se han desarrollado muchos métodos para distinguir outliers, como la prueba de Grubb que considera la distancia respecto de la media, o la prueba de Dixon que considera la distancia respecto del valor más cercano, pero ambos casos consideran distribución normal. Un método aplicable a datos no normales es la visualización de la data por medio de un gráfico de puntos o un histograma.

- Normalización

Por normalización se entenderá el proceso llevado a cabo por medio de ajustes algebraicos que tengan efectos más significativos en alguno de los extremos de la distribución, con la intención de convertir una distribución probabilística (o bien una tendencia hacia dicha distribución), a una distribución normal de probabilidad, o en su defecto corregir la asimetría.

Esto será llevado a cabo, en la medida que sea aplicable y no haya múltiples modas, por uno de los siguientes métodos:

  - Transformación de Box-Cox

    La familia de transformaciones de Box-Cox se basan en la forma original presentada en 1964:

$$y(\lambda) = \begin{cases} \dfrac{y^{\lambda} - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ log(\lambda), & \lambda = 0 \end{cases}$$

    En la cual el parámetro lambda (λ) es seleccionado entre las potencias de -5 y 5, de modo que la desviación estándar de los datos transformados corresponda a un mínimo.

    Esta transformación es fácil de entender, pero muy limitada y a menudo no es capaz de encontrar una transformación adecuada.

  - Transformación de Johnson

    En 1949 fue propuesto un sistema que permitía transformar un conjunto de datos a una distribución normal, el cual consiste en cuatro formas básicas que dan origen a las familias de funciones las cuales cubren una gran variedad de distribuciones al cambiar sus parámetros.

$$z(x) = \gamma + \delta * g\left(\frac{x - \xi}{\lambda}\right), \qquad \delta, \lambda > 0, \qquad \gamma, \xi \in \mathbb{R}$$

    Siendo la función g una de las siguientes:

$$g(y) = \begin{cases} ln(y), & familia\ lognormal \\ \sinh^{-1}(y), & familia\ ilimitada \\ ln\left(\dfrac{y}{1-y}\right), & familia\ delimitada \\ y, & familia\ normal \end{cases}$$

- Estandarización

  Por estandarización se entenderá el proceso por el cual una distribución normal es ajustada por medio de la transformada Z, con el fin de definirla con media de valor 0 y desviación estándar de valor 1.

  La transformada Z consiste en que los datos (x_i) son reducidos en el valor de la media ($\bar{x}$) y luego divididos por la desviación estándar (s).

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

- Modas múltiples

  Ocasionalmente se percibe que el registro de datos posee más de un valor al cual tienden los resultados obtenidos, esto puede ser producto de alguna cualidad del proceso, por lo cual ha de ser considerado, analizado y definida su causa.
  El modo de proceder es separar la información para analizar cada tendencia por separado y luego ponderar los índices de interés.

1.2.4.6. Análisis de capacidad [3]

El análisis estadístico de la capacidad del proceso suele comenzar con un estudio de este para realizar estimaciones de los parámetros fundamentales que definen su funcionamiento; especialmente, de los parámetros que determinan su variabilidad. Este último aspecto es esencial, puesto que se puede considerar como un indicador de la uniformidad en el rendimiento. Se pueden analizar dos tipos de variabilidad:

- La variabilidad instantánea (within), en un instante dado, que determina la capacidad del proceso a corto plazo
- La variabilidad en el transcurso del tiempo (overall), que determina la capacidad del proceso a largo plazo.

El análisis de la capacidad del proceso a través de su variabilidad requiere el conocimiento o la estimación de la distribución de la característica estudiada.

La interpretación de este análisis se realiza por medio de los índices de capacidad, de los cuales los índices de capacidad asociados con la variación a corto plazo son Cp, Cpk, CPU, y CPL; por otro lado, los asociados con la variación a largo plazo son Pp, Ppk, PPU, y PPL. En la práctica, se suele considerar que 1,33 es el valor mínimo aceptable para un índice de capacidad.

Tabla 1: Definiciones índices de capacidad [3]

Índice		Uso	Definición
Corto plazo	**Largo plazo**		
Cp	Pp	Es la capacidad potencial del proceso a corto y largo plazo respectivamente	$\frac{LES - LEI}{6\sigma}$
Cpk	Ppk	Ajuste del índice Cp/Pp por efecto de asimetría	$Min\left\{\frac{LES - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LEI}{3\sigma}\right\}$
CPU	PPU	El proceso solo tiene un límite de especificación superior	$\frac{LES - \mu}{3\sigma}$
CPL	PPL	El proceso solo tiene un límite de especificación inferior	$\frac{\mu - LEI}{3\sigma}$
	Cpm	Capacidad actual referida al valor "target"	$\frac{LES - LEI}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - target)^2}}$

Además de los índices de corto y largo plazo, se analiza los PPM o porcentaje de desempeño, representando la proporción de resultados fuera de rango de aprobación.

1.2.4.7. El principio de Pareto, la regla de 80/20

Originalmente, el principio de Pareto hacía referencia a la observación de que el 80% de la riqueza de Italia pertenecía solo al 20% de la población.

Como generalización, el principio de Pareto es la observación, mas no ley, que las cosas no se distribuyen equitativamente, traduciéndose como que el 20% de las aportaciones crean el 80% de los resultados, e.g. el 20% del trabajo en un proyecto consumirá el 80% de tu tiempo y recursos; el 20% de los clientes contribuyen con el 80% de los ingresos; el 20% de los defectos causan el 80% de los problemas, según los trabajos iniciales de Juran.

Es este último ejemplo el que nos es de interés ya que diferencia las causas vitales de las triviales, permitiendo distinguir donde concentrar los esfuerzos para la mejora del proceso.

1.2.4.8. Análisis de varianza (ANOVA) [8]

Esencialmente consiste en la descomposición de la variabilidad total presente en las respuestas en componentes que puedan ser atribuidos a cada uno de los efectos considerados en el experimento, y la interacción entre dichos efectos. La posibilidad de hacer esto se basa en propiedades algebraicas que permiten descomponer una medida de variabilidad específica en términos aditivos, cuyas magnitudes dependen individualmente de los distintos efectos determinados por los factores. El

resultado de este análisis se presenta en una tabla que incluye la siguiente información respecto de cada efecto considerado:

- **Factor:** corresponde ser cada fuente de variación considerada, ya sea un efecto, interacción de efectos o margen de error.
- **Grado de libertad (DF):** corresponde ser el número de valores que pueden ser asignados de forma arbitraria a cada factor.
- **Suma de cuadrados (SS):** Corresponde a la variación calculada como la suma de cuadrados entre grupos (efectos e interacciones), y al interior de los grupos (error).
- **Cuadrados medios (MS):** Corresponde al cociente entre la suma de cuadrados y su respectivo grado de libertad.
- **Comparación entre variaciones (F):** Corresponde al cociente entre los cuadrados medios de un factor y los cuadrados medios del error. Para determinar si un factor es significativo, este cociente es contrastado con el valor teórico de la tabla F de Snedecor o utilizando el valor p.
- **Valor p (P):** Para considerar un efecto como significativo, el valor P debe ser menor al nivel de significancia utilizado (0,05).

1.2.4.9. Simulación de Monte Carlo [9]

La simulación de Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos como el muestreo aleatorio, con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos.

La clave de la simulación Monte Carlo consiste en crear un modelo matemático del sistema identificando aquellas variables cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema, y acto seguido se lleva a cabo un experimento consistente en primer lugar, en generar muestras aleatorias para dichas variables, y luego se analiza el comportamiento del sistema ante los valores generados. Tras iterar n veces este experimento, se dispone de n observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual será de utilidad para entender el funcionamiento del mismo, siendo tanto más preciso cuanto mayor sea el número n de experimentos realizados.

La generación de números aleatorios en ordenadores está definida en primera instancia por una distribución uniforme entre 0 y 1, tal que cada número generado tenga la misma probabilidad de ocurrencia. Para obtener números aleatorios provenientes de otras distribuciones, se utiliza el método de la transformada inversa para derivar las fórmulas que permiten obtener valores aleatorios provenientes de distribuciones como la Weibull o la Lognormal.

1.2.4.10. Clasificación de estimaciones económicas [10]

Una estimado Clase 5 es un estimado para inversiones de diferentes proyectos en estudio, corresponde a la etapa conceptual del proyecto en donde la información disponible está limitada al tipo de planta, capacidad, configuración del lugar, localización y requerimientos especiales. Su propósito fundamental es evaluar una o varias alternativas para determinar si el proyecto es técnica y económicamente atractivo y de ser así continuar con su fase de desarrollo. La precisión de éste es comúnmente considerada entre -30% a +50%, pero su definición descrita por la Asociación

Americana de Ingeniería de Costos (AACE international) es entre 20% a 50% para el rango inferior, y entre 30% y 100% para el rango superior.

Tabla 2: Matriz de clasificación de estimaciones por clase (AACE international) [10]

Clase de estimación	Nivel de definición de proyecto	Propósito de la estimación	Metodología	Rango de precisión esperado
Clase 5	0% a 2%	Proyección del concepto	Juicio o estimación estocástica	Inf: -20% a -50% Sup: +30% a +100%
Clase 4	1% a 15%	Estudio de viabilidad	Estimación principalmente estocástica	Inf: -15% a -30% Sup: +20% a +50%
Clase 3	10% a 40%	Presupuesto, autorización o control	Estimación mixta, pero principalmente estocástica	Inf: -10% a -20% Sup: +10% a +30%
Clase 2	30% a 70%	Control o propuesta	Estimación principalmente determinística	Inf: -5% a -15% Sup: +5% a +20%
Clase 1	50% a 100%	Revisión estimación de propuesta	Estimación determinística	Inf: -3% a -10% Sup: +3% a +15%

1.2.4.11. Modelo de Utilización de Tiempo y Eficiencia global de los equipos [13]

La definición de tiempos se basa estrictamente en el Modelo de Utilización de Tiempo (TUM) de BHP Billiton en la cual se incluyen las relaciones entre ellos, esto permite asignar el tiempo en distintas categorías, con el propósito de comparar el desempeño de una forma estandarizada a lo largo de las distintas faenas.

<table>
<tr><th colspan="6">Tiempo de calendario</th></tr>
<tr><th colspan="5">Tiempo Requerido</th><th rowspan="3">Standby</th></tr>
<tr><th colspan="3">Tiempo Disponible</th><th colspan="2" rowspan="2">Tiempo Detención Equipos</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Tiempo de Producción</th><th colspan="2">Tiempo Detención Proceso</th></tr>
<tr><th>No Programada</th><th>Programada</th><th>No Programada</th><th>Programada</th></tr>
</table>

Ilustración 5: Esquema de definición tiempos según modelo de BHP Billiton [13]

Tiempo calendario hace referencia al tiempo que transcurre en 365 días al año, con año bisiesto cada 4 años según el calendario Gregoriano acordado internacionalmente.

Tiempo requerido es el tiempo durante el cual se requieren equipos o personal para realizar las actividades de operación o mantención.

Tiempo en Standby es el tiempo en que el equipo no es requerido o no está disponible debido a condiciones o motivos que escapan al control directo de la administración del proceso.

Tiempo disponible es el período de tiempo durante el cual un ítem está en condiciones de realizar su función requerida y se requiere realizar dicha función.

Tiempo de producción es el tiempo durante el cual el proceso está generando una cantidad de producto medible, incluyendo aquellas actividades incidentales necesarias para mantener el ciclo de producción del proceso.

Tiempo de detención es el tiempo durante el cual no se está desarrollando la función productiva requerida.

- **Detención proceso** es el tiempo durante el cual un ítem no está realizando su función de producción requerida.
- **Detención equipos** es el tiempo en el que un proceso está detenido producto de que un equipo del proceso no se encuentra en estado disponible para operar.

La eficiencia global de los equipos (OEE) es una razón porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de equipos o sistemas industriales. La ventaja es que mide en un único indicador, todos los parámetros fundamentales en la producción industrial: disponibilidad, utilización y rendimiento, para el caso de estudio, el rendimiento será el Factor de Llenado de las correas.

$$OEE = Disponibilidad * Utilizacion\ efectiva * \ Factor\ de\ llenado$$

Siendo estos parámetros definidos de acuerdo a los estándares del TUM:

- **Disponibilidad:** Es una medida de la cantidad de tiempo de detención de los equipos requeridos para mantener al proceso disponible. Se define como el cociente del tiempo disponible y el tiempo requerido.
- **Utilización:** Es una medida con la cual se define el tiempo efectivo de operación de un equipo durante un período determinado.
    - **Utilización global:** Es una medida del uso del tiempo calendario durante el cual ocurre el tiempo de producción. Se define como el cociente entre el tiempo de producción y el tiempo calendario.
    - **Utilización efectiva:** Es una medida de la utilización del tiempo disponible durante el cual ocurre el tiempo de Producción. Se define como el cociente entre el tiempo de producción y el tiempo disponible.
- **Factor de llenado:** El Factor de llenado por su parte es una razón que permite controlar cuanto se aprovecha la capacidad del sistema de correas desde la perspectiva de las líneas críticas al contrastar el tonelaje asignado.

$$Factor\ de\ llenado = \frac{Tonelaje\ alimentado\ en\ un\ periodo}{(Horas * Disponibilidad * Utilización\ efectiva)_{periodo} * TPH\ máximo}$$

1.2.5. Antecedentes del proyecto

En Minera Escondida se ha promulgado la iniciativa "Escondida 3.0", consiste en aumentar la productividad de sus procesos a nivel de benchmark, logrando optimizar los procesos productivos de forma que para el año 2017 ser la mejor compañía minera de cobre del mundo. Como parte de este escenario, la gerencia de Chancado y Correas ha solicitado la Superintendencia de Ingeniería Mina, el estudio de tres planes de acción para mejorar el rendimiento del proceso de envío de material hacia las plantas concentradoras:

- Reentrenamiento de operadores de sala de control.
- Implementación de un sistema de control avanzado o sistema experto para apoyo a los operadores de sala de control.
- Desarrollar un protocolo transversal, para una mejor coordinación y cooperación entre las áreas operativas involucradas en el proceso de alimentación de las plantas concentradoras.

Adicionalmente, en Febrero de este año, se llevó a cabo una prueba de carga sobre el sistema, la cual consistió en coordinar durante toda una jornada un apoyo "In Situ" para el operador de chancado, una línea directa de comunicación con la planta concentradora y con despacho, esta última, de forma de mantener saturado al chancador de camiones. Lográndose finalmente un aumento en la eficiencia global (OEE) a 82%.

1.3. Objetivos

Se demostrara un foco de mejora en la operación del proceso de chancado, su influencia económica con una estimación de clase 5 y se plantearan las bases para soluciones propuestas.

Objetivos específicos:

- Se demostrara la relevancia de la variabilidad en el factor de llenado logrado en la correa para el negocio de Minera Escondida con una estimación de clase 5.
- Se determinara una meta de reducción de variabilidad realizable para la operación para diversas etapas de mejora.
- Se portara en el desarrollo de plan de reentrenamiento de los operadores de los chancadores de acuerdo a los requerimientos planteados por Minera Escondida.
- Se desarrollara una propuesta para protocolo transversal de operación para alimentación de plantas concentradoras. Este protocolo abarcaría todos los procesos productivos, es decir, desde la planificación, tornadura, extracción, chancado, transporte y administración de carga viva en los 3 stockpiles.
- Se estudiara la posibilidad de implementación de un sistema experto de operación de chancadores primarios, con correas multireceptoras.

1.4. Alcance

Se presentara estudio que refleje el beneficio económico de la implementación de las medidas solicitadas, y recomendaciones acorde a cada una para futura implementación.

Se presentaran metas para dos fases de mejora de la variabilidad, pero se limitara a analizar solo la primera fase, quedando la segunda como futura referencia.

Sólo se estudiara la carga transportada por la correa overland CV-102, y por ende el efecto en la PC Laguna Seca. Se reconoce que la implementación de los proyectos afectaran positivamente tanto a los procesos de la PC Los Colorados, la PC OGP1 y al proceso de lixiviación de óxidos, sin embargo se excluyen de los alcances debido a que la PC Los Colorados entrara en remodelamiento y extensión, la PC OGP1 está en proceso de “ramp up”, y la operación del proceso de óxidos difiere de la de sulfuros.

Se analizara el régimen de operación normal. Los quiebres operacionales quedan fuera de este análisis puesto que deben estudiarse de forma diferente y plantearse soluciones diferentes para disminuir su ocurrencia o acortar sus duraciones.

Capítulo II: Identificación de la situación

2.1. Sistema de correas trasportadoras

En minera escondida existen 2 rajos con propiedades de mineral diferentes, 4 chancadores de sulfuros y 3 plantas concentradoras (Los Colorados, Laguna Seca y OGP1) es por esto que lo que se envía a las plantas concentradoras es una mezcla del material, se debe mezclar dureza del mineral entre rajos, leyes, contenido de fierro; todo sin descuidar el tonelaje horario procesado, esto se lleva a cabo gracias a que las correas criticas de transporte son multireceptoras, por lo tanto es en este elemento donde se depositan los materiales de distintas fuentes.

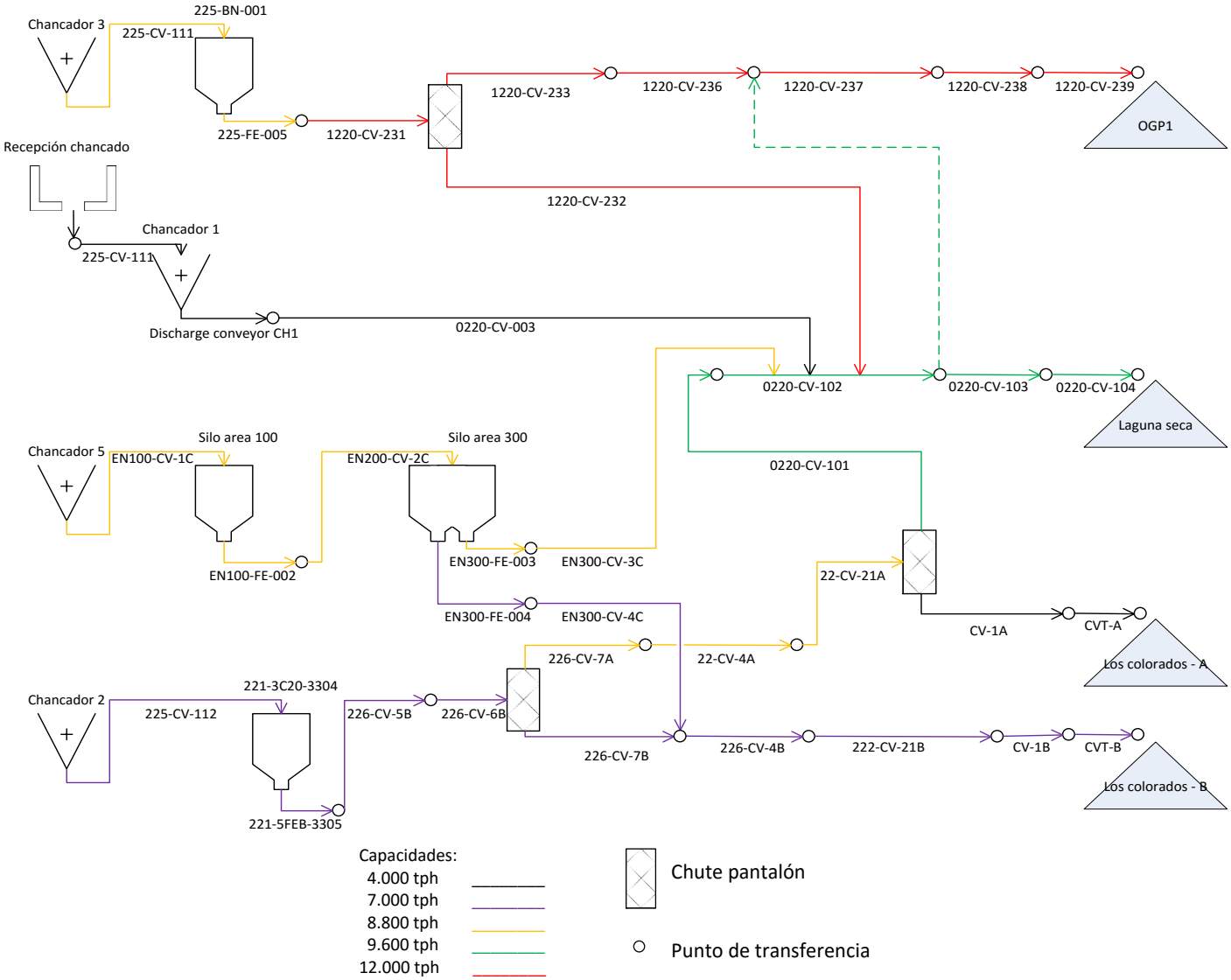


Ilustración 6: Diagrama de arreglo de correas.

La carga enviada por los chancadores es dirigida por medio de un chute pantalón o un silo de traspaso que cuentan con dos feeders para dirigir la carga.

El chute pantalón dirige la carga entre dos destinos de acuerdo la proporción indicada por el operador de la sala de control de chancado basado en la configuración asignada para su turno. Estas proporciones son valores fijos de acuerdo a las posibles posiciones que puede adoptar el chute; tomando como ejemplo el chute pantalón al final de la correa 22-CV-21A, esta posee tres posibles posiciones en las que distribuye 100% a la PC Laguna Seca, 100% a la PC Los Colorados por la línea A, o 58% hacia Pc Laguna Seca y 48% a PC Los Colorados.

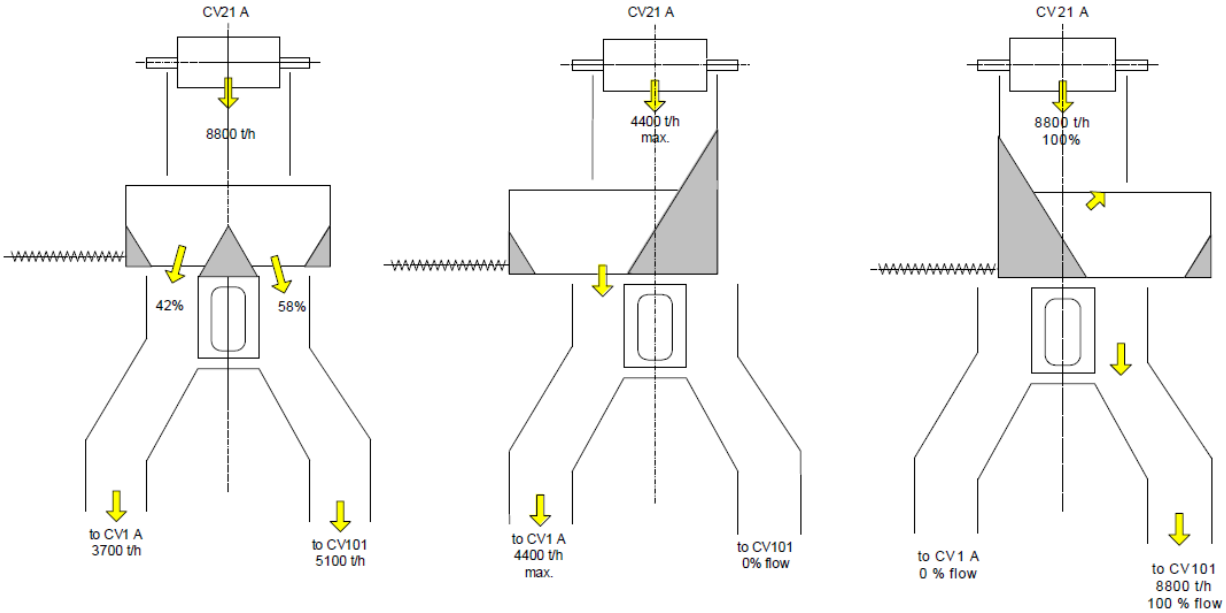


Ilustración 7: Funcionamiento de un chute pantalón [13]

El silo de traspaso, a diferencia del chute pantalón, tiene la capacidad de regular la velocidad con la que alimenta las correas subsiguientes y por lo tanto la proporción de alimentación entre ambos destinos es controlada por el operador en su totalidad, sin tener la limitación de proporciones definidas.

2.2. Situación del operador de sala de control de chancado

Se ha visitado periódicamente a los operadores de sala de control de los distintos turnos para conocer su percepción de la labor, explicación de esta, dificultades recurrentes y oportunidades de mejora desde el punto de vista de quien deberá verse beneficiado por este estudio. A continuación se presentan los hallazgos de dichas visitas.

El operador de la sala de control tiene la responsabilidad de administrar la descarga de camiones hacia el chancador asignado de modo que se pueda cumplir el plan diario de alimentación, el tonelaje es asignado de acuerdo a dicho plan y es informado, ajustado y monitoreado por el supervisor de operación chancado, la coordinación de esta asignación es llevada a menudo por el operador del chancador 5 en conjunto con el supervisor.

El puesto de operador de sala de control de chancado conlleva una serie de responsabilidades anexas que complementan la operación. Pero en algunos casos son posibles de automatizar o reasignar, ya que cada labor adicional que deba realizar el operador será una distracción para su objetivo principal y producirá un efecto en la eficiencia general del sistema (OEE).

- <u>Esperas de camiones</u>

  Cuando no se haya un camión en chancado para descargar, este solo posee unos minutos de autonomía dependiendo de la acumulación en el silo de traspaso, este margen de tiempo no es mucho debido a que la función del silo es transformar el flujo de mineral de un proceso por lotes a uno continuo. Ante esta situación el operador solo puede dar el aviso a despacho para remediar la situación.

- <u>Movimiento carro tripper</u>

  El carro tripper, como elemento que distribuye el flujo de carga formando el stockpile, debe ser desplazado para aprovechar todo el espacio asignado para el acopio de mineral chancado, las posiciones a las cuales se desplaza son decididas en base a las mediciones del nivel de la pila en determinados puntos y es ejecutado por el operador de chancado desde la sala de control.

  Esta acción impide al operador estar a al tanto del sistema de correas y la descarga de camiones ya que debe estar atento a que el carro no se desplace más allá de la posición asignada ni cause atollos.

- <u>Registro de información e ingreso de esta al sistema</u>

  Al final del turno el operador debe ingresar manualmente toda información respecto a detenciones y esperas de camiones a una planilla específica. Esta última información es recopilada de forma manual durante el día y por lo tanto carece de la precisión de un sistema automatizado para su registro.

- <u>Utilización de picarocas</u>

  Ante la presencia de bolones, el operador requiere operar el picarocas para despejar la boca del chancador, esta operación puede tardar de 1 a varios minutos, tiempo en el cual no se pueden descargar camiones ni estar pendiente de la situación en las correas.

- <u>Control de accesos a área</u>

  El operador de la sala de control de chancado es el responsable de dar accesos no solo a su cabina, sino a toda el área en la que está asignado, esto por un lado distrae al operador de su labor y por otro lado le asigna al operador una responsabilidad a la que puede no tener el conocimiento necesario para permitir accesos, puesto que las áreas cambian constantemente y el operador no sale a terreno.

2.3. Fallas comunes del proceso

Para el análisis se presenta a continuación por medio de un gráfico de Pareto las fallas más relevantes que influyen en el régimen de operación normal y que aumentan en la variabilidad obtenida en la operación.

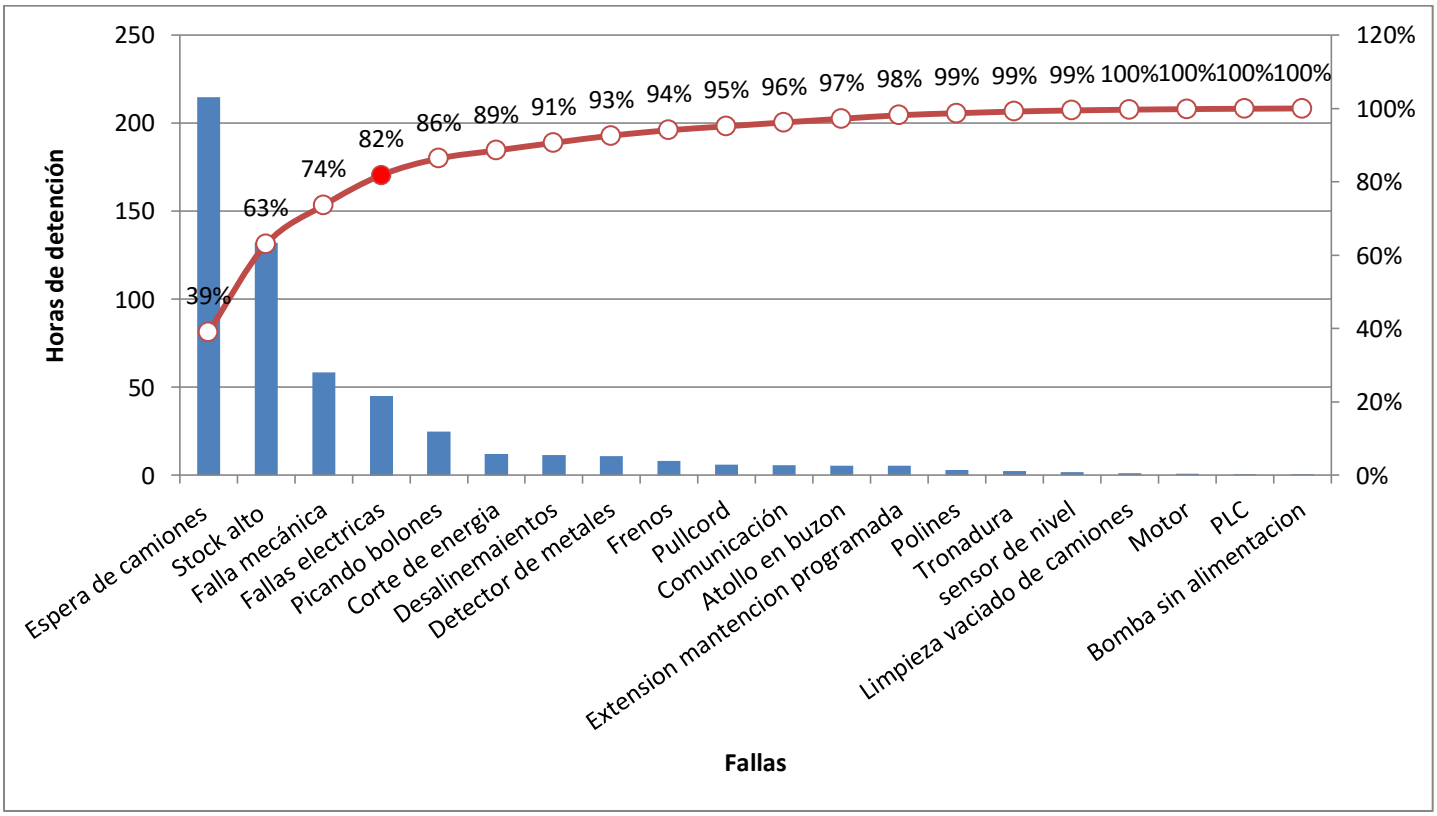


Ilustración 8: Pareto de las fallas más influyentes durante Junio según tiempo de detención implicado.

Lo primero que se debe destacar es que entre las detenciones por espera de camiones, por stock alto, fallas mecánicas y fallas eléctricas, son los problemas vitales de esta sección del proceso, principalmente la espera de camiones.

2.4. Justificación

Se estudian los registros, hora a hora, de los últimos seis meses del pesómetro de la línea overland hacia la PC Laguna Seca, Nivel medio del stockpile de Laguna Seca (promedio entre 4 sensores censando el stockpile), y consumo de mineral en stockpile de PC Laguna Seca; con el fin de evaluar la oportunidad de producción adicional en la PC Laguna Seca, para este objetivo fue necesario filtrar toda información que fuese afectada por periodos de mantención en los elementos incidentes en la alimentación del stockpile (chancadores y correas).

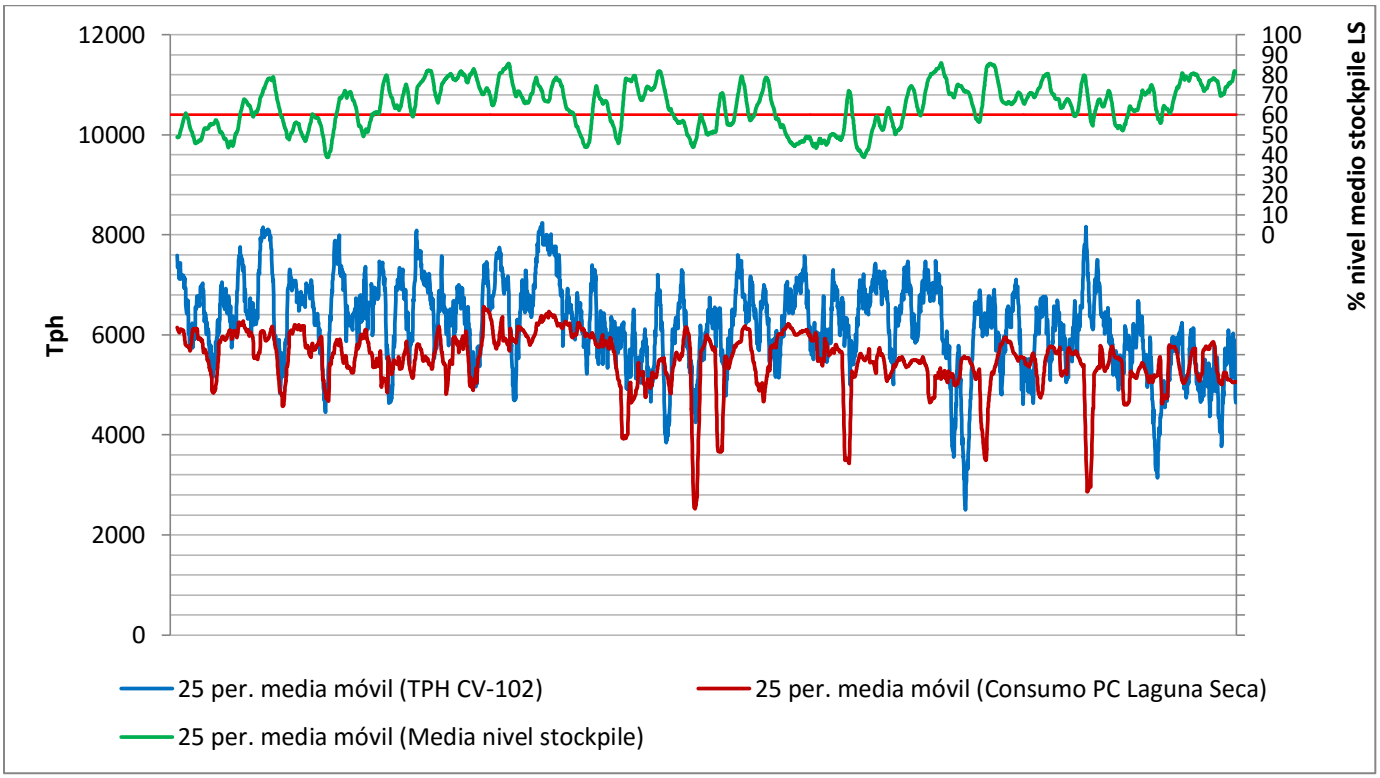


Ilustración 9: Registro de últimos seis meses en proceso productivo de PC Laguna Seca

El nivel de stockpile al sobrepasar el 60% implica el nivel de autonomía que tiene la PC, y dependiendo cuanto baje determinara el nivel de consumo de la PC, siempre que esta no presente desperfectos.

Tabla 3: Consumo planta concentradora en función del nivel de stockpile

Nivel de stockpile	Consumo PC [tph]
$x \leq 30\%$	0
$30\% \leq x < 40\%$	4000
$40\% \leq x < 50\%$	5000
$50\% \leq x < 60\%$	6000

La ilustración 9 representa el comportamiento como media móvil de 25 datos para una mejor concepción del comportamiento y relación entre registros, consiguiéndose así distinguir distintos comportamientos ajenos a la operación esperada, como disminución de consumo en PC por bajo nivel de stockpile, aumento del nivel de stockpile por bajo consumo de PC, entre otros. Analizando esta última situación, en la cual la PC no consume su flujo optimo a cusa de bajo nivel, debido a las fallas que experimenta chancado y correas; se determina que el consumo baja de las 6000 [tph] el 71,00% de las ocasiones, siendo el 23,87% debido al bajo nivel de stockpile; teniendo en consideración las restricciones al consumo descritas en la tabla 3, esto se traduce en una ventana de oportunidad en promedio de 73.000 [tph] adicionales por mes.

Respecto del nivel del stockpile, se obtiene su función de distribución acumulativa empírica y teórica, esta última aproximada mediante una distribución Weibull, con lo que se proyecta que en su situación actual, hay un 38,02% de probabilidad de que el nivel de stockpile se encuentre bajo 60%, y solo un 12,70% de esta sobre su óptimo de 80%.

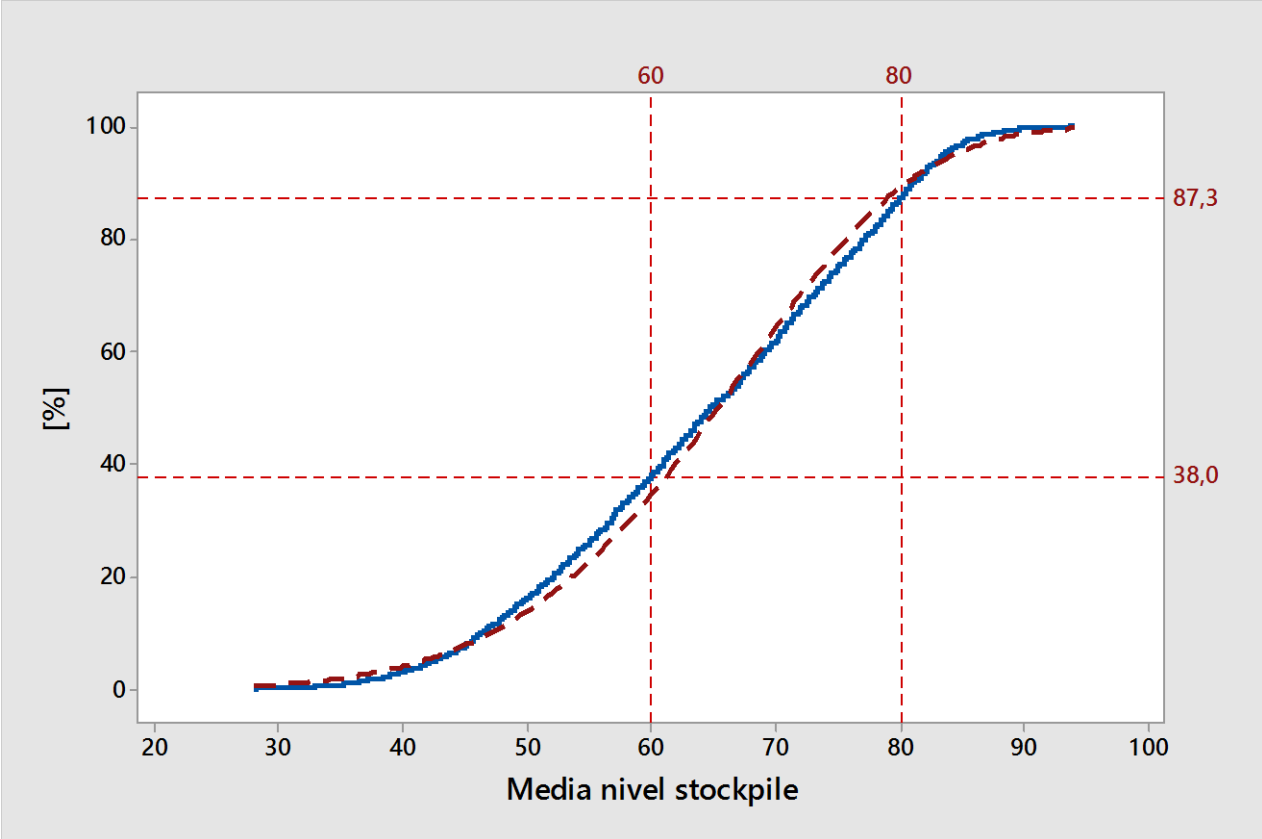


Ilustración 10: Función de distribución acumulativa para nivel de stockpile, empírica (línea azul continua) y teórica (línea roja segmentada)

2.5. Registros de carga

Se recopilan los registros del "tonelaje por hora" de todo el mes de Junio en intervalos de 1 minuto, procedentes del pesómetro de la correa overland 0220-CV-102 (ver anexo A-1). Se utiliza el mes

de Junio por ser el último mes del año fiscal y por ende la operación funciona de forma más regular, por lo tanto se compara con los registros completos del año sin influencia de outliers para comprobar la representatividad (ver anexo A-2). Ya que el análisis pretendido se basa en la variabilidad de la carga sobre la correa, se acepta Junio como mes representativo por tener una desviación estándar y asimetría similar.

Al realizar una gráfica de cajón para cada día, se aprecia que la data del mes de Junio demuestra una gran variabilidad en el desarrollo del turno, y un comportamiento inestable al analizar la concentración de los registros.

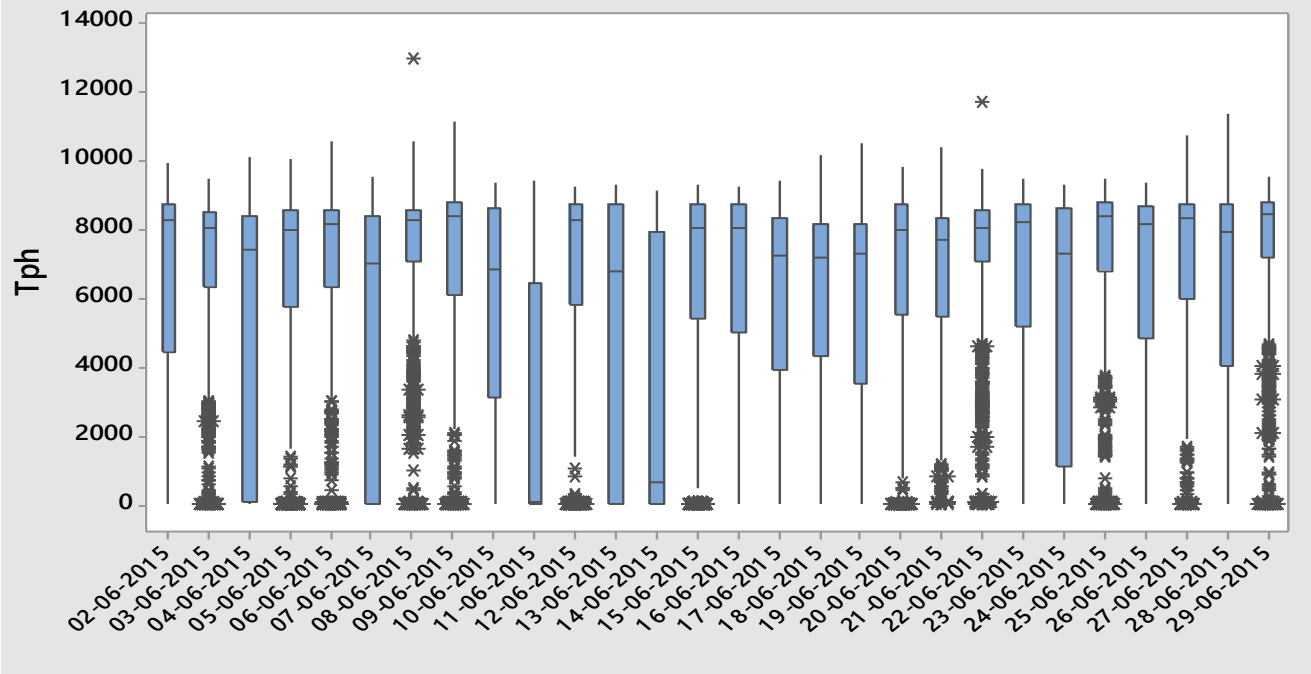


Ilustración 11: Concentración de los datos por día

Debido a los requerimientos del proceso se determina que la carga enviada por la correa transportadora debe mantenerse entre los 8000 [tph] y las 9000 [tph], estableciéndose un target de 8500 [tph].

Capítulo III: Propuestas de mejora

3.1. Reentrenamiento operadores de sala de control de chancado

El reentrenamiento consta de enseñar a aquellos operadores que saben y tienen experiencia en la operación, pero a distintos niveles de experiencia, las sutilezas que normalmente se aprenden con prolongadas estancias en el cargo, y por otro lado con el conocimiento de los detalles de la labor del proceso aguas arriba o bien aguas abajo.

Se ha empezado por desarrollar un programa de reentrenamiento basado en tres focos principales:

- Planificación y desarrollo del reentrenamiento, que es actualmente responsabilidad de los supervisores de operación chancado, y el desarrollo será llevado en conjunto con los instructores de operación propios de Minera Escondida, con el apoyo de quien suscribe. Entre los apoyos entregados destacan.
- Confección de un manual guía que incluya mejoras de rápida implementación.
- Apoyo de RRHH para mantener una comunicación clara entre operadores, supervisores.

3.2. Implementación sistema experto

Un sistema experto o sistema de control avanzado es un programa de la inteligencia artificial que está especialmente diseñado para representar la "Experiencia Humana" en un dominio particular basándose en datos históricos y reglas prácticas, funcionando como un operador especialista que hace inferencias y en base a estas decide o aconseja, pero no es capaz de reemplazar al operador.

Los sistemas experto se encuentran en el curto escalos de la pirámide de automatización, esto significa que para implementarse se requiere primero instrumentación que permita monitorear en tiempo real la situación en los equipos, después se requiere de PLCs para actuar sobre dichos equipos, luego estos PLCs son dirigidos por un sistema de control distribuido (DCS) y sobre este actúa el sistema experto.

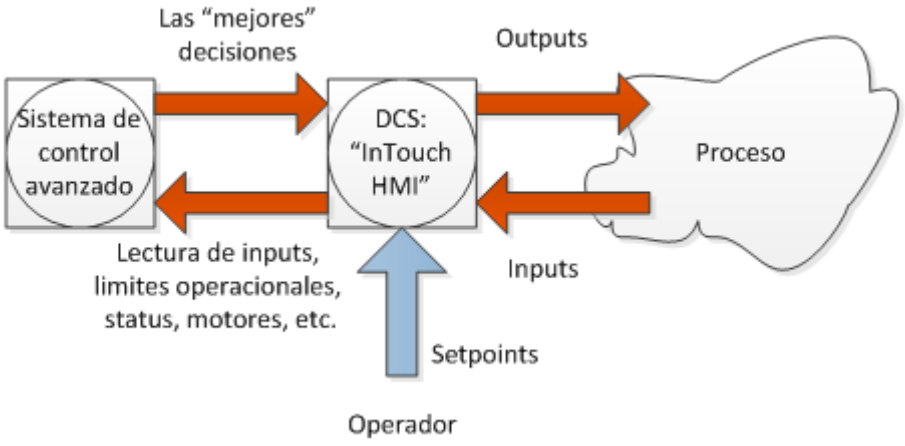


Ilustración 12: Diagrama de sistema de control avanzado

En el caso de Minera Escondida, el sistema de control que actúa sobre el arreglo de chancadores y correas se basa en PLCs comunicados principalmente por la red de control de procesos (PCN). La supervisión del proceso a cargo de software "RSLogix" que trabaja bajo una modalidad (NAD) que permite a cada estación contar con la misma información y existe un segundo servidor con el software "Industrial SQL server", el cual está a cargo de almacenar los registros de los datos (historizador) a través de las estaciones de operación por medio de un adquisidor de datos (DAS).

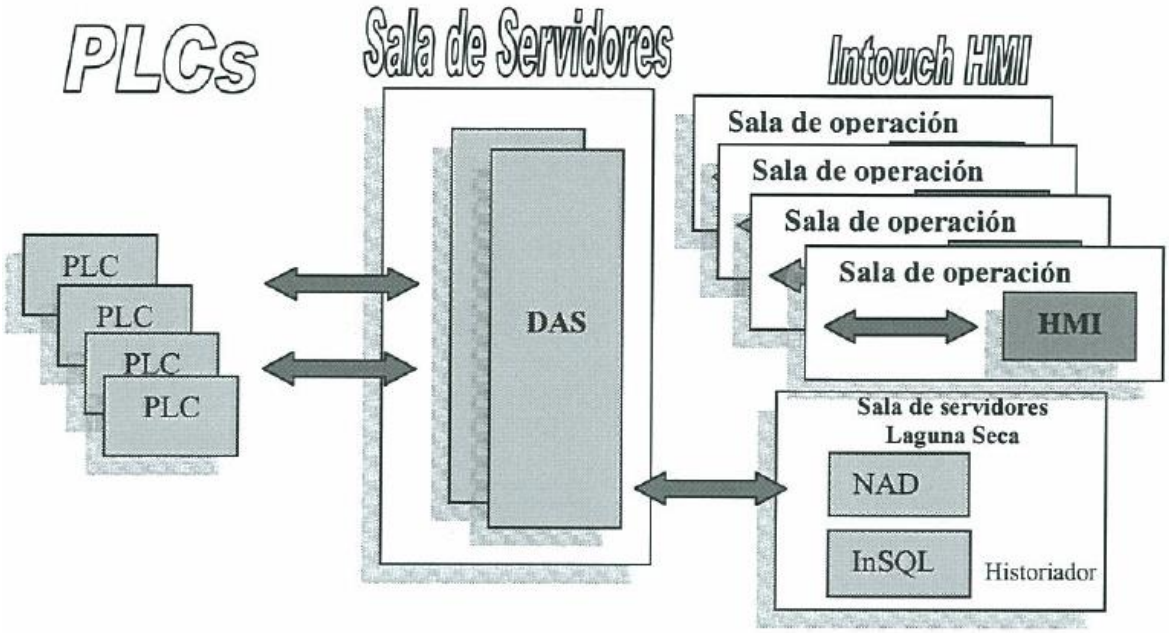


Ilustración 13: Diagrama del sistema de control actual en chancadores y correas [13]

Como parte del levantamiento para la implementación de un sistema experto se presentan las siguientes proposiciones para la operación de un sistema experto.

Considerando que los siguientes parámetros no son manipulables:

- Altura del poste del chancador, responsable de la granulometría de salida
- Velocidad de correas transportadoras, estas operan a una velocidad fija que viene por diseño, no así los feeders o alimentadores

Fuentes de información:

- Asignación de tonelaje (Planificación).
- Disponibilidad de camiones (Operaciones Mina - Despacho).
- Disponibilidad chancadores (Mantenimiento).
- Granulometría de entrada.
- Sensores de llenado en los silos.

- Sensores de tonelaje en las correas.
- Sensores de nivel de stock pile.

Parámetros Monitoreados (outputs):

- Tonelaje en correas y factor de llenado.
- Tiempo de residencia.

Parámetros Controlados (setpoints):

- Velocidad de los feeders.
- Configuración tonelaje.
- Frecuencia de descarga de camiones.

Para el presente trabajo se han definido las bases técnicas para el proceso de licitación y el trabajo desarrollado en este documento servirá para la redacción del caso de negocio.

A la fecha se ha entrado en conversación con dos empresas para presentar propuestas a la superintendencia de Ingeniería Mina.

3.3. Protocolo Transversal

Un protocolo transversal es un documento que pretende sembrar las bases sobre las cuales interactuaran las distintas áreas para que la colaboración sea obligatoria.

Actualmente se ha confeccionada una propuesta de protocolo cuyo foco principal es atender la necesidad de comunicación efectiva entre las áreas y determinación de objetivos en común medidos por medio de nuevos KPIs que se verán afectados por la labor conjunta.

Este ha sido revisado a la fecha por personal de la Superintendencia de Ingeniería Mina, estando pendiente el proceso de retroalimentación de las áreas involucradas como son Planificación, Chancado & Correas, Despacho y Plantas concentradoras.

Capítulo IV: Análisis estadístico

4.1. Muestreo

Este volumen de información conlleva mucho “ruido” e información no relevante para el caso de estudio, primero que todo se desea analizar el régimen normal de operación, por lo que se requiere excluir el tiempo que se dedica a mantenciones, detenciones programadas y detenciones producto del clima, además se debe excluir los quiebres operacionales típicos y que son propios de la operación como los cambios de turno y colaciones; por todo esto se propone el siguiente muestreo.

Se busca un horario en el cual se pueda esperar una operación sin quiebres operacionales, tanto para el turno de día como para el turno de noche. Por ejemplo, si se analiza un día regular del mes, se pueden distinguir los quiebres operacionales inevitables y la variabilidad durante la operación, al considerar cada día del mes de Junio de la misma manera, se puede apreciar la tendencia de la

operación, y de esta forma se analiza su media y mediana para apreciar en que intervalos se puede esperar un régimen normal de operación (Ver anexo A-3).

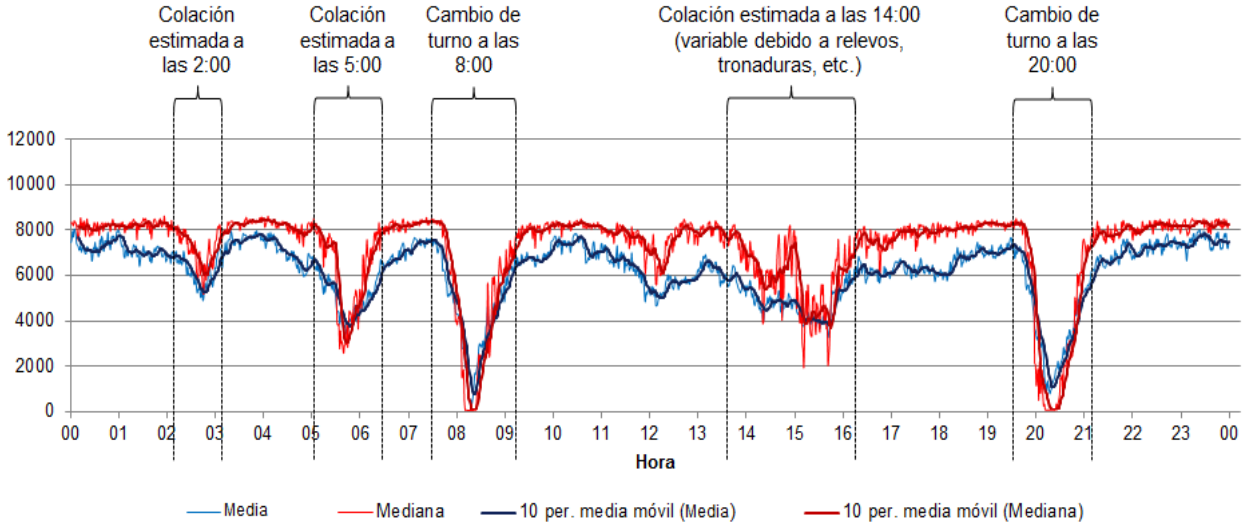


Ilustración 14: Tendencia de Media y Mediana de todos los días de Junio

De esta tendencia se escoge para el turno día un intervalo que comprende el horario desde las 16:30 hrs. hasta las 19:30 hrs., y para el turno noche un intervalo desde las 22:00 hrs. hasta las 01:00 hrs.

Esta selección será representativa de 13 de las horas diarias, según se aprecia en la ilustración 14, representando el 61,09% de la producción del mes.

De esta forma se selecciona el muestreo para el régimen de operación normal, pero para eliminar la influencia de las detenciones programadas se identifican los puntos donde el pesómetro indica que no hay carga, este registro no forma parte de la influencia de espera de camiones o fallas puesto que aquí se ve la influencia indivisible de los 4 chancadores en tiempo real, es decir, las únicas razones para que simultáneamente no operen los 4 chancadores en este horario es que se haya programado de esa forma por mantenimientos o por motivos de seguridad.

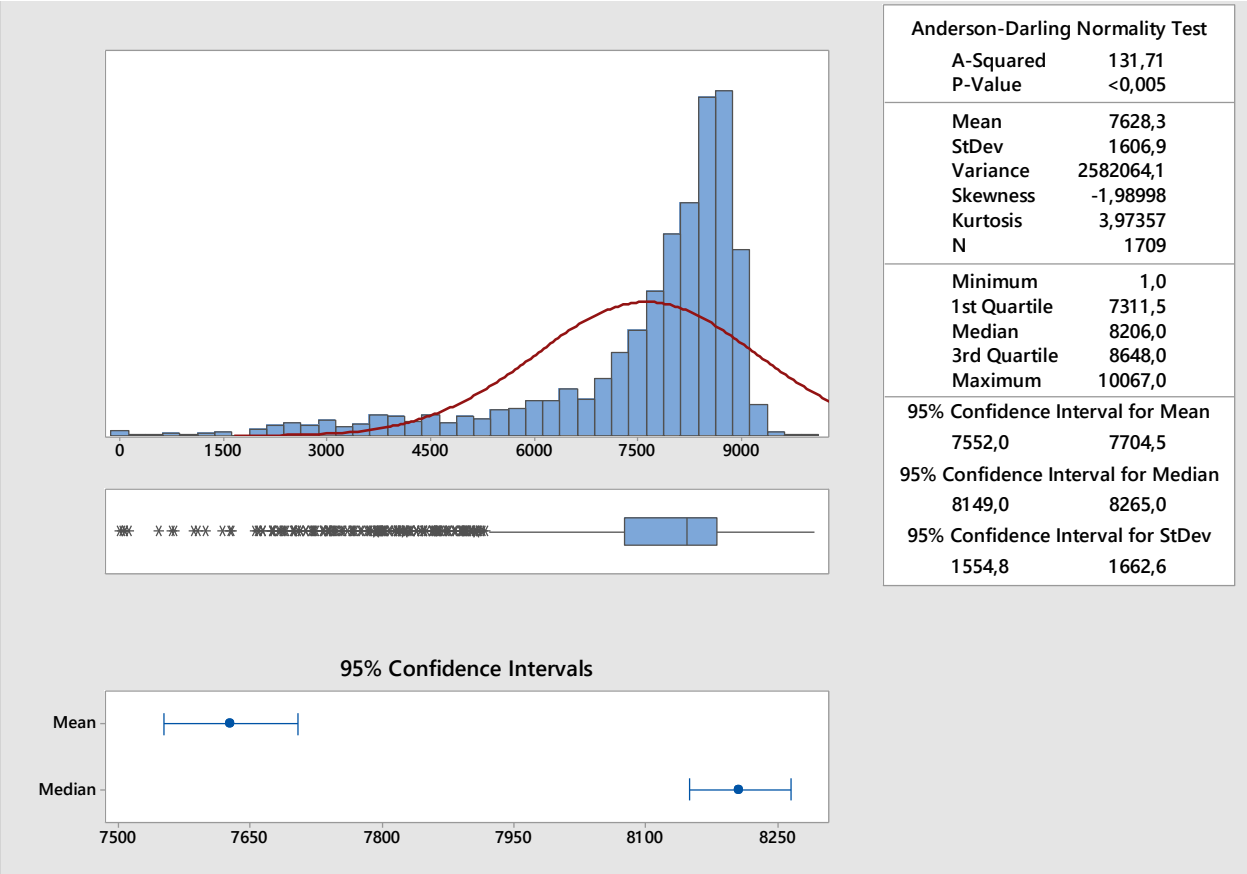


Ilustración 15: Gráfico resumen del muestreo obtenido

Del histograma obtenido se aprecia en primera instancia, la asimetría de los datos con su tendencia hacia el tonelaje objetivo entre los 8000 y 9000 tph. Además, debido al elevado valor del índice de Anderson-Darling y un valor "P" menor a 0,005; se afirma que no se puede considerar una distribución normal como aproximación al comportamiento de este proceso.

4.2. Meta objetivo

Para fijar un objetivo respecto de la variabilidad que sea realizable por el personal y los equipos de MEL, se hace uso de la misma data histórica y se busca un intervalo de logro, en el cual durante un tiempo prudente se pudo mantener una operación "deseable".

Para la determinación de la duración de este intervalo se analiza la desviación estándar móvil de 1, 2, 3 y 4 horas continuadas sin la eliminación de outliers, pero si excluyendo los quiebres operacionales prolongados y su influencia.

A continuación se busca determinar una meta de desviación estándar para estabilizar el proceso y reducir la varianza al acotar los niveles de carga dentro de los límites que se consideren adecuados; y luego proponer una meta para una etapa posterior en la cual se deberá centrar los esfuerzos en mejorar el capacidad del proceso al reducir la separación entre los limites estadísticos que se fijen para el proceso. Cabe destacar que el análisis de capacidad realizado a continuación es preliminar y no se normaliza y ni estandariza los datos, se usa una aproximación a la distribución Weibull.

4.2.1. Primera etapa

Para una primera etapa, analizando estos resultados se aprecia que en 4 horas es lo suficientemente representativo ya que el mínimo valor logrado de 551,76 es casi un tercio de la desviación estándar de la muestra seleccionada en el punto 4.1 - "Muestreo" (Desviación estándar: 1606,9).

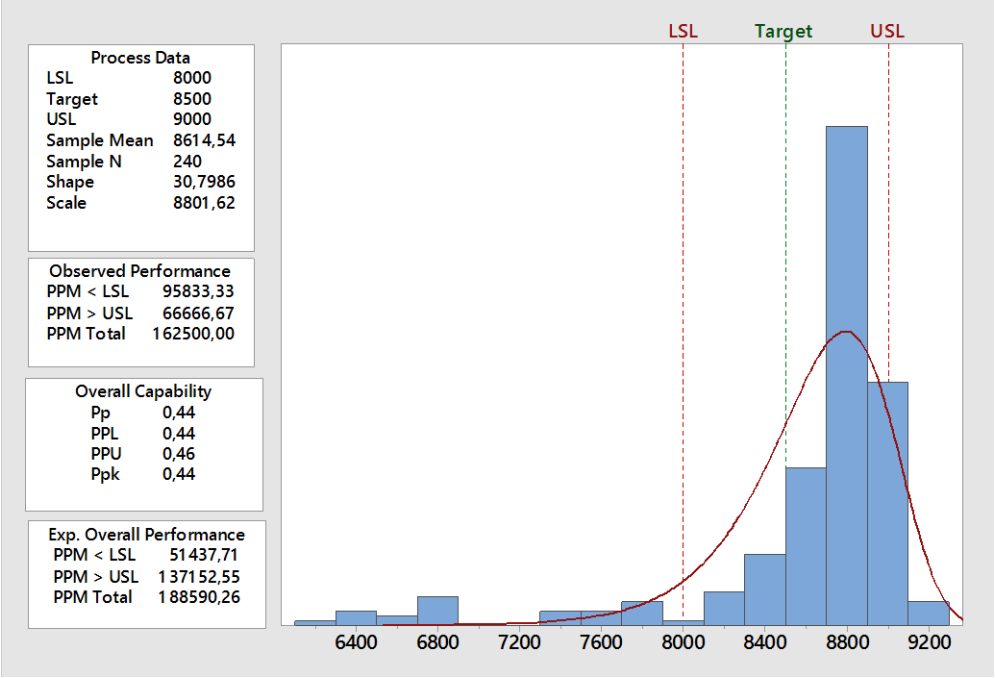


Ilustración 16: Análisis de capacidad preliminar del intervalo seleccionado

Se realiza un análisis de capacidad para tener un parámetro de comparación más adelante respecto de los índices de capacidad. Esta será la referencia para el resto de este análisis.

4.2.2. Segunda etapa

Como se aprecia en la ilustración 17, el valor del parámetro P_{pk} es menor a 1,33 con lo que se considera en la industria que el proceso tiene una alta probabilidad de obtener valores menores al "target" o valor objetivo. Esto se debe a que la primera etapa busca estabilizar el proceso.

En esta segunda etapa se buscara confinar los datos dentro de los valores límites fijados, por lo que se utilizara como meta el resultado obtenido para la desviación estándar móvil de 2 horas (155,63), ya que esta se presenta más exigente y las fallas por millón (PPM) se muestran considerablemente menores.

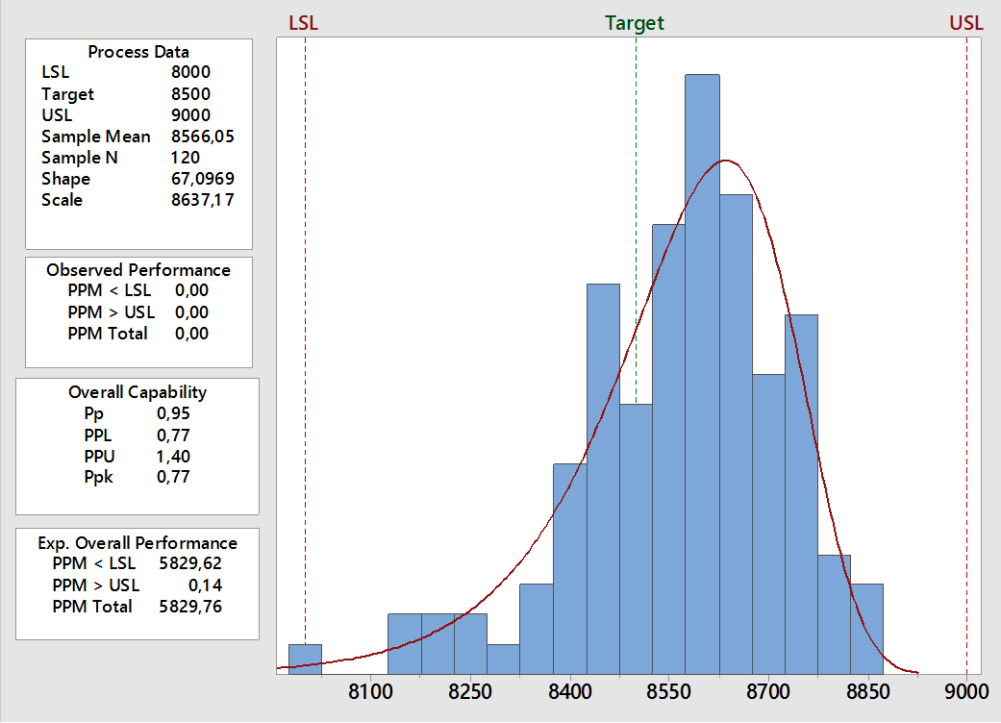


Ilustración 17: Análisis de capacidad preliminar para futura referencia en etapas posteriores

4.3. Análisis y manejo de la data

4.3.1. Identificación de distribución

Ya que se comprueba con el índice de Anderson-Darling y el valor P que la data se trata de datos no normales, se busca entre las distribuciones conocidas alguna que posea un buena bondad de ajuste. Se muestra a continuación los resultados más cercanos en contraste con la distribución normal.

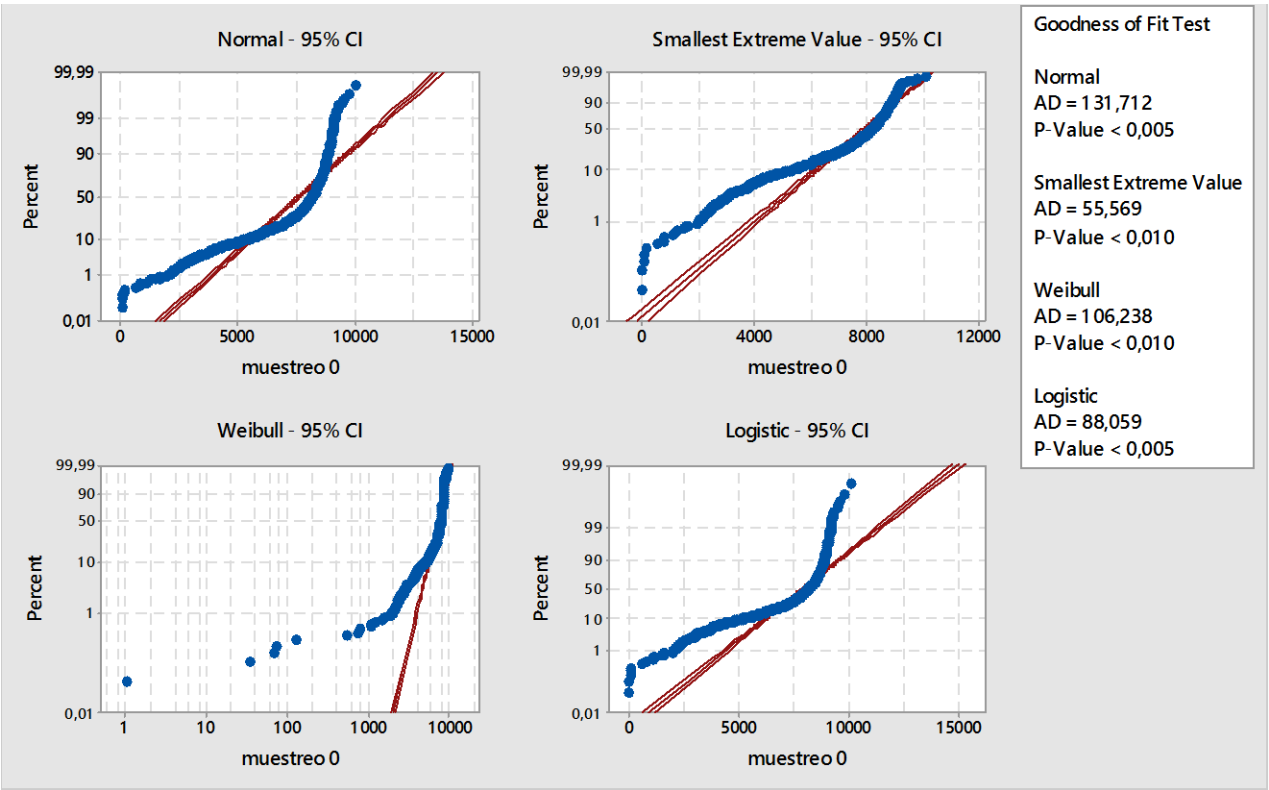


Ilustración 18: Bondades de ajuste de las 3 distribuciones más cercanas a la representación de la data

Como se puede apreciar, ninguna de estas curvas posee una buena bondad de ajuste que indique coincidente la representación del muestreo, por lo que se debe comprobar si es aplicable alguna técnica de corrección o ajuste de la información.

4.3.1.1. Aplicación de ajustes/correcciones

De acuerdo al primer acercamiento planteado, se trata de normalizar los datos del muestreo, pero no se pudo conseguir el efecto deseado de normalización. En detalle, los resultados fueron los siguientes:

- <u>Segregación de outliers</u>

  Para este desarrollo se aprovechara la identificación disponible de los registros para identificar que valores corresponden ser excepciones y se corroborara con el histograma ya que al tener una tendencia no normal, las pruebas conocidas no son aplicables.

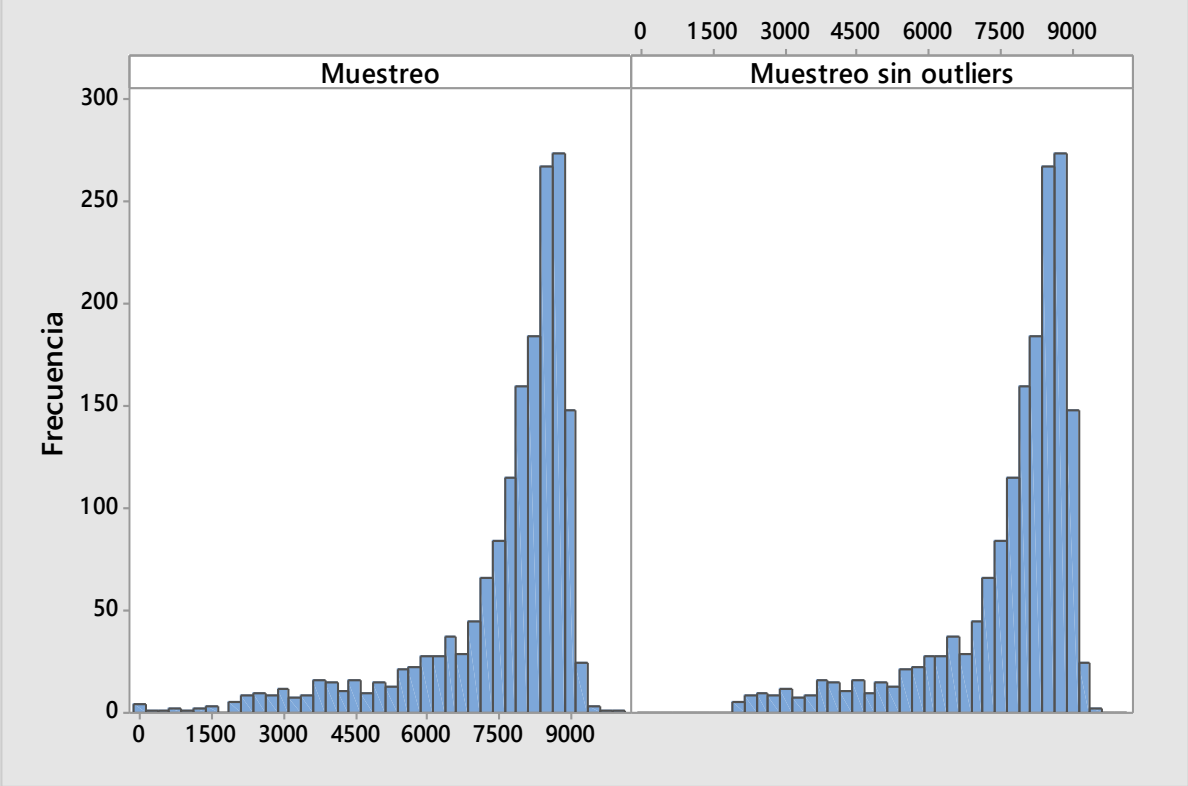


Ilustración 19: Izquierda: Histograma muestreo original. Derecha: Histograma tras identificación y eliminación de outliers

Finalmente se busca la distribución que más se ajuste al conjunto de datos, pero ninguno demostró tener una bondad de ajuste aceptable.

- <u>Transformada de Box-Cox</u>

Primero se analiza si el conjunto de datos es capaz de converger aun mínimo valor de desviación estándar al ser transformado en función del "poder de transformación" (λ).

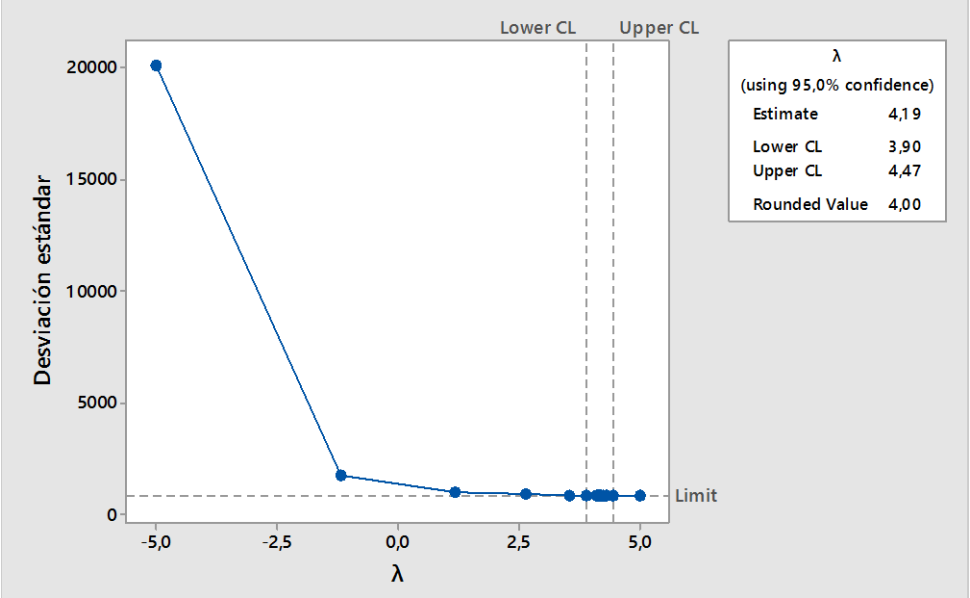


Ilustración 20: Tendencia de desviación estándar en función del poder de transformación λ

Ya que existe un valor de lambda tal que se produce un mínimo valor de desviación estándar, se procede a evaluar la transformación obtenida.

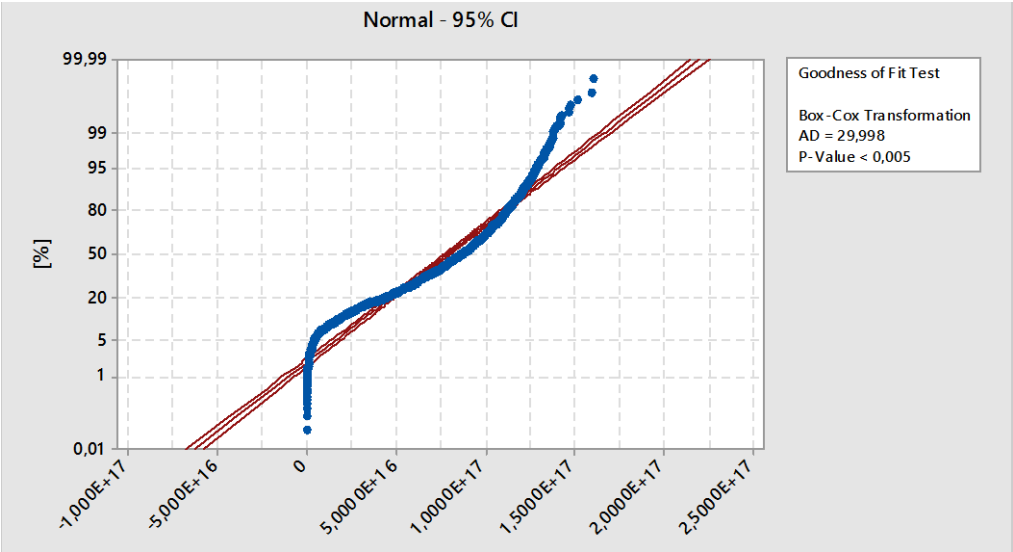


Ilustración 21: Resultado de análisis de bondad de ajuste tras la transformación de Box-Cox con λ=4,34

Como se indica que el valor p es menor a 0,005 se interpreta que no hay normalidad y, por el índice de A-D, que la distribución normal no se ajusta a los datos. Por lo tanto, se rechaza esta transfomacion.

- <u>Transformada de Johnson</u>

  Se busca con la ayuda del software la transformada de Johnson que obtenga el mejor ajuste a una distribución normal.

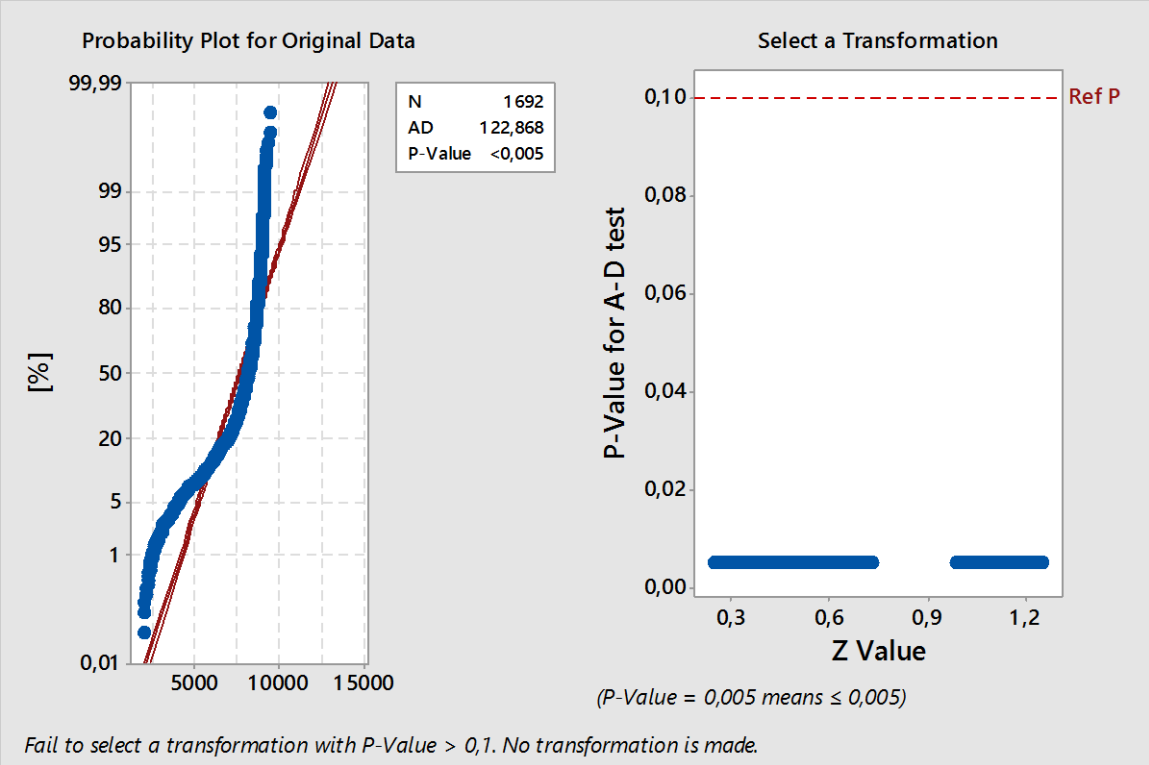


Ilustración 22: Resultado de búsqueda de transformada de Johnson

El resultado demuestra una falla al no poder encontrar una transformación que logre un valor p mayor 0,1.

- <u>Tratamiento de modas múltiples</u>

  Se analiza el histograma logrado tras la prueba de Dixon y se separan las tendencias para ser analizadas por separado.

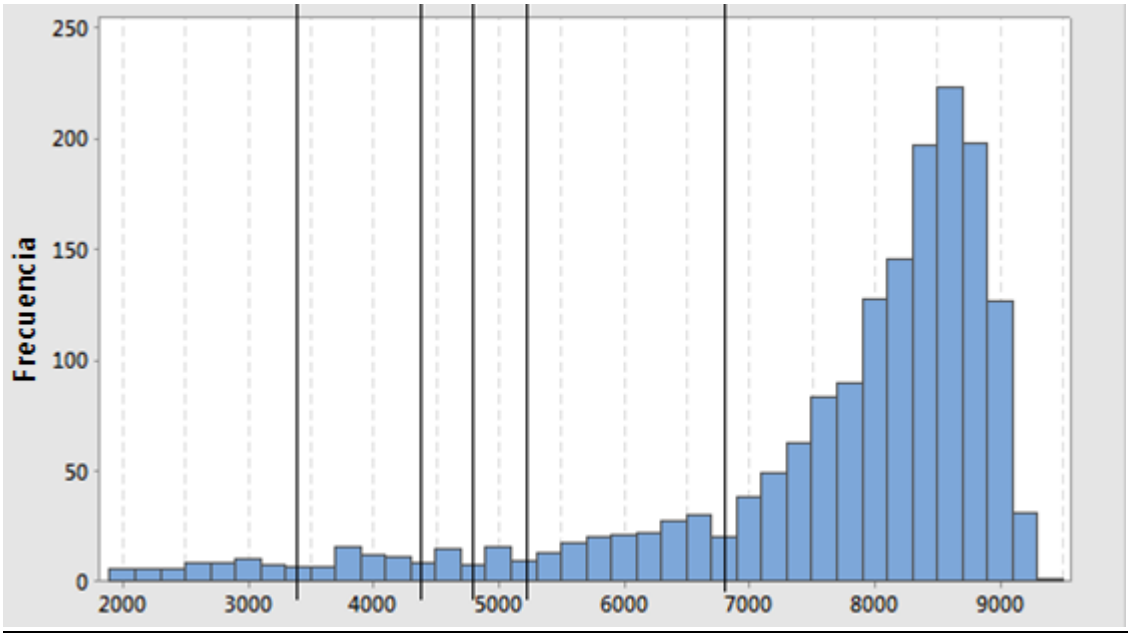


Ilustración 23: Separación de tendencias modales en el conjunto de datos

Se separa la información en subconjuntos delimitados en primera instancia a un valor arbitrario que pueda reflejar la separación de las tendencias y luego es corregido hasta apreciar una distribución aceptable.

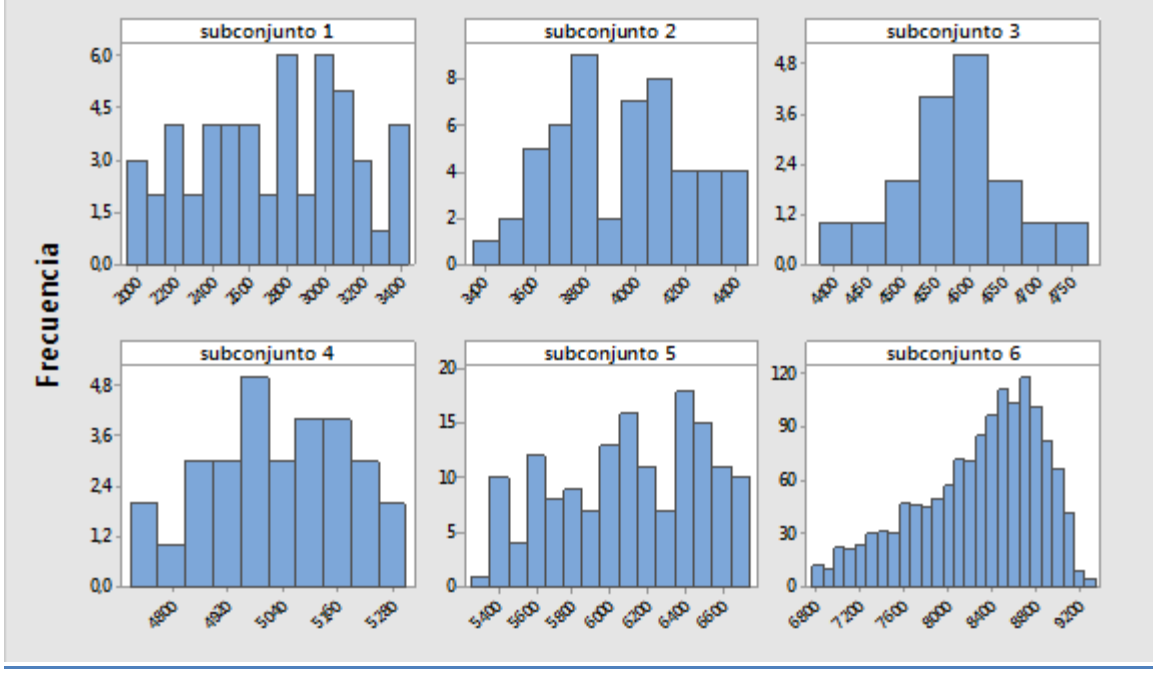


Ilustración 24: Separación lograda del conjunto de datos

Al analizar cada subconjunto obtenido se aprueba o rechaza basados en el índice de Anderson-Darling (A-D) y valor p, obteniéndose el siguiente resultado.

Tabla 4: Resultados del análisis por subconjunto

Subconjunto	Valor p	A-D	¿Se acepta el ajuste?	¿Acepta transformación?
1	0,172	0,526	Acepta	N/A
2	0,271	0,446	Acepta	N/A
3	0,889	0,187	Acepta	N/A
4	0,833	0,215	Acepta	N/A
5	<0,005	1944	Rechaza	Johnson
6	<0,005	20003	Rechaza	Rechaza

4.3.1.2. Conclusión de tendencias y no normalidad

Debido a los efectos de la operación que producen la data, la tendencia siempre va a ser a alcanzar un tonelaje objetivo o "target" en la correa, pero siempre dejando un margen del límite superior para mantener el control del proceso, esto explica la concentración de los datos hacia el intervalo entre 8000 y 9000 tph.

Respecto a los datos fuera del rango objetivo, cabe diferenciarlos de los outliers ya que hay una razón detrás de su ocurrencia. La línea overland al ser multireceptora se alimenta de 4 fuentes, y cada una de estas fuentes tiene sus propias capacidades de producción y se les asignan tonelajes basados en estas cualidades, vale decir, el si chancador 5 teniendo una capacidad de procesar 8800 tph de mineral puede que asigne solo 5000 tph de este mineral a la correa overland en cuestión,

siendo el chancador 2 quien completara el tonelaje faltante para llenar la correa, pero si alguno de los dos falla, el tonelaje cae a un valor definido y el tiempo de reacción ante el imprevisto puede tardar desde 10 minutos hasta 1 hora o más, y si tomamos en consideración el tiempo que se detiene chancado por falta de camiones, se explica que se marcan de forma leve tendencias fuera del rango normal de alimentación.

Debido a los resultados obtenidos, se rechaza el tratamiento por modas múltiples, ya que el subconjunto 6 no se logró normalizar y es este el que concentra el mayor volumen de información al presentar los valores objetivos de tonelaje.

Debido a estos resultados se decide que se debe hacer dos análisis, uno específico en el cual se segregue la data de acuerdo a criterios relevantes por medio de combinaciones de los métodos mencionados para identificar los momentos más vulnerables de la operación; y un análisis general de la data en el cual se pueda evaluar desde una perspectiva global la capacidad del proceso y en paralelo estimar el beneficio económico esperable.

4.3.2. Análisis específico

Se plantean las siguientes subdivisiones en el muestreo para distinguir características de influencia en el desempeño logrado:

- Separación por turnos

  Se apreciara la diferencia que se genera entre los equipos de personas trabajando en una misma función.

- Separación por operación día o noche

  Se apreciara la diferencia que se genera entre el comportamiento que tiene un operador trabajando de día contra su comportamiento en turno de noche.

- Separación por operación en horario administrativo o no administrativo

  Se apreciara la diferencia que se genera con la presencia de los jefes administrativos en faena, contra su ausencia durante el descanso de estos. (Operadores trabajan en turnos de 7x7 comenzando el miércoles, mientras que los cargos administrativos tienen turnos de 4x3 comenzando el lunes).

Estas características y sus interacciones deberán ser comprobadas como significativas por medio de un análisis de varianza.

4.3.2.1. ANOVA

Se realiza un análisis de varianza de 3 vías con un “α” de 0,05; definiendo como “Turno” a los equipos de personas, “Jornada” a la diferenciación de operación de día o de noche, y Horario al horario administrativo; obteniéndose el siguiente resultado:

Tabla 5: Resultado ANOVA

Factor	DF	SS	MS	F	P
Turno	3	66446726	22148909	8,88	0,000
Jornada	1	26233014	26233014	10,52	0,001
Horario	1	49003087	49003087	19,65	0,000
Turno*Jornada	3	4729061	1576354	0,63	0,594
Turno*Horario	3	13798589	4599530	1,84	0,137
Jornada*Horario	1	155160	155160	0,06	0,803
Turno*Jornada*Horario	3	23146096	7715365	3,09	0,026
Error	1693	4221676360	2493607		
Total	1708	4410165400			

De este resultado se deprende que los factores relevantes son Turno, Jornada, Horario y la interacción entre los tres factores ya que el valor p es menor al nivel de significancia utilizado.

4.3.2.2. Eliminación de "ruido" en el muestreo

4.3.2.2.1. Separación por turnos

Se diferencias 2 equipos de personas que operan en turnos de 7x7 y estos se dividen la operación día y noche de forma intercalada, con lo cual se cuenta con 4 turnos de trabajo. Estos turnos poseen distintas experiencias y habilidades, se distinguen sus labores para apreciar las distinciones que esto causa en la operación.

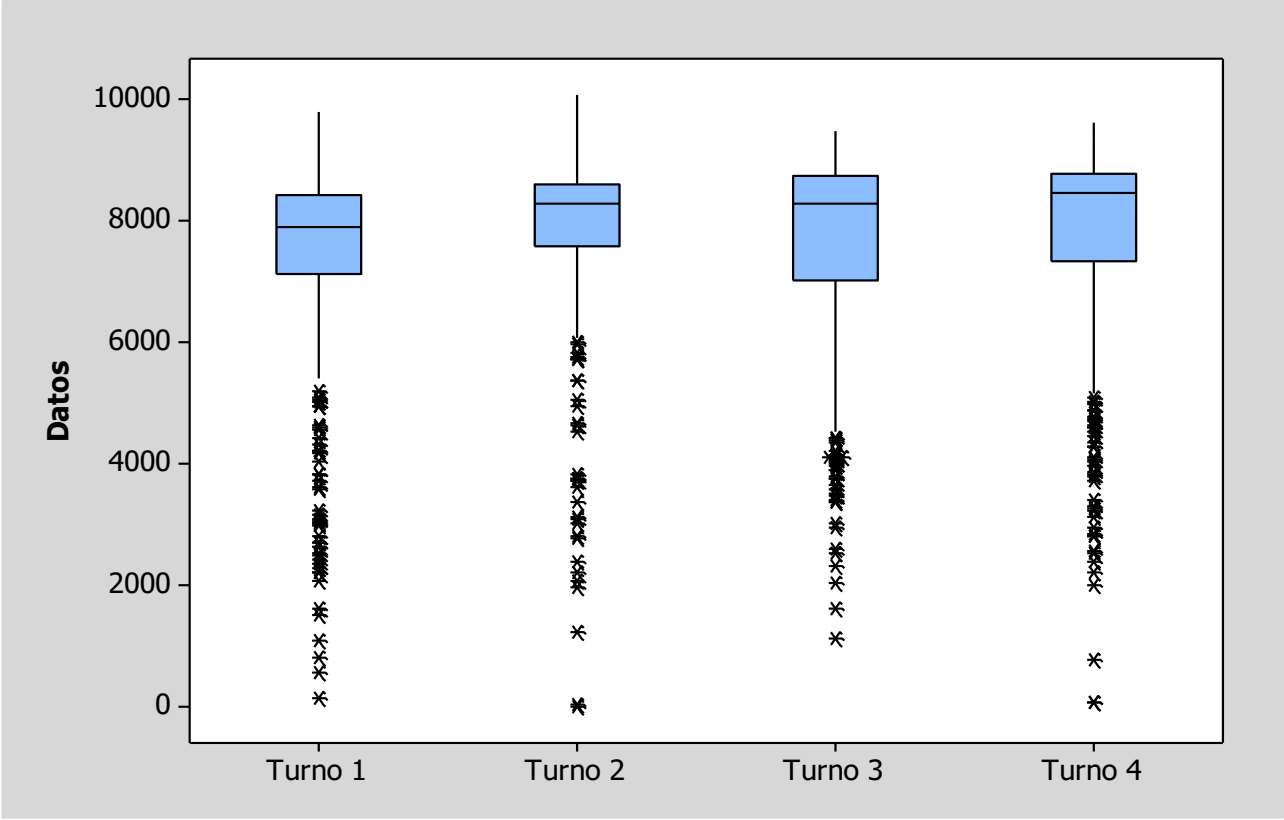


Ilustración 25: Diagramas de caja de desempeño por turnos

Al buscar una distribución que pueda ajustarse o una transformación que sea capaz de normalizar los resultados, se ve que solo el turno 2 logra encontrar una transformada de Johnson que normaliza los datos, por lo tanto no se realiza una comparación por análisis de capacidad, sin embargo, se aprecia cualitativamente lo siguiente:

- Turno 2 es el más efectivo en concentrar el tonelaje en el rango de operación determinado.
- Turno 1 demuestra una segundas tendencias hacia las 6000 tph, lo que significaría mayor cantidad de detenciones en la línea del chancador 3.
- Turno 3 demuestra una segundas tendencias hacia las 4000 tph, lo que significaría mayor cantidad de detenciones en la línea del chancador 5.

4.3.2.2.2. Separación por jornada día/noche

Se segrega la operación durante el día y durante la noche puesto que el comportamiento puede variar al estar sometido a situaciones anormales para el biorritmo de una persona y por ende su efecto sobre la operación.

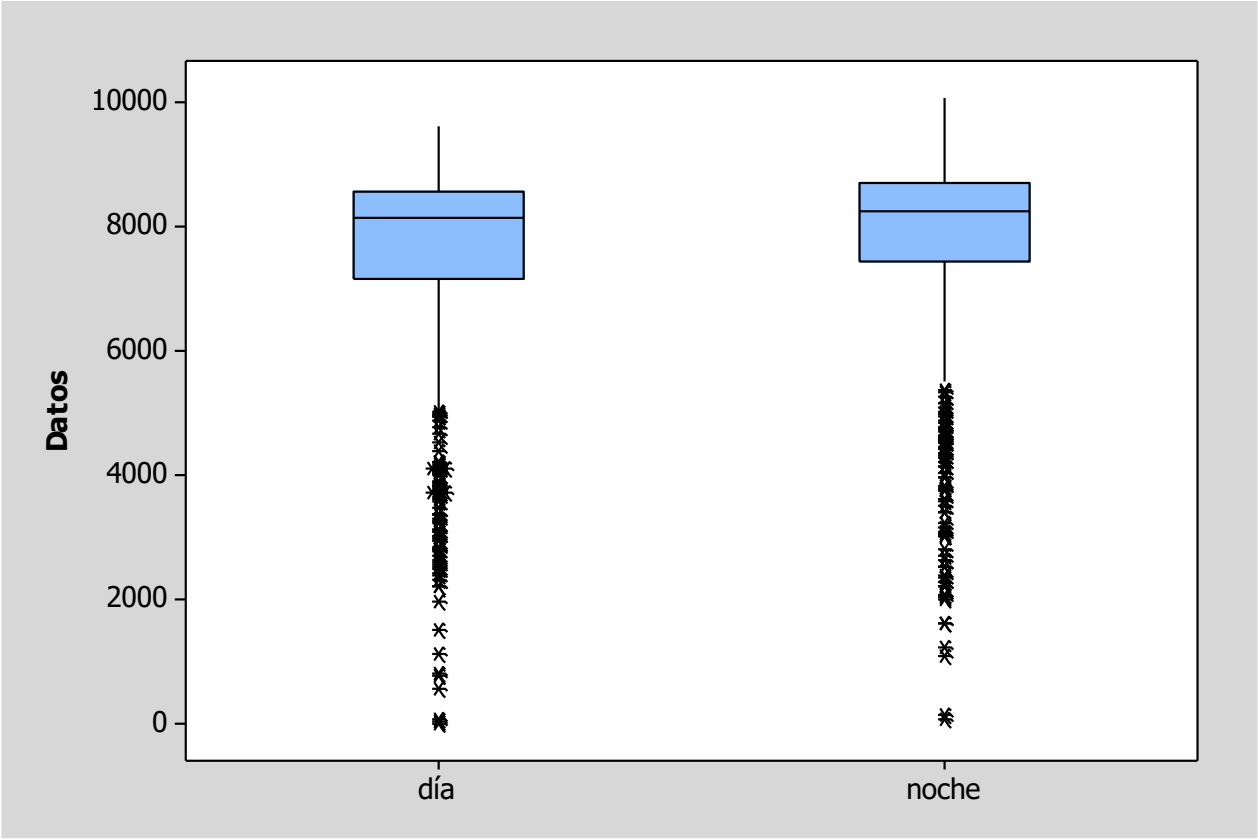


Ilustración 26: Diagramas de caja de desempeño por jornada

De este análisis sobre ajuste de distribución, solo con la operación de noche se logra normalizar al conjunto de datos con una transformada de Johnson, por lo tanto no se realiza una comparación por análisis de capacidad, sin embargo, se aprecia cualitativamente lo siguiente:

- Jornada día demuestra de forma pronunciada dos comportamientos, siendo aquel contenido en el rango objetivo, Menos variable.
- Jornada noche tiene una concentración de registros a los 4500 [tph] y mayor variabilidad en el rango objetivo

4.3.2.2.3. Separación por operación en horario administrativo

Se añade al análisis la separación en función de la presencia de los cargos administrativos como fuente de presión a la labor y desempeño de los operadores indicando como horario administrativo al tiempo en que coinciden sus presencias en faena.

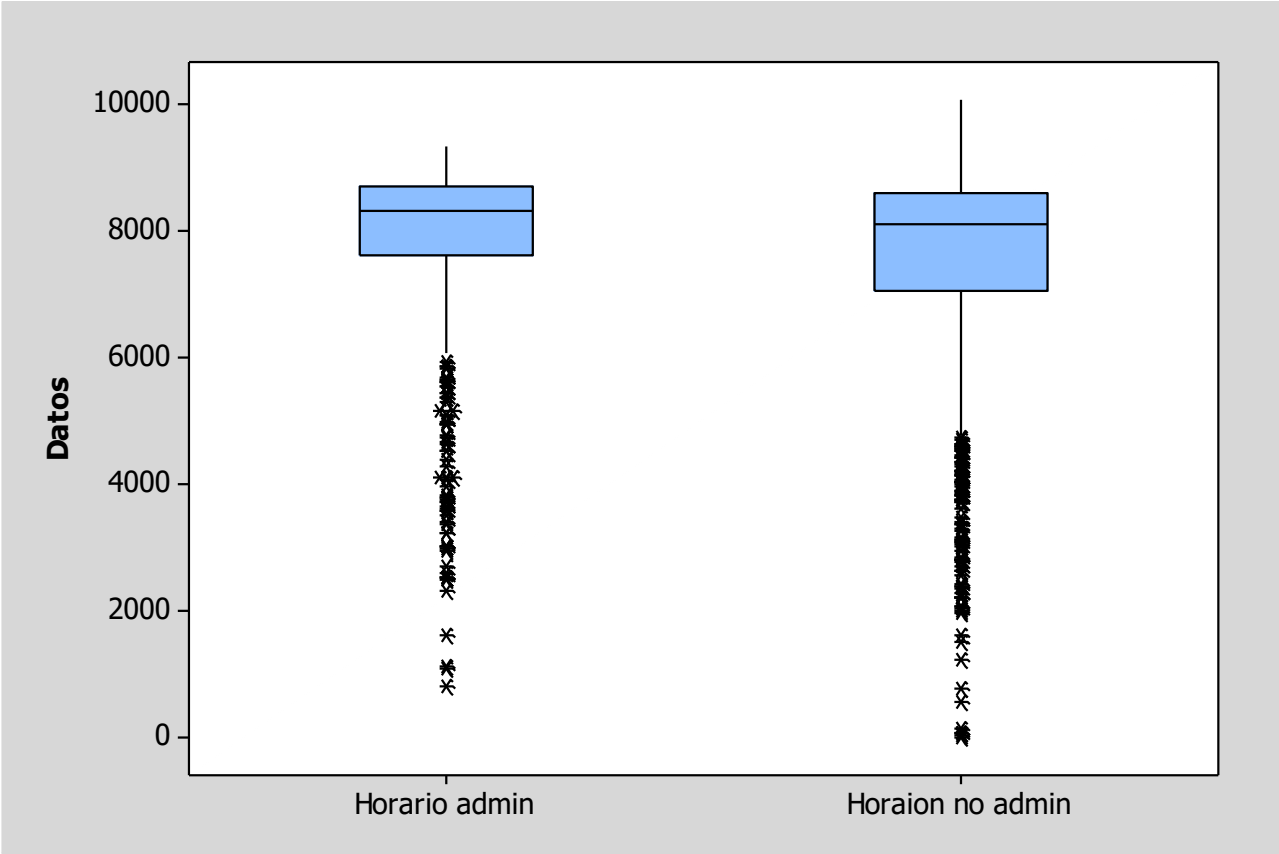


Ilustración 27 Diagramas de caja de desempeño por horario administrativo

Al buscar una distribución que pueda ajustarse o una transformación que sea capaz de normalizar los resultados, no se logra encontrar una transformada que normalice los datos, por lo tanto no se realiza una comparación por análisis de capacidad, sin embargo, se aprecia cualitativamente lo siguiente:

- Durante la operación de Horario no administrativo se producen mayor cantidad de registros fuera del rango de aceptación, distinguiéndose una tendencia cercana a las 6000 [tph] y otra de menor acentuación a las 4000 [tph].
- La operación durante Horario administrativo concentra mejor sus resultados tendiendo al rango de aceptación, pero no conteniéndolos dentro de sus límites.

4.3.2.2.4. Separación por turnos, jornada y horario administrativo

Se apreciara el efecto en la operación al aplicar los tres criterios descritos buscando representar las aptitudes de los turnos, su efecto producto del trabajo en situación de menor comodidad y el efecto producido por la presencia de los cargos administrativos que monitorean sus labores.

Por último, al utilizar los tres criterios de forma simultánea, se busca disminuir la interferencia de situaciones que produjo cierto efecto en solo una parte de los datos a diferencia de sus pares.

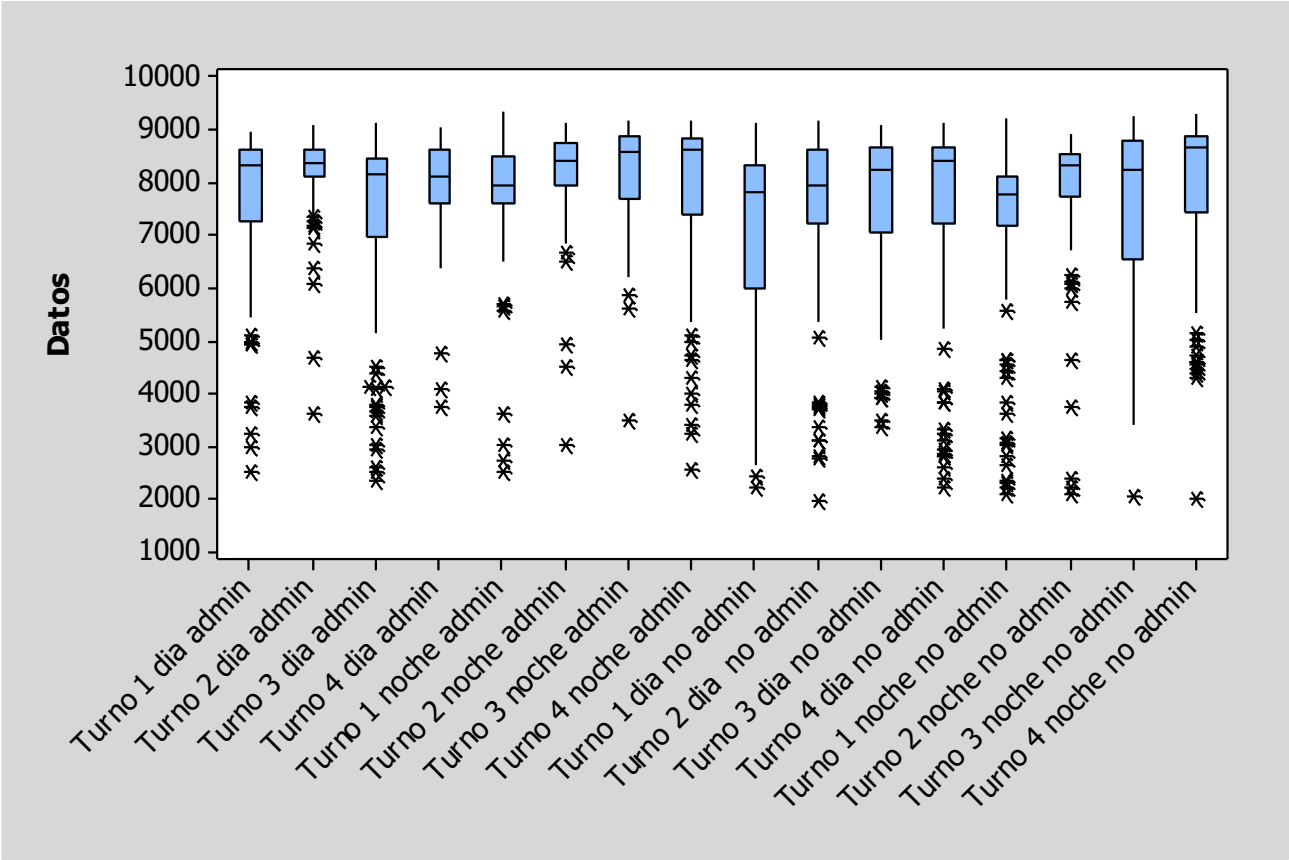


Ilustración 28: Diagramas de caja de desempeño por turnos, jornada y horario administrativo

Tras analizar el estado de cada subconjunto de datos obtenido se logra obtener una normalización para cada caso.

En la tabla siguiente se entrega el resultado para cada subconjunto tras verificarse una primera vez el ajuste de curva, disponibilidad para transformación o necesidad de análisis multimodal, segunda instancia de verificación de ajuste de curva y finalmente los índices de Anderson-Darling y valor P para mostrar la bondad de ajuste para distribución normal.

Tabla 6: Resultados de análisis tras separación por turnos, jornada y operación en horario administrativo

		Turno	Ajuste de curva	Acepta transformación	Multimodalidad	Ajuste de curva	Acepta transformación	A-D	Valor p
Horario administrativo	Día	1	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,460	0,256
		2	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,200	0,881
		3	Ninguna	Ninguna	2	Normal	N/A	0,314	0,523
						Weibull	Johnson	0,568	0,137
		4	Extremo mínimo	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,288	0,598
	Noche	1	Ninguna	Ninguna	2	Normal	N/A	0,634	0,057
						Normal	N/A	0,687	0,071
		2	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,167	0,936
		3	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,365	0,429
		4	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,513	0,190
Horario no administrativo	Día	1	Ninguna	Ninguna	2	Ninguna	Johnson	0,256	0,706
						Normal	N/A	0,254	0,722
		2	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,544	0,159
		3	Ninguna	Ninguna	2	Normal	N/A	0,869	0,022
						Normal	N/A	0,378	0,396
		4	Ninguna	Ninguna	3	Normal	N/A	0,355	0,412
						Normal	N/A	0,141	0,916
						Ninguna	Johnson	0,437	0,291
	Noche	1	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,390	0,379
		2	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,227	0,812
		3	Ninguna	Johnson	N/A	N/A	N/A	0,447	0,277
		4	Ninguna	Ninguna	2	Ninguna	Johnson	0,166	0,928
						Ninguna	Johnson	0,386	0,384

Cada intervalo se debe normalizar y estandarizar previo al análisis de capacidad. La cantidad de subconjuntos a especificar en el software, será escogida de tal manera que la desviación estándar obtenida sea equivalente a la desviación obtenida al aplicar la misma transformación al conjunto de datos que forman la desviación estándar objetivo de esta primera fase. De la misma forma, los limites estadísticos inferior (8000 [tph]) y superior (9000 [tph]), y el target (8500 [tph]) serán transformados de acuerdo a cada caso.

Tómese como ejemplo el intervalo correspondiente al turno 3, jornada nocturna y horario no administrativo, la transformación de Johnson corresponde ser:

$$y(x) = -1{,}21449 + 0{,}708769 * Ln\left(\frac{(\,x - 1569{,}65\,)}{(\,9280{,}61 - x\,)}\right)$$

Con esta aplicación el intervalo queda normalizado y estandarizado, solo falta definir bajo esta nueva escala los límites estadísticos, el valor objetivo o target, y la desviación estándar objetivo.

Tabla 7: Parámetros obtenidos para: turno 3, noche, horario no administrativo

Parámetro	Resultado
Transformación	-1,21449 + 0,708769 × Ln ((x - 1569,65) / (9280,61 - x))
Limite estadístico inferior (LSL)	-0,07075
Limite estadístico superior (USL)	1,107694
Valor objetivo (target)	0,333171
Desviación estándar objetivo	0,480891

Con esta información se realiza el análisis de capacidad, donde la línea continua (overall) representa el proceso analizado, y la línea segmentada (within) representa la capacidad del proceso determinada por la varianza objetivo.

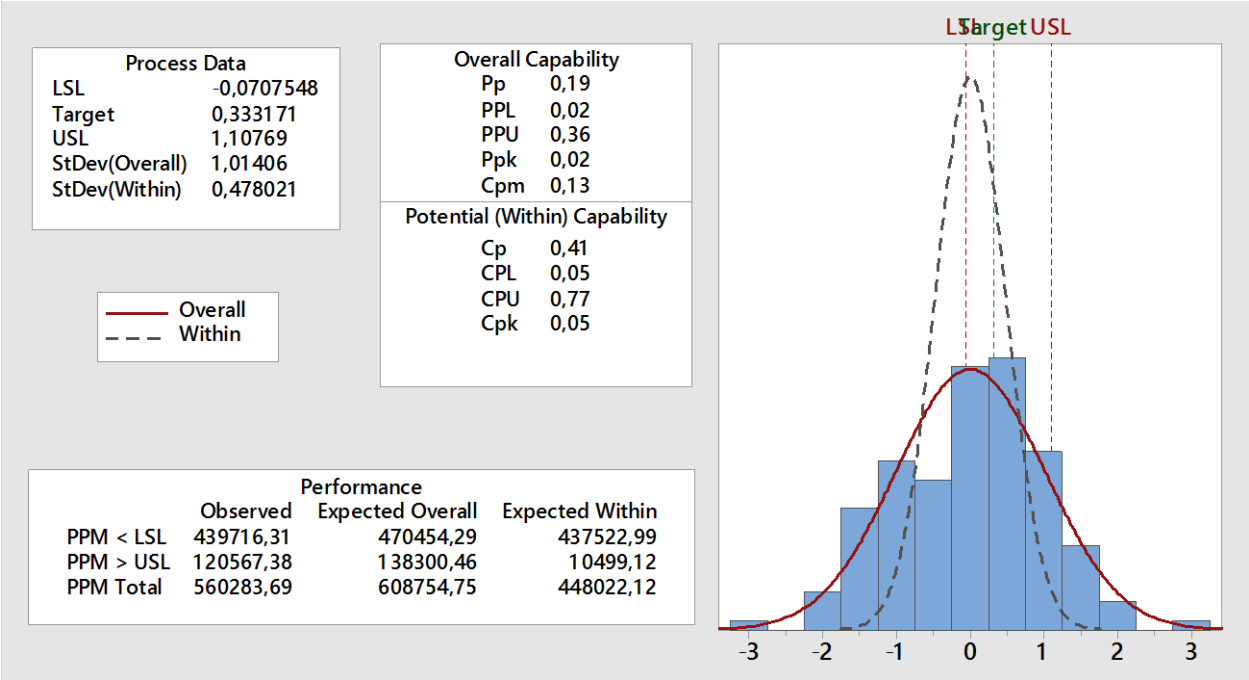


Ilustración 29: Análisis de capacidad para: turno 3, noche, horario no administrativo

Una vez realizado este proceso con todos los intervalos se aprecia aquellos sub-intervalos producto de la multimodalidad quedan definidos fuera de los limites estadísticos causando una influencia muy fuerte a pesar de ser poco comunes, ya que los índices generados son valores muy alejados de la concentración obtenida.

Las situaciones en que el proceso es más capas son por consiguiente las desarrolladas por el Turno 2 - Jornada diurna, Turno 4 - Jornada nocturna y Turno 2 - Jornada nocturna, Turno 3 – Jornada nocturna; todas durante horario administrativo.

Además, como análisis cualitativo de los histogramas obtenidos se aprecia que:

- El Turno 2 tiene mejor resultado en general al experimentar menos fallas durante su desempeño.
- El horario administrativo tiene mejores resultados, demostrando un efecto positivo en la producción la presencia de jefes y cargos administrativos en faena.
- El Turno 4, jornada diurna, horario administrativo tuvo la menor variabilidad conseguida.
- El Turno 1, jornada nocturna, horario no administrativo tuvo el peor desempeño logrado.

4.3.3. Análisis general

4.3.3.1. Determinación de distribución representativa

Con el objetivo de representar el comportamiento del proceso, se busca entre las distribuciones conocidas a aquella que posea el índice de correlación más alto y el índice de Anderson-Darling más bajo.

Tabla 8: Comparación ajuste de distribuciones

Distribución	Coeficiente de correlación	A-D
Valor extremo mínimo	0,961	51,064
Weibull	0,926	87,604
Logística	0,886	82,749
Normal	0,884	122,868
Loglogística	0,830	118,680
Lognormal	0,818	184,486

Debido a la información presentada en la tabla 9, se determina que la distribución "Valor extremo mínimo" corresponde ser la más representativa, por lo que se definen sus parámetros de localización (ω=8371) y escala (φ=864,2).

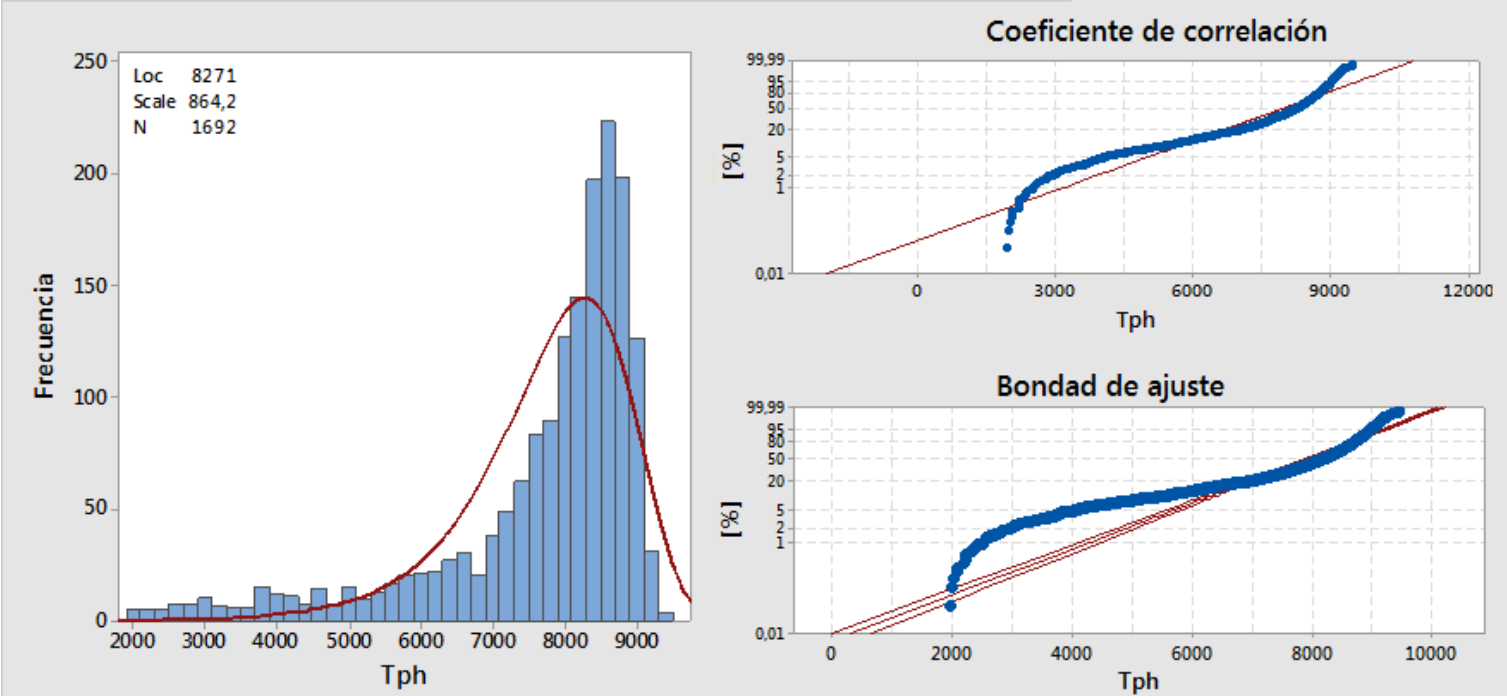


Ilustración 30: Distribución SEV como representación del muestreo de datos

Una vez conocida la distribución representativa, y ya que transformar los datos no ha sido posible, se identifica la capacidad del proceso basado en dicha distribución.

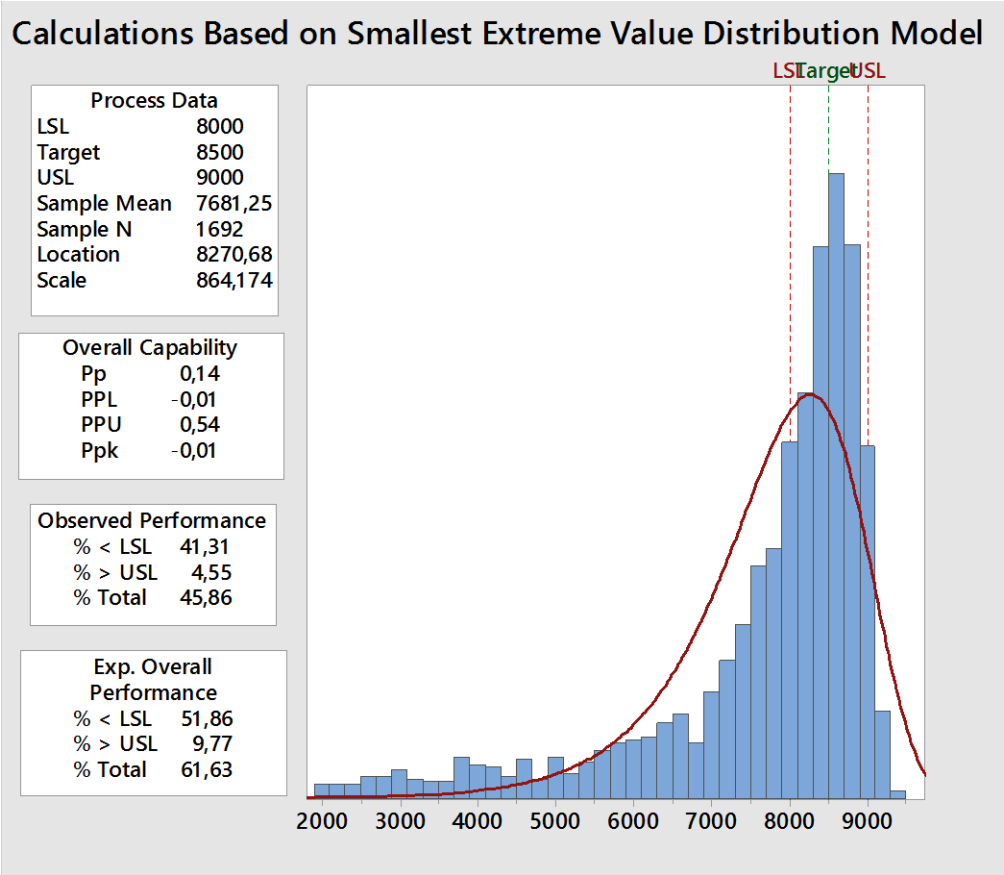


Ilustración 31: Análisis de capacidad muestreo, situación actual

Este resultado refleja el mal desempeño de este proceso con un índice Ppk cercano a 0, y con un 45,86% de sus datos fuera de rango de aceptación, el cual guarda correlación con el resultado obtenido para el nivel del stockpile en el punto 2.4 - "Justificación".

Una vez identificada la distribución, se busca simular un proceso ideal como referencia de máximo beneficio posible de esta fase. Para esto se debe identificar la causa de las caídas de carga en los registros.

4.3.3.2. Identificación de fallas

Para la identificación se contrasta la información utilizada en el punto 2.3 – "Fallas comunes del proceso", sin embargo, el registro no especifica la hora en que se produce una detención por espera de camión, ni picado de bolón. Esto es debido a que el registro de estas detenciones no es automático, para el caso de espera de camión, el operador registra de forma manual cuanto tiempo perdió cada hora por esta causa, y al final de su turno lo presenta en un informe; para el caso de picado de bolón, solo especifica el tiempo total perdido durante su turno.

Para la identificación de las cusas de fallas, se debe revisar cada registro de cada operador en el periodo de estudio, consiguiendo el siguiente grafico de Pareto.

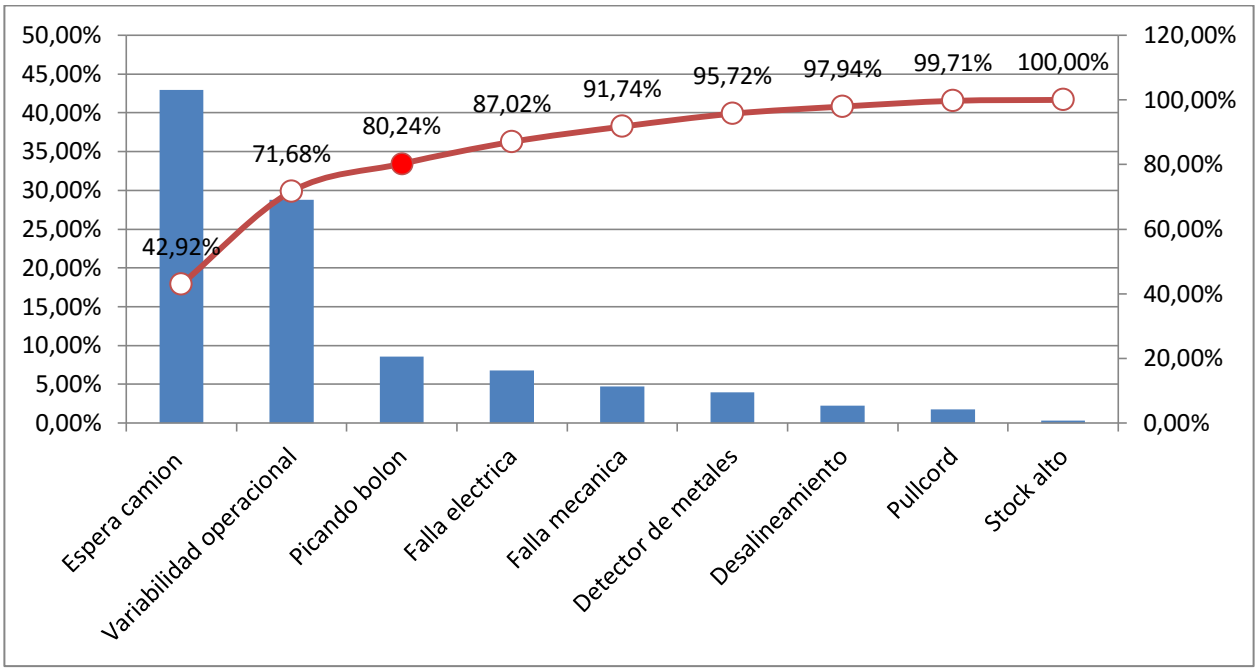


Ilustración 32: Gráfico de Pareto de fallas más comunes acotado al intervalo de muestreo

Al contrastar el registro de fallas y los registros de operadores con los datos obtenidos del pesómetro de la correa, se halla una cantidad significativa de caídas en los registros que no están asociados a ningún tipo de falla, por lo que para este estudio se ha definido como "Variabilidad operacional".

4.3.3.3. Simulación

Una vez identificados los registros que se desean simular, se debe definir la distribución esperada de acuerdo la meta propuesta. Al simular la distribución asociada al muestreo se obtiene una desviación estándar de 1108,4; por lo que para establecer una distribución objetivo se definen los parámetros de escala y localización para conseguir una distribución que tenga la desviación estándar objetivo y se adecue al target; estos parámetros corresponden ser: ω= 8500; φ= 430,5; y se consigue una desviación estándar de 553,0 (ver anexo A-4).

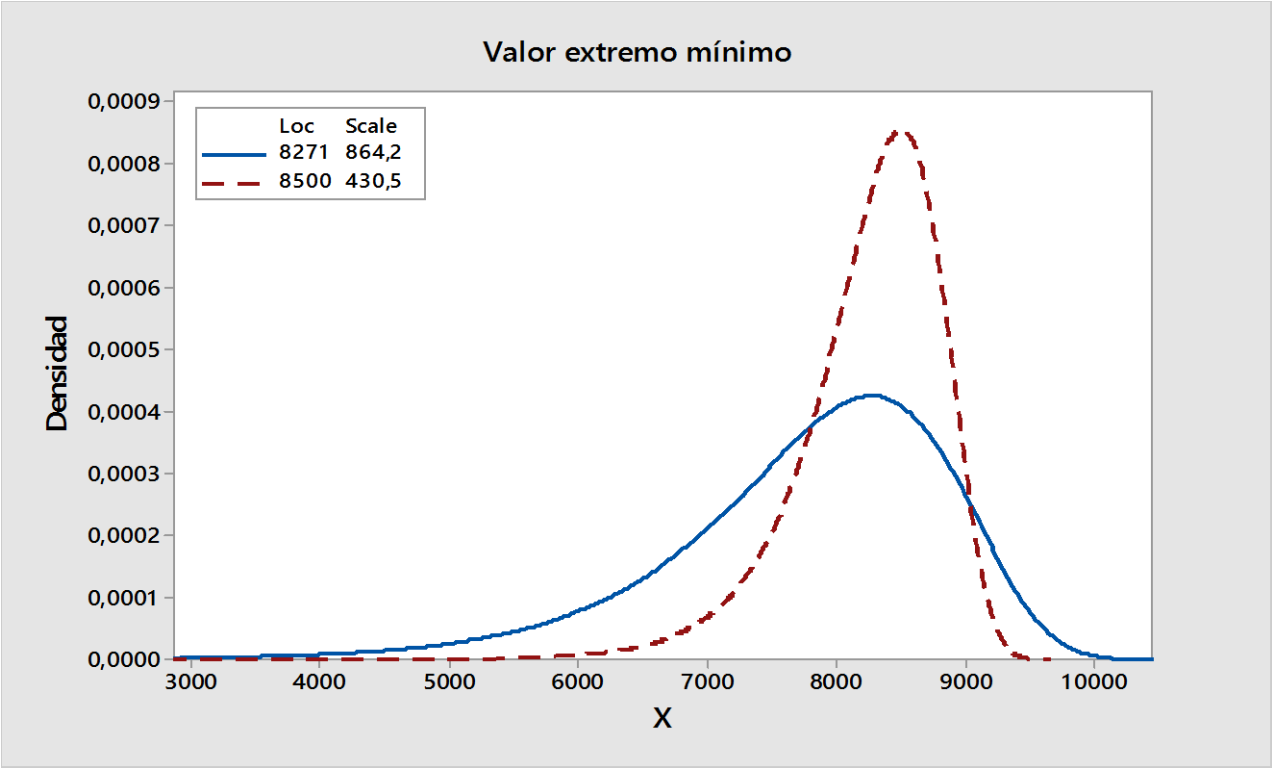


Ilustración 33: Línea continua: Distribución SEV para muestreo. Línea discontinua: Distribución SEV objetivo.

Habiendo definido la distribución objetivo, se simula una producción ideal para la cual se reemplaza cada valor fuera de rango, identificado previamente, por un valor aleatorio generado por una simulación de Monte Carlo, utilizando el rango deseado de la distribución objetivo por medio de la función inversa de la función de distribución acumulativa para la distribución SEV (Ver anexo B-2).

Esta simulación es iterada hasta obtener una cantidad de datos tal que los estadísticos de la mejora obtenida alcanzan la estabilidad, obteniéndose en promedio entre las simulaciones, una mejora del proceso de 11,58% como mineral adicional enviado al stockpile.

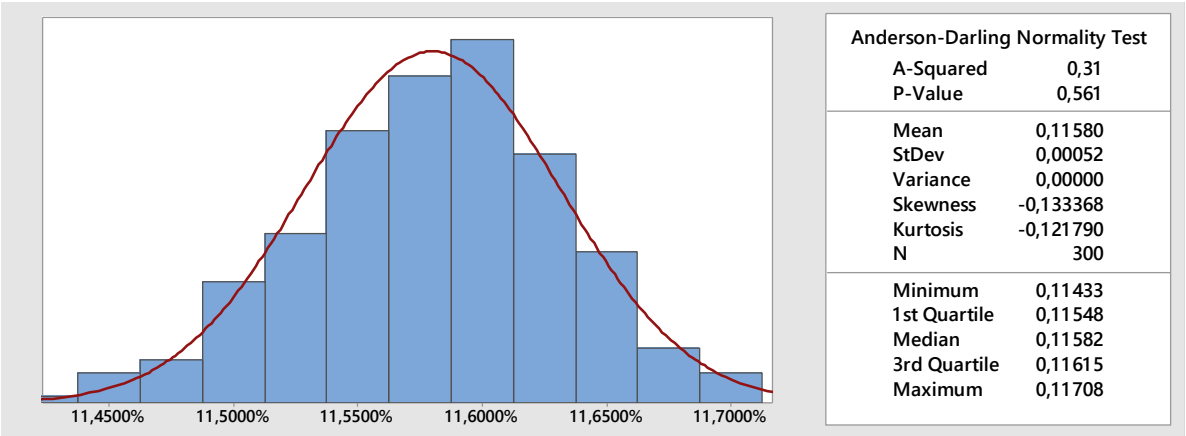


Ilustración 34: Resumen gráfico de las iteraciones de la simulación de Monte Carlo

Como resultado de esta simulación, se realiza un análisis de capacidad a un caso representativo del resultado medio obtenido tras la iteración.

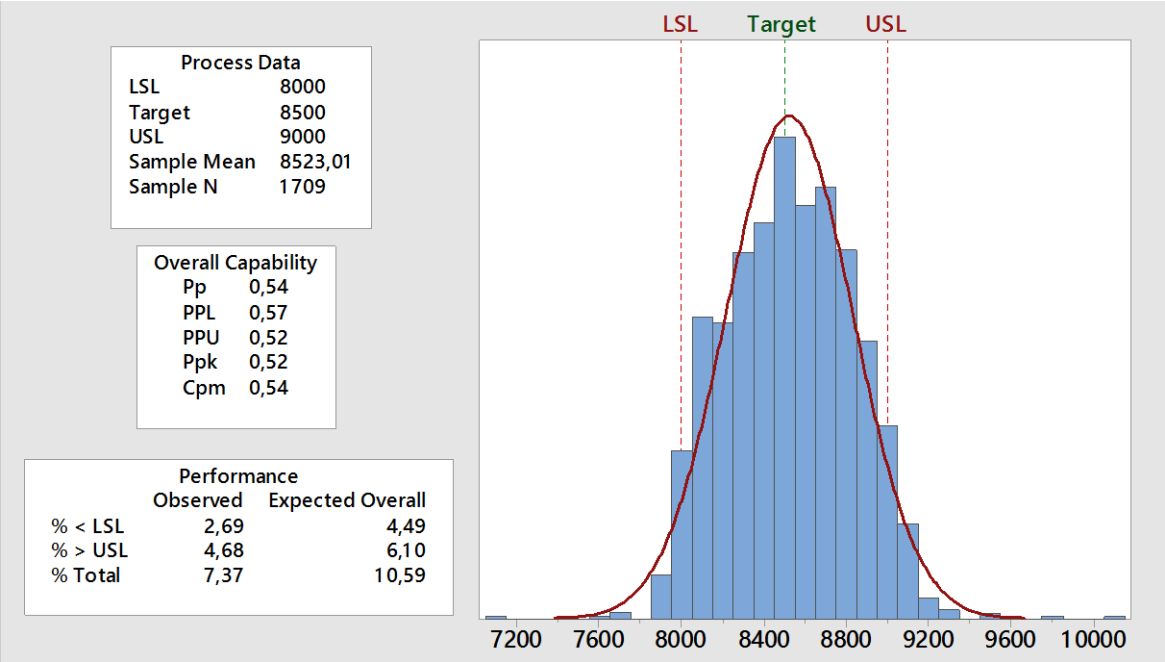


Ilustración 35: Análisis de capacidad simulación

En este análisis se refleja el caso ideal de mejora de la fase estudiada, con un índice Ppk de 0,52 y un desempeño con 10,59% de registros fuera de rango.

4.3.3.4. Análisis de sensibilidad

Para cuantificar el impacto de las iniciativas en la mejora del proceso, se realiza un análisis de sensibilidad en el cual se cuantifica la relevancia de cada tipo de detención, y posteriormente tres posibles escenarios (pesimista medio y optimista) de mejora para cada iniciativa, indicando su impacto en cada tipo de falla. Estos escenarios luego serán ponderados con la misma metodología que en PERT-CPM para obtener el valor esperado de mejora (Ver anexo B-3). Cabe destacar que los resultados obtenidos en el ensayo de carga fueron considerados para el impacto del protocolo transversal sobre la espera de camiones de forma tal que el resultado obtenido, corresponde ser el caso óptimo; el resto de los impactos fueron desarrollados por medio de sesiones de análisis con Ingeniero Senior de Operación Chancado, considerando expectativas conservadoras de mejora.

De la producción simulada, un 11,58% corresponde ser las pérdidas de producción, las cuales se les disminuye un 3% por humedad contabilizando así su equivalente a 11,23% de mineral seco; esta cantidad se desglosa en las principales causas de detenciones siendo la más relevante la espera de camión, resultado que coincide con el análisis inicial de fallas más comunes del proceso. De este 11,23% se ha determinado que un 6,36% es recuperable con la implementación conjunta de las tres iniciativas, encontrándose el mayor potencial en el protocolo transversal, ya que este busca establecer la operación optima e incentivar la coordinación entre áreas.

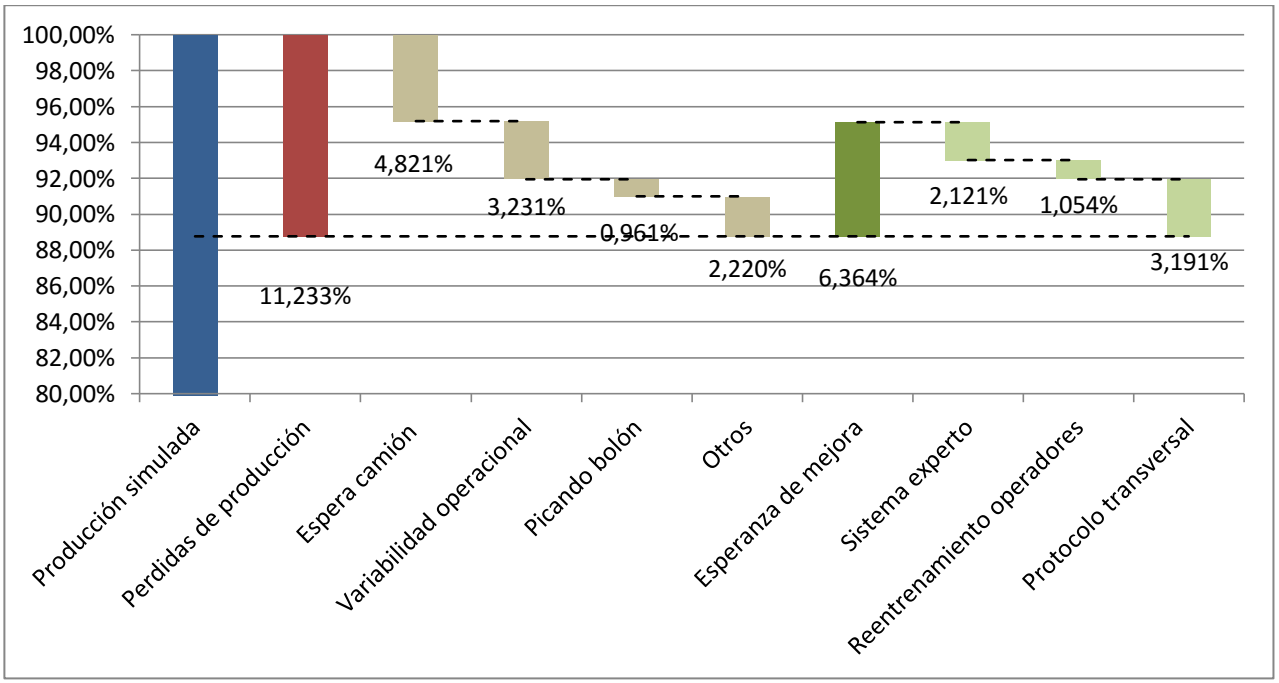


Ilustración 36: Resultado gráfico del análisis de sensibilidad

4.3.3.5. Estimación de costo y beneficio

Como se mencionó en el punto 4.1 – "Muestreo", el muestreo solo es aplicable al 61,09% de la producción, esto significa que el aumento de mineral depositado en el stockpile es, en el caso esperado de 1.767.863 [ton], y en el caso pesimista de 1.047.273 [ton]; sin embargo, según la estimación realizada en el punto 2.4 – "Justificación", la PC solo tiene capacidad para procesar 876.000 [ton] adicionales durante el año, con lo que queda delimitado el incremento de producción.

Se analizan los costos de producción anual de MEL proyectado en el plan quinquenal especificados entre Mina (extracción, transporte y chancado del mineral), Concentradoras, Cátodos, y NPI.

Ya que se busca el costo del tratamiento sulfuros, se ignora el costo especificado bajo Cátodos ya que esto considera el tratamiento de óxidos y sulfuros de baja ley una vez recibidos de la mina; y ya que el estudio se enfoca en la PC Laguna Seca, el costo proveniente de la operación en Mina será proporcional al mineral procesado. Como resultado de esto, el costo anual del año fiscal asociado a la PC Laguna Seca es de 1.246.697.178 [USD].

Estimando que la ley media del año fiscal es de 1,01% y la recuperación de cobre es de 81,63%. El Costo por libra de concentrado de cobre del año fiscal corresponde ser 1,51 [USD/lb].

Finalmente, con una estimación de precio de venta 2,30 [USD/lb], se obtiene una estimación de beneficio de 12,58 [MUSD], entendiéndose por beneficio el ingreso obtenible por la implementación de las iniciativas, y no su utilidad, ya que no se han considerado los costos asociados debido a que no se dispone de dicha información.

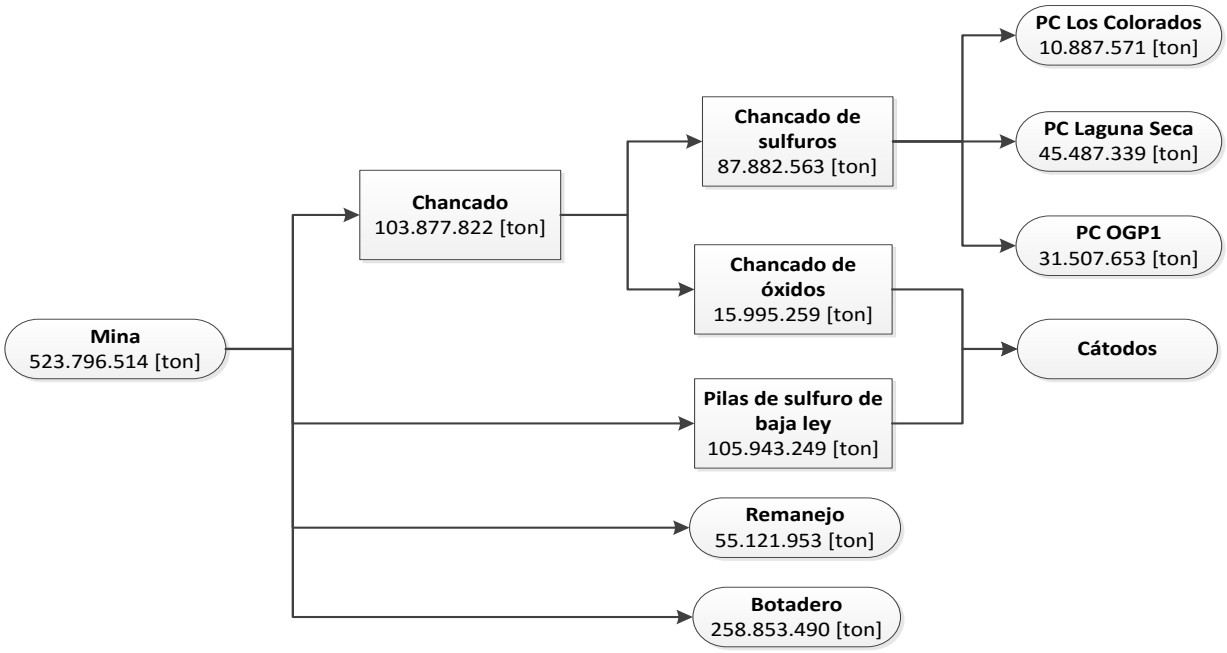


Ilustración 37: Diagrama de flujo de mineral ROM

Capítulo V: Conclusión

5.1. Resultados

Respecto del análisis específico se ha logrado distinguir cuando estos lograron mejor desempeño y que es lo que se requiere mejorar en cada caso, ya sea disminuir la variabilidad, acercarse más al "target", o ambos. En el siguiente diagrama se demuestra este resultado, e.g. el Turno 2 mantiene sus resultados cercanos al "target", por lo que se debería trabajar en reducir su variabilidad en la carga, por otro lado, el Turno 4 durante horario no administrativo tiene una variabilidad cercana al objetivo, por lo que debería trabajarse en aumentar la carga depositada en la correa (Ver anexo A-5 para diagramas Jack-Knife complementarios).

Debido a la mala calidad de los registros de fallas, no se consideró prudente continuar el análisis de las razones del buen o mal desempeño de cada turno.

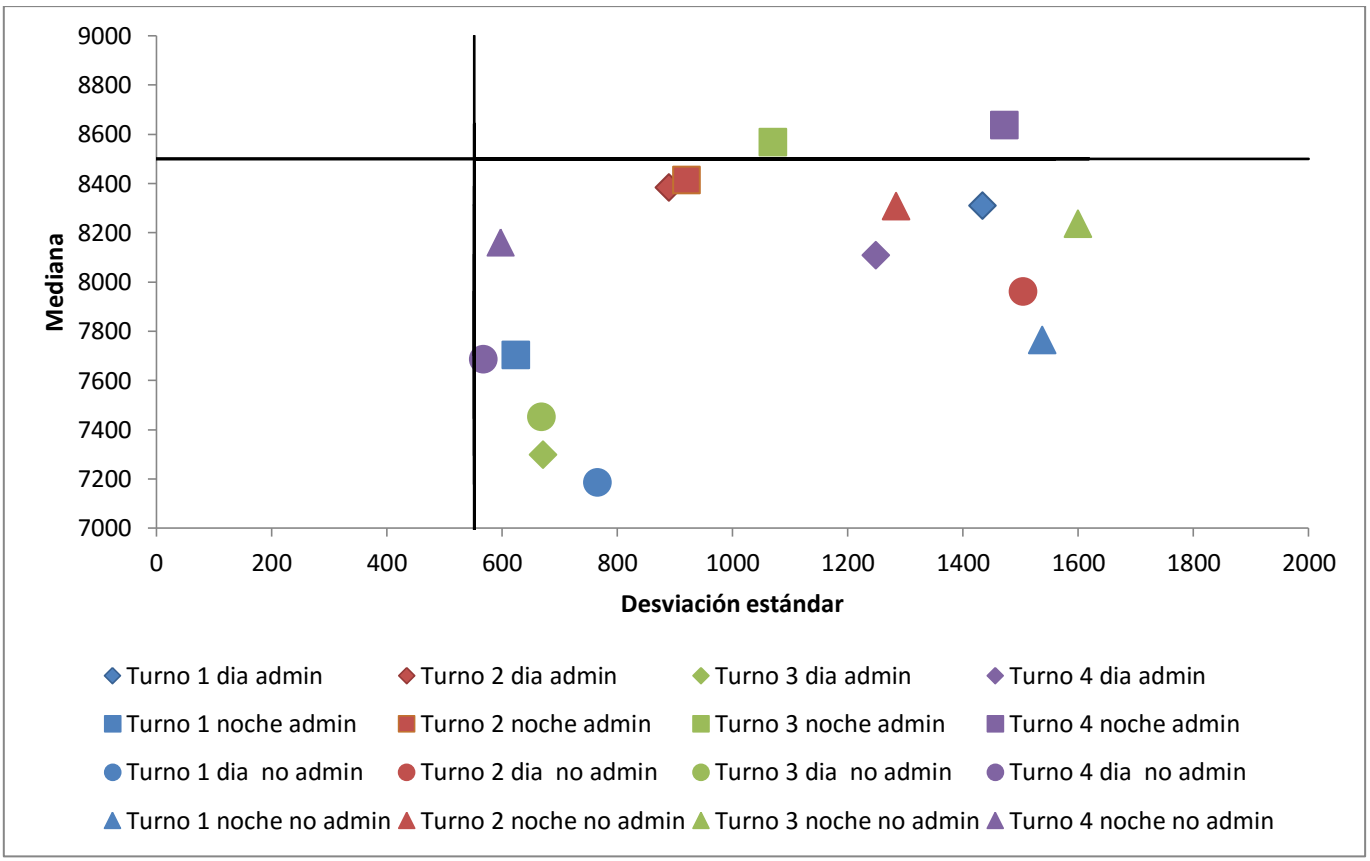


Ilustración 38: Diagrama Jack-Knife de análisis específico

Las tres iniciativas demostraron un potencial de mejora para el proceso, con el análisis general se logró establecer el margen de mejora esperado por cada una además de la implementación conjunta de estas; siendo el protocolo transversal el de mayor relevancia, puesto que influye en el proceso de una forma menos específica y abarca más que solo el área de chancado puesto que, además de redefinir parámetro de operación como cola optima de camiones y explicaciones claras de cómo enfrentar situaciones de contingencia, definirá KPIs comunes entre áreas las cuales motivaran una mejor coordinación y colaboración. Por ultimo su elaboración no es monetariamente costosa, pero su dificultad radica en la recopilación de cometarios y retroalimentación, además de la aprobación de las ares involucradas.

El sistema experto, el cual fue considerado como la segunda iniciativa con mayor impacto en el proceso, conlleva un mayor potencial para la operación del analizado puesto que se limitó a la primera etapa propuesta, la cual considera la disminución de variabilidad.; sin embargo, esta iniciativa en etapas posteriores permitirá el diseño de una sala de control única para los chancadores de sulfuros, puesto que se desarrolla como una herramienta capaz de aconsejar y/o tomar control de las situaciones complejas. Además se debe considerar el elevado costo de implementación (75 ~250 MCLP) que deberá ser estudiado una vez las cotizaciones estén aprobadas para el proyecto.

El reentrenamiento de operadores se consideró de menor impacto, pero su ventaja radica en su rápida implementación en comparación a las demás y un costo medio de implementación puesto que hay que pagar a los operadores por el tiempo que están siendo re-entrenados fuera de sus horas laborales, además de alojamientos y suplementos considerados.

5.2. Recomendaciones

Aumentar el factor de llenado más allá de las capacidades de la planta para procesar el mineral adicional conseguido terminara por disminuir la utilización y el OEE no tendrá el incremento esperado por la inversión incurrida; por lo tanto se recomienda lo siguiente:

- **Mejorar la calidad del registro de información de fallas**, sostener la veracidad de los registros de fallas es fundamental para poder analizar el proceso y tomar decisiones respecto donde ameritan concentrarse los esfuerzos para mejorar la operación. Se recomienda incluir este aspecto en el reentrenamiento de operadores, ya que el actual software HMI utilizado posee dicha característica, pero no es aprovechada.

- **Implementación parcial de iniciativas**, ya que la capacidad adicional de procesamiento de mineral de la planta concentradora está por debajo del incremento esperado de la implementación conjunta de las iniciativas, representando solo el 49,55% de la misma; se recomienda implementar el protocolo transversal como pilar de la estrategia de mejora, apoyado con el reentrenamiento de los operadores que comenzara de forma más pronta mientras se termina de definir el protocolo transversal, cubriendo entre ambos 66,7% de las oportunidades.
  Mientras tanto el sistema experto se desarrolle solo a nivel conceptual hasta que se demuestre que el apoyo es justificado.

- **Posterior reevaluación de la segunda etapa**, una vez aplicados los cambios se deberá evaluar el efecto que se obtuvo en la planta concentradora. Ante la posibilidad que estas iniciativas culminen la capacidad adicional de procesamiento de mineral, una segunda etapa puede no ser necesaria.

- **Redefinir OEE**, este índice es incapaz de alcanzar el 100% en ninguna circunstancia, ya que el diseño del proceso de MEL contempla una sobrecapacidad en las correas, con lo que compensa detenciones, lo cual alcanza el 50% de capacidad adicional de las correas respecto al consumo de las plantas concentradoras (100% en el caso de OGP1). Resultando en que al aumentar el factor de llenado, disminuyendo detenciones como espera de camión, se llena el stockpile en menos tiempo y por ende deteniendo el sistema una vez más. Se recomienda replantear la definición de factor de llenado respecto del Consumo máximo de la PC, en lugar de la Capacidad máxima de transporte de las correas.

5.3. Opinión

La realización de este tipo de trabajo requirió de determinadas cualidades necesarias para el trabajo en faena minera, de las cuales algunas son adquiridas en la Universidad, pero otras están ligadas al carácter y personalidad del postulante.

En primer lugar se requiere una gran capacidad de adaptación debido a, por un lado factores fisiológicos a causa de la altura geográfica y la aridez del desierto; y por otro lado factores psicológicos dado que la actividad en la mina es muy dinámica y cambios en las planificaciones pueden ocurrir en cualquier minuto. En segundo lugar, un conocimiento básico de cómo funciona la industria minera del cobre en Chile, los procesos básicos de extracción, conminución y tratamiento del mineral ROM. Por último, la capacidad de buscar el conocimiento y las herramientas faltantes para desarrollar el trabajo, junto con la capacidad de auto aprendizaje y autonomía.

La formación recibida en la Universidad Técnica Federico Santa María me ayudo en el desarrollo de mi pensamiento analítico y mi capacidad de buscar soluciones y alternativas. Afortunadamente una de mis asignaturas electivas (Manejo de materiales) me enseño sobre las bases del proceso minero del cobre, pero esta introducción podría darse en una asignatura base de la malla académica. Otro aspecto fundamental aportado por mi casa de estudios, fue el conocimiento de estadísticas y fundamentos de calidad en ingeniería, los cuales me dieron un sustento sobre el cual buscar más métodos de análisis; sin embargo, me hubiese gustado contar con una asignatura más de estadística aplicada o de ingeniería de calidad. Y como última sugerencia, incluir la enseñanza de uso avanzado de Microsoft Excel.

Bibliografía y referencias

[1] Rivera, Hernán. Escondida ayer y hoy

[2] Informe de Sustentabilidad Minera Escondida 2014

[3] Engineering statistics handbook
NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/, October 2015

[4] Internet – iSixSigma (What Is Six Sigma?)
http://www.isixsigma.com/new-to-six-sigma/getting-started/what-six-sigma/

[5] Internet – Charles Annis, P.E. Statistical Engineering (Goodness-of-Fit tests for Statistical Distributions)
http://www.statisticalengineering.com/goodness.htm

[6] Internet – Universidad de Barcelona (El p-valor)
http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo9/B0C9m1t18.htm

[7] Internet – Charles Annis, P.E. Statistical Engineering (Smallest (Largest) Extreme Value)
http://www.statisticalengineering.com/Weibull/smallest_extreme_value.html

[8] Allende, Hector; Canessa, Enrique; Galbiati, Jorge. Diseño de experimentos industriales

[9] Internet – Ciencia y Técnica Administrativa (Simulación de Monte Carlo con Excel)
http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/monte_carlo/monte_carlo.htmt

[10] AACE International Recommended Practices No. 18R-97
Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries, 2005

[11] Palmitesta, Paola; Provasi, Corrado. Estimating distribution functions in Johnson translation system by the starship procedure with simulated annealing

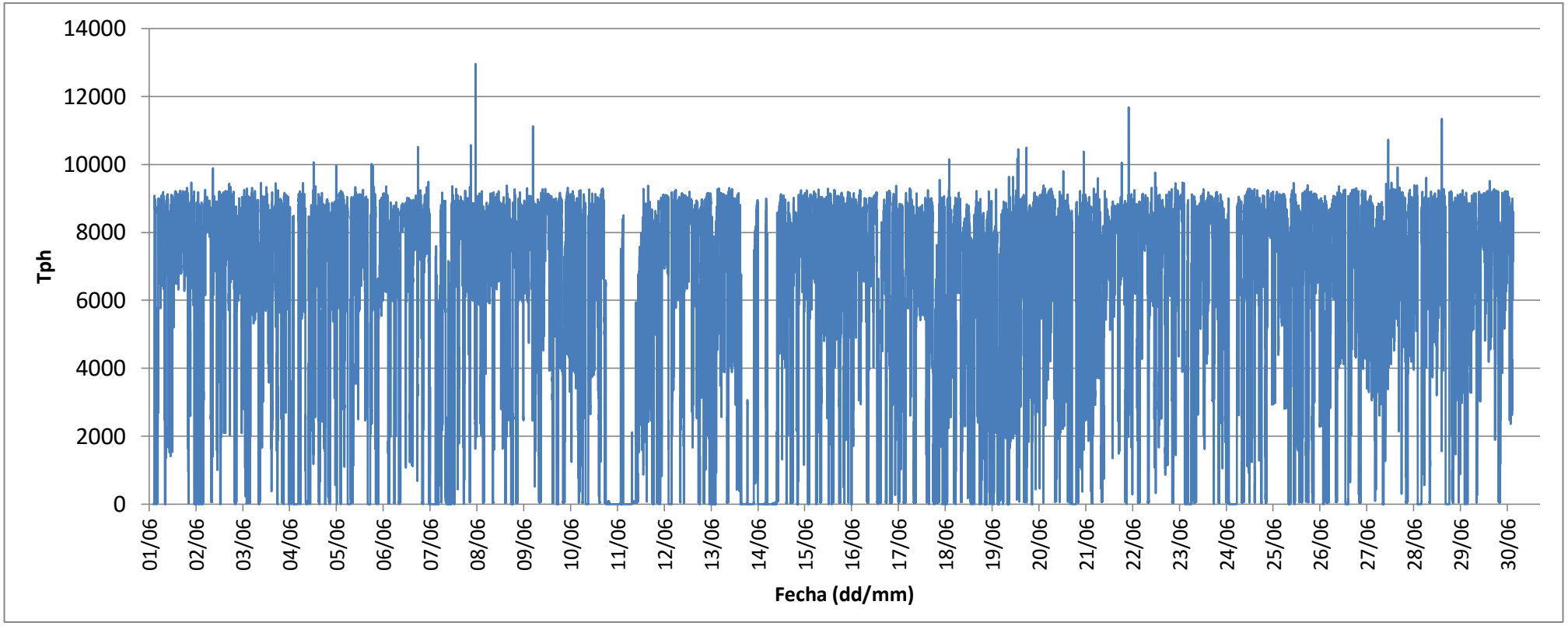
[12] Manual Minitab

[13] Manual de operación chancado, Minera Escondida

Anexos

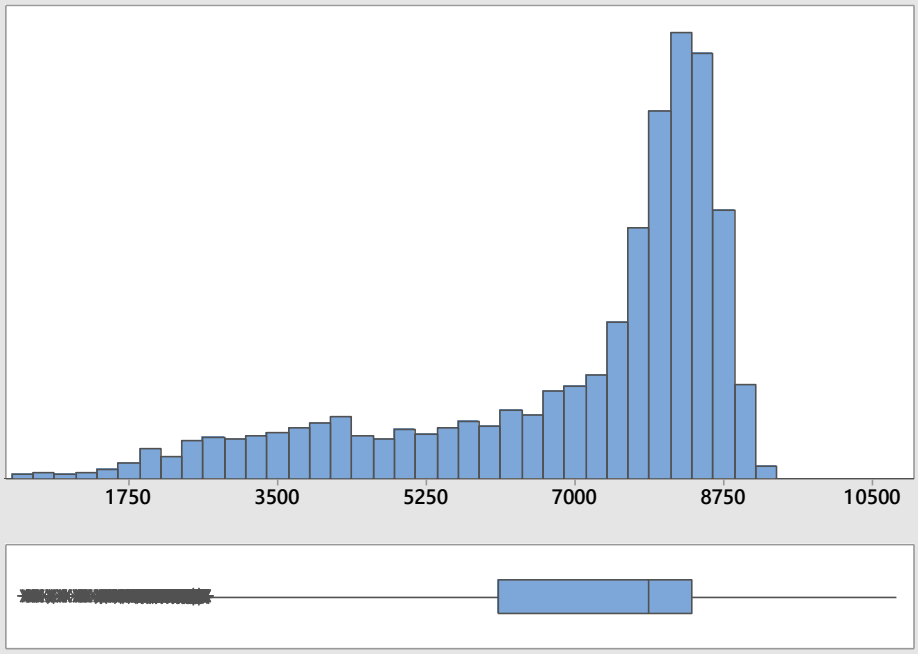
A. Gráficos e histogramas complementarios

A-1. Registro mensual de tonelaje en correa overland CV-102



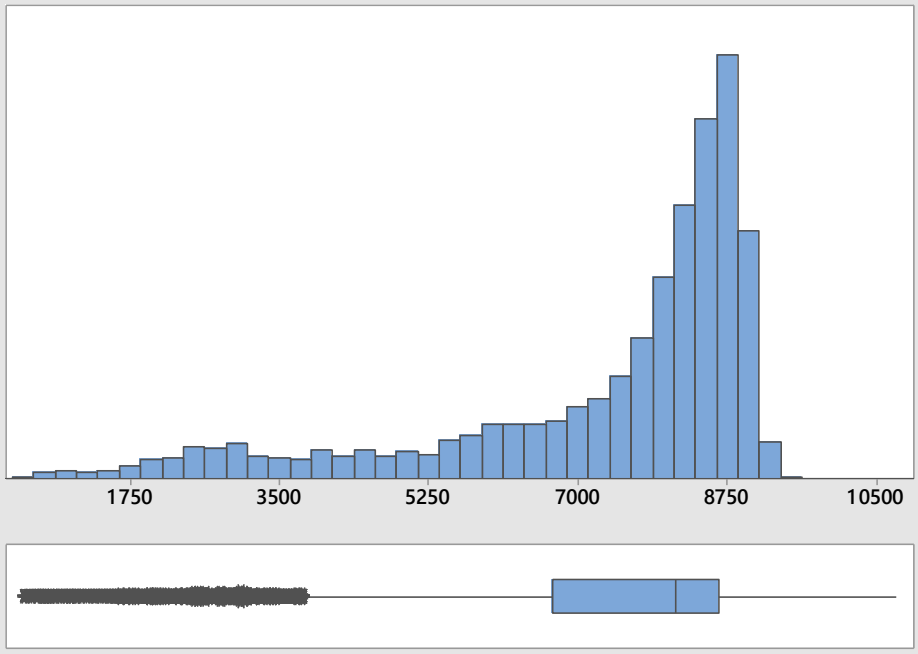
A-2. Resumen de los registros correspondientes al año fiscal y al mes de Junio

Registro año fiscal



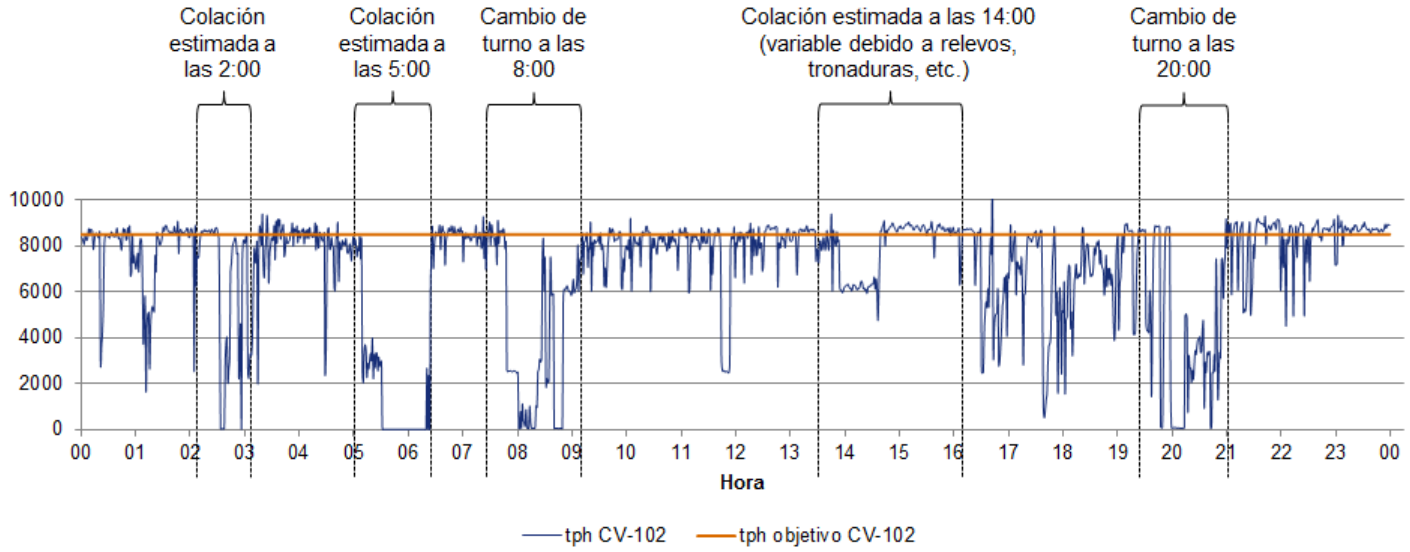
Mean	6994,9
StDev	1945,9
Variance	3786632,9
Skewness	-1,26065
Minimum	508,0
1st Quartile	6089,0
Median	7864,0
3rd Quartile	8368,0
Maximum	10783,0
95% Confidence Interval for StDev	
1916,9	1975,8

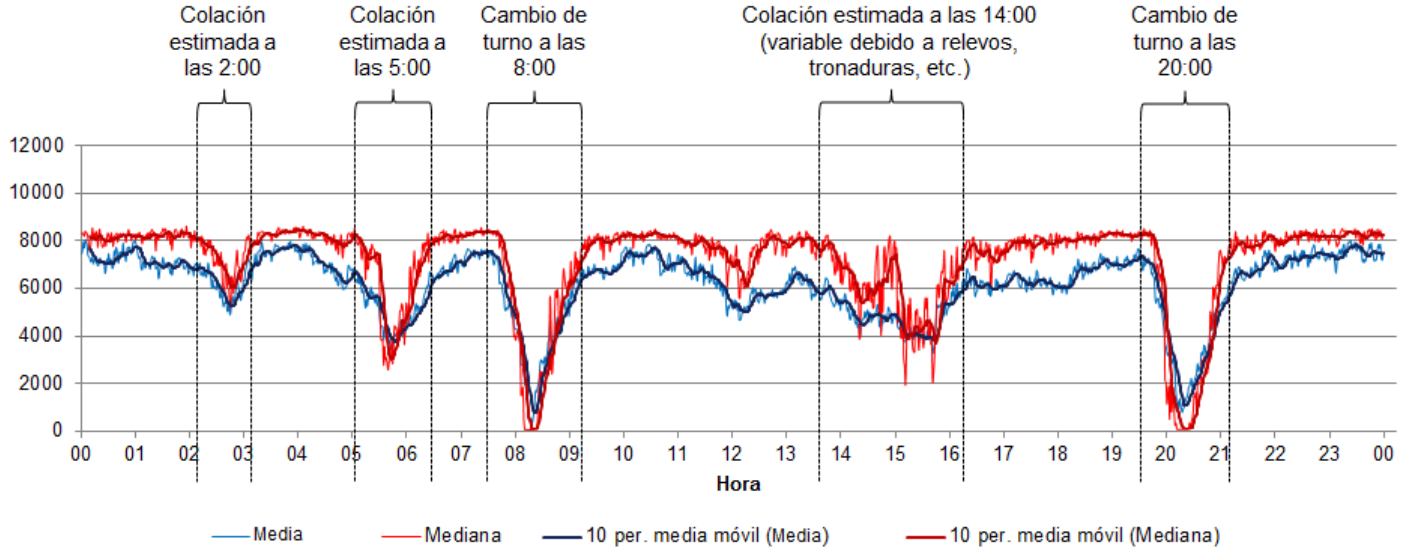
Registro del mes de Junio



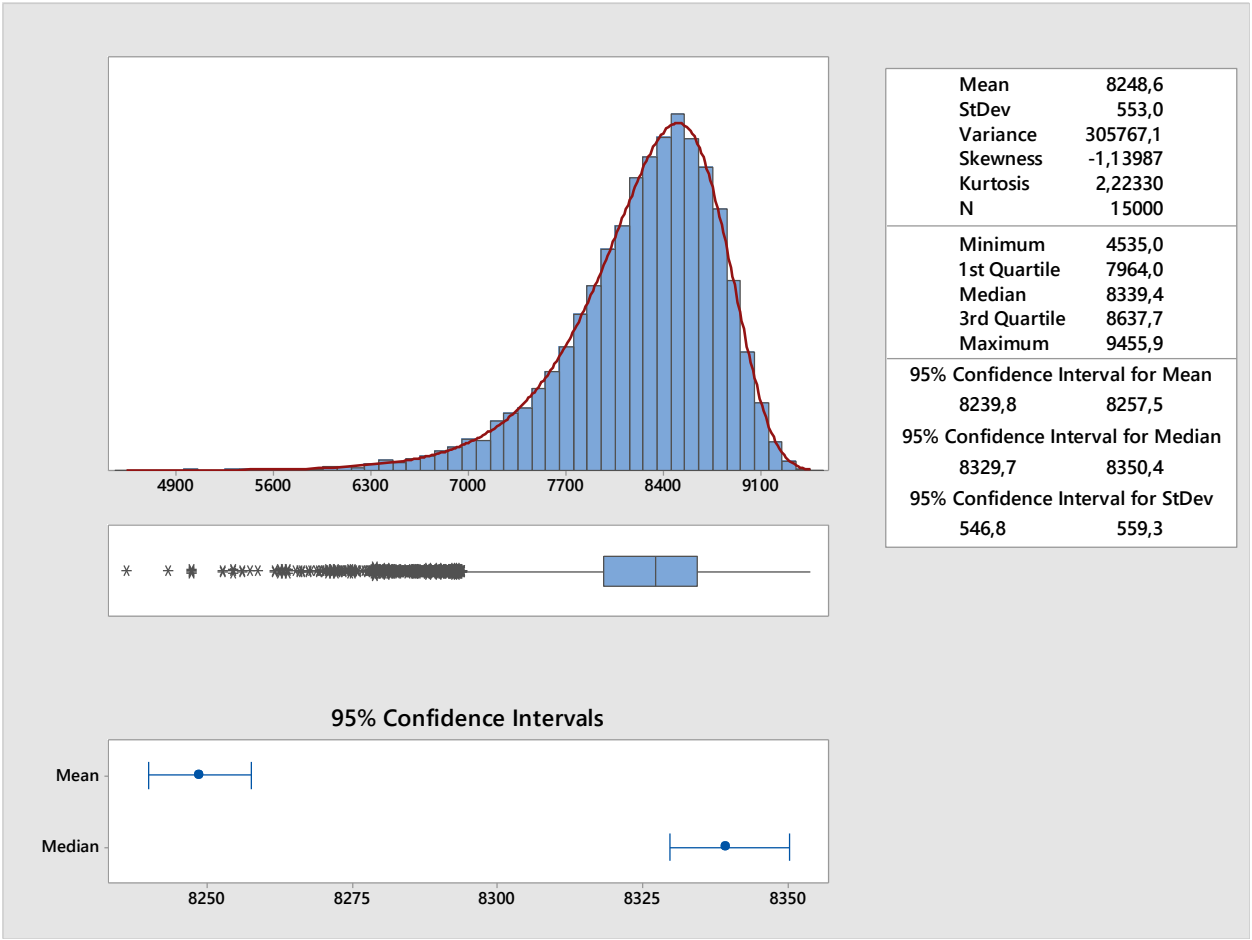
Mean	7335,9
StDev	1929,6
Variance	3723389,5
Skewness	-1,53640
Minimum	504,0
1st Quartile	6707,0
Median	8149,0
3rd Quartile	8654,0
Maximum	10731,0
95% Confidence Interval for StDev	
1915,2	1944,2

A-3. Arriba: Comportamiento de la carga en un día regular. Abajo: Tendencia de Media y Mediana de los días de Junio



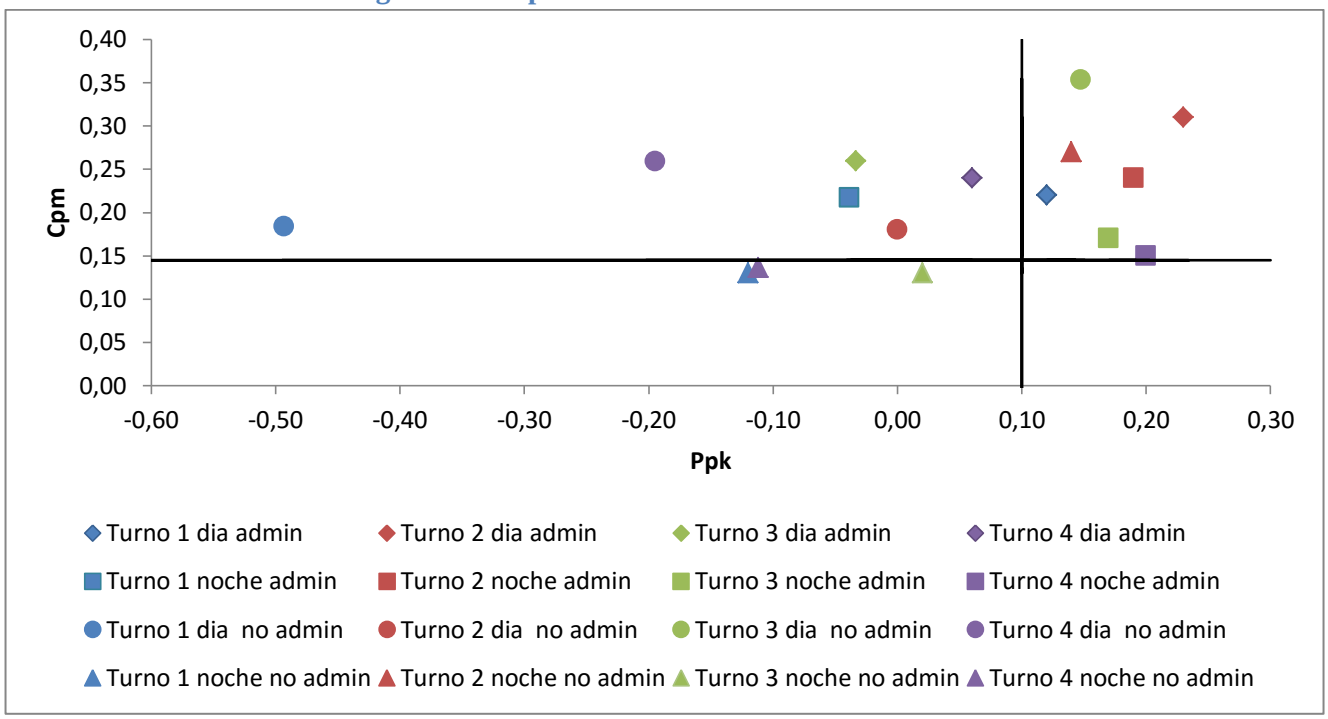


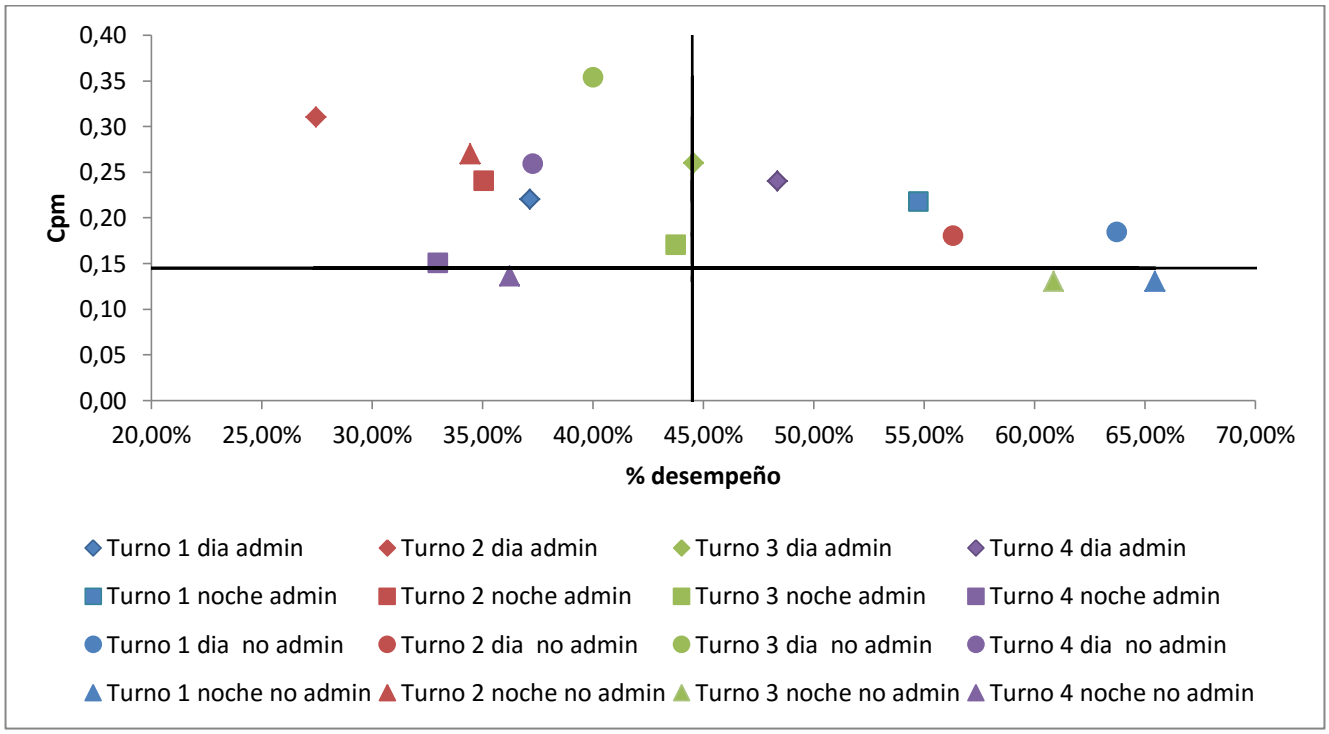
A-4. Resumen gráfico de la simulación de distribución SEV objetivo



Mean	8248,6
StDev	553,0
Variance	305767,1
Skewness	-1,13987
Kurtosis	2,22330
N	15000
Minimum	4535,0
1st Quartile	7964,0
Median	8339,4
3rd Quartile	8637,7
Maximum	9455,9
95% Confidence Interval for Mean	
8239,8	8257,5
95% Confidence Interval for Median	
8329,7	8350,4
95% Confidence Interval for StDev	
546,8	559,3

A-5. Diagramas complementarios de Jack-Knife





A-6. Análisis de capacidad obtenidos para cada intervalo del análisis especifico

Process Capability Report for Turno 1, día, admin

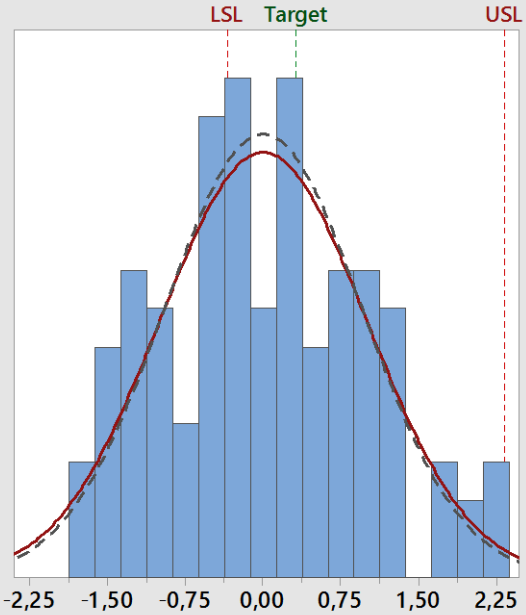
Process Data	
LSL	-0,349181
Target	0,324462
USL	2,32187
Sample Mean	0,00132595
Sample N	110
StDev(Overall)	0,99145
StDev(Within)	0,95046

Overall Capability	
Pp	0,45
PPL	0,12
PPU	0,78
Ppk	0,12
Cpm	0,22

Potential (Within) Capability	
Cp	0,47
CPL	0,12
CPU	0,81
Cpk	0,12

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	36,36	36,18	35,61
% > USL	0,00	0,96	0,73
% Total	36,36	37,15	36,35



Process Capability Report for Turno 2, día, admin

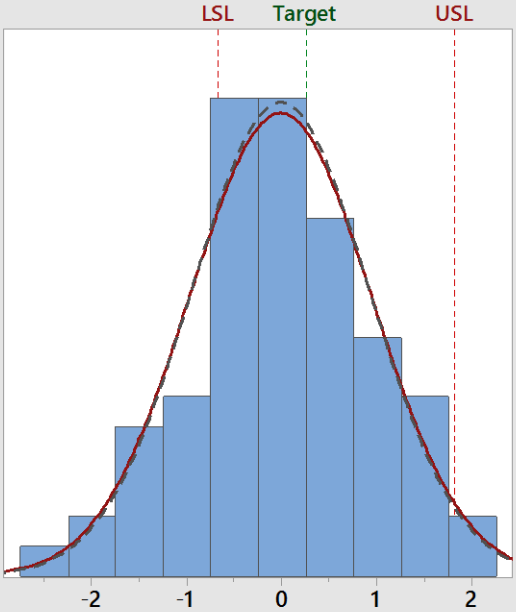
Process Data	
LSL	-0,664975
Target	0,263668
USL	1,82581
Sample Mean	-0,0178918
Sample N	74
StDev(Overall)	0,951843
StDev(Within)	0,930574

Overall Capability	
Pp	0,44
PPL	0,23
PPU	0,65
Ppk	0,23
Cpm	0,31

Potential (Within) Capability	
Cp	0,45
CPL	0,23
CPU	0,66
Cpk	0,23

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	21,62	24,83	24,34
% > USL	1,35	2,64	2,38
% Total	22,97	27,47	26,72



Process Capability Report for Turno 3, día, admin, moda 1

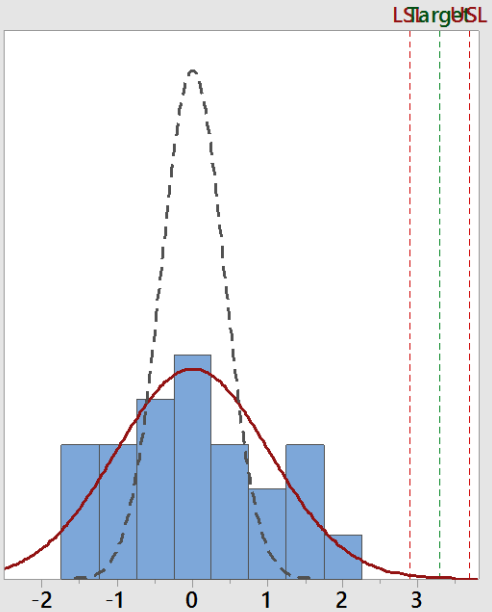
Process Data	
LSL	2,89671
Target	3,29408
USL	3,69145
Sample Mean	-2,64915e-007
Sample N	24
StDev(Overall)	1,02151
StDev(Within)	0,422366

Overall Capability	
Pp	0,13
PPL	-0,95
PPU	1,20
Ppk	-0,95
Cpm	0,04

Potential (Within) Capability	
Cp	0,31
CPL	-2,29
CPU	2,91
Cpk	-2,29

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	100,00	99,77	100,00
% > USL	0,00	0,02	0,00
% Total	100,00	99,79	100,00



Process Capability Report for Turno 3, día, admin, moda 2

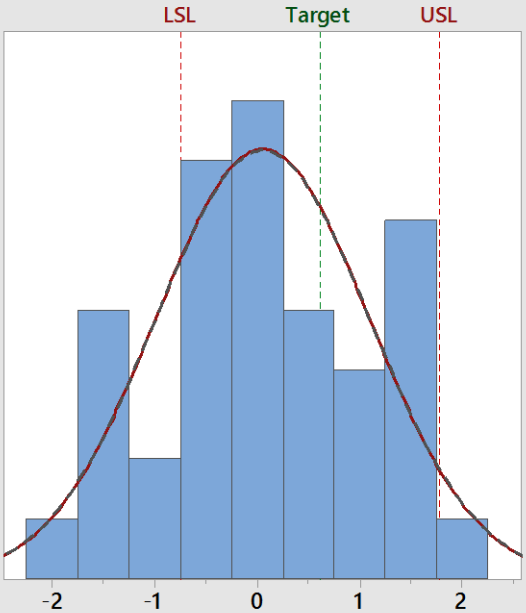
Process Data	
LSL	-0,749518
Target	0,60869
USL	1,78325
Sample Mean	0,0531569
Sample N	75
StDev(Overall)	1,04018
StDev(Within)	1,0437

Overall Capability	
Pp	0,41
PPL	0,26
PPU	0,55
Ppk	0,26
Cpm	0,33

Potential (Within) Capability	
Cp	0,40
CPL	0,26
CPU	0,55
Cpk	0,26

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	20,00	22,02	22,09
% > USL	2,67	4,81	4,87
% Total	22,67	26,83	26,96



Process Capability Report for Turno 4, día, admin

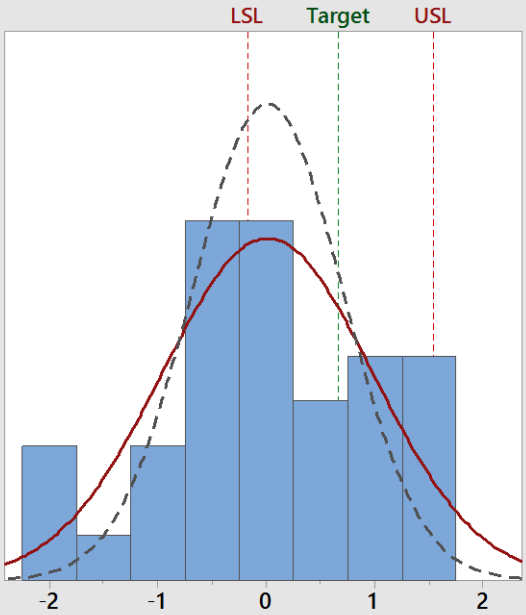
Process Data	
LSL	-0,16862
Target	0,669177
USL	1,54366
Sample Mean	0,0108221
Sample N	37
StDev(Overall)	0,970174
StDev(Within)	0,696

Overall Capability	
Pp	0,29
PPL	0,06
PPU	0,53
Ppk	0,06
Cpm	0,24

Potential (Within) Capability	
Cp	0,41
CPL	0,09
CPU	0,73
Cpk	0,09

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	43,24	42,66	39,83
% > USL	5,41	5,71	1,38
% Total	48,65	48,37	41,21



Process Capability Report for Turno 1, noche, admin, moda 1

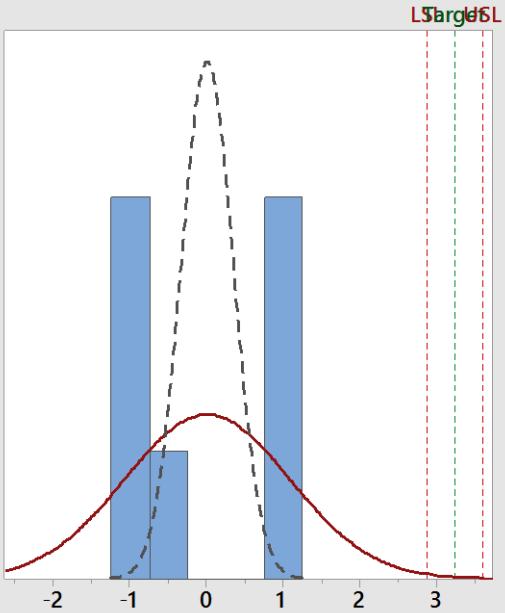
Process Data	
LSL	2,87009
Target	3,2381
USL	3,6061
Sample Mean	-3,1543e-007
Sample N	7
StDev(Overall)	1,08012
StDev(Within)	0,342881

Overall Capability	
Pp	0,11
PPL	-0,89
PPU	1,11
Ppk	-0,89
Cpm	0,03

Potential (Within) Capability	
Cp	0,36
CPL	-2,79
CPU	3,51
Cpk	-2,79

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	100,00	99,61	100,00
% > USL	0,00	0,04	0,00
% Total	100,00	99,65	100,00



Process Capability Report for Turno 1, noche, admin, moda 2

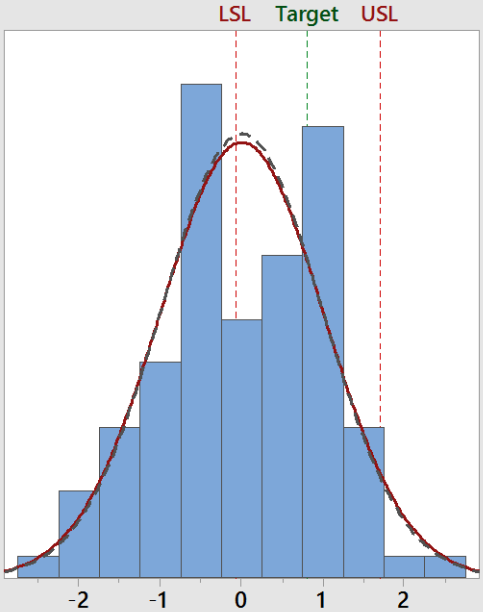
Process Data	
LSL	-0,0706324
Target	0,817059
USL	1,70475
Sample Mean	-4,87361e-010
Sample N	102
StDev(Overall)	1,00494
StDev(Within)	0,985535

Overall Capability	
Pp	0,29
PPL	0,02
PPU	0,57
Ppk	0,02
Cpm	0,23

Potential (Within) Capability	
Cp	0,30
CPL	0,02
CPU	0,58
Cpk	0,02

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	50,98	47,20	47,14
% > USL	1,96	4,49	4,18
% Total	52,94	51,69	51,33



Process Capability Report for Turno 2, noche, admin

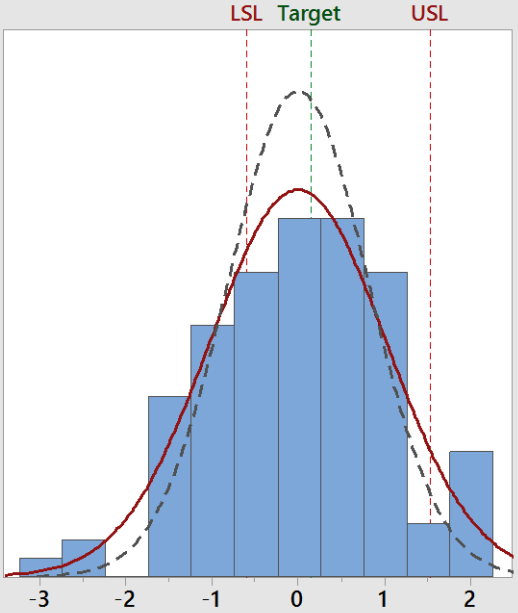
Process Data	
LSL	-0,594752
Target	0,139729
USL	1,5314
Sample Mean	-0,0114407
Sample N	111
StDev(Overall)	1,02509
StDev(Within)	0,816597

Overall Capability	
Pp	0,35
PPL	0,19
PPU	0,50
Ppk	0,19
Cpm	0,24

Potential (Within) Capability	
Cp	0,43
CPL	0,24
CPU	0,63
Cpk	0,24

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	27,93	28,47	23,75
% > USL	7,21	6,62	2,94
% Total	35,14	35,08	26,69



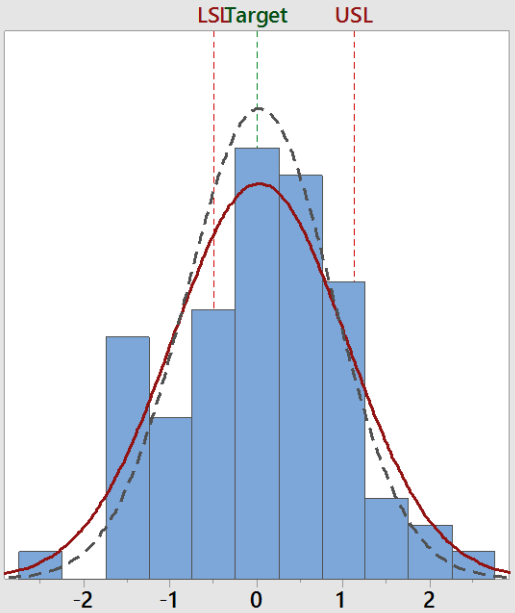
Process Capability Report for Turno 3, noche, admin

Process Data	
LSL	-0,492248
Target	0,00955208
USL	1,13576
Sample Mean	0,0264197
Sample N	74
StDev(Overall)	1,00524
StDev(Within)	0,845271

Overall Capability	
Pp	0,27
PPL	0,17
PPU	0,37
Ppk	0,17
Cpm	0,17
Potential (Within) Capability	
Cp	0,32
CPL	0,20
CPU	0,44
Cpk	0,20

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	29,73	30,29	26,97
% > USL	8,11	13,49	9,47
% Total	37,84	43,78	36,44



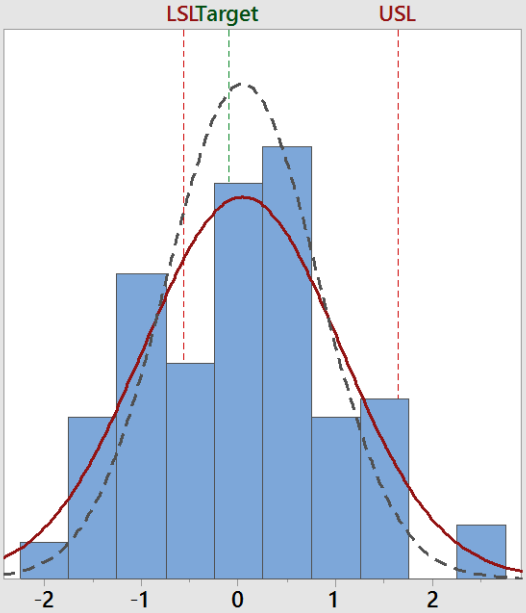
Process Capability Report for Turno 4, noche, admin

Process Data	
LSL	-0,574056
Target	-0,104602
USL	1,64224
Sample Mean	0,0382796
Sample N	108
StDev(Overall)	1,01474
StDev(Within)	0,78274

Overall Capability	
Pp	0,36
PPL	0,20
PPU	0,53
Ppk	0,20
Cpm	0,15
Potential (Within) Capability	
Cp	0,47
CPL	0,26
CPU	0,68
Cpk	0,26

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	28,70	27,31	21,70
% > USL	4,63	5,70	2,02
% Total	33,33	33,01	23,72



Process Capability Report for Turno 1, día, no admin, moda 1

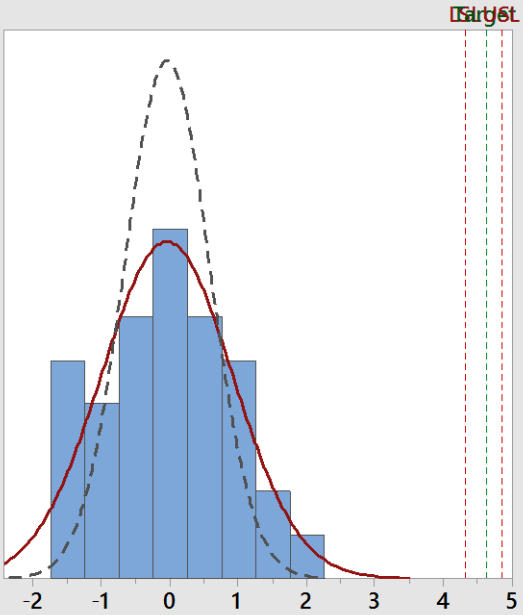
Process Data	
LSL	4,32147
Target	4,62555
USL	4,86084
Sample Mean	-0,0502526
Sample N	37
StDev(Overall)	0,957147
StDev(Within)	0,622103

Overall Capability	
Pp	0,09
PPL	-1,52
PPU	1,71
Ppk	-1,52
Cpm	0,02

Potential (Within) Capability	
Cp	0,14
CPL	-2,34
CPU	2,63
Cpk	-2,34

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	100,00	100,00	100,00
% > USL	0,00	0,00	0,00
% Total	100,00	100,00	100,00



Process Capability Report for Turno 1, día, no admin, moda 2

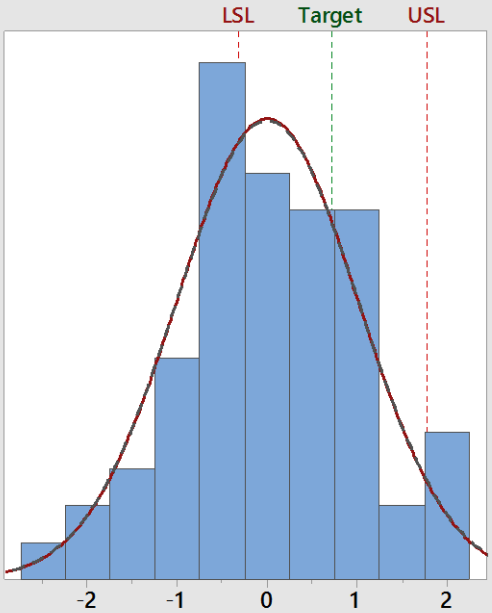
Process Data	
LSL	-0,320614
Target	0,726493
USL	1,7736
Sample Mean	1,99449e-010
Sample N	63
StDev(Overall)	1,00803
StDev(Within)	1,0121

Overall Capability	
Pp	0,35
PPL	0,11
PPU	0,59
Ppk	0,11
Cpm	0,28

Potential (Within) Capability	
Cp	0,34
CPL	0,11
CPU	0,58
Cpk	0,11

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	41,27	37,52	37,57
% > USL	4,76	3,92	3,99
% Total	46,03	41,45	41,56



Process Capability Report for Turno 2, día, no admin

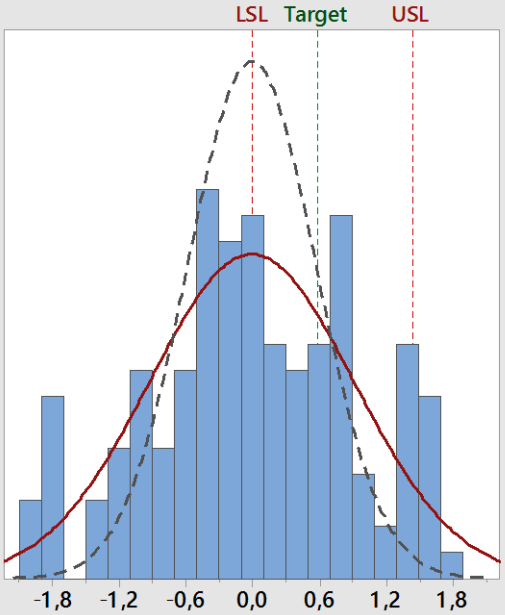
Process Data	
LSL	0,001 9844
Target	0,577546
USL	1,42822
Sample Mean	-0,00643893
Sample N	144
StDev(Overall)	0,921182
StDev(Within)	0,577258

Overall Capability	
Pp	0,26
PPL	-0,00
PPU	0,52
Ppk	-0,00
Cpm	0,18

Potential (Within) Capability	
Cp	0,41
CPL	-0,00
CPU	0,83
Cpk	-0,00

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	52,08	50,36	50,58
% > USL	7,64	5,97	0,65
% Total	59,72	56,33	51,23



Process Capability Report for Turno 3, día, no admin, moda 1

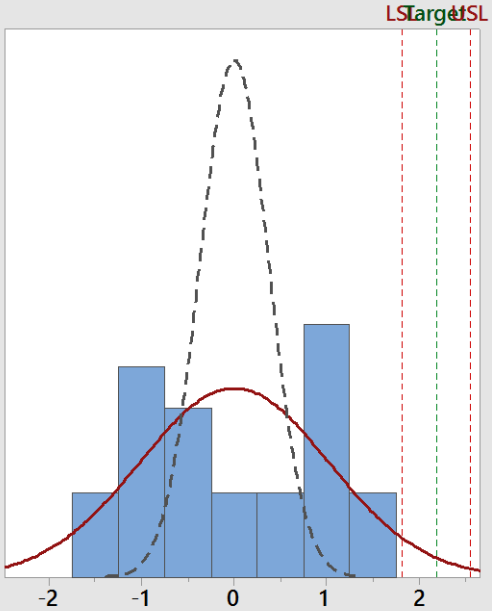
Process Data	
LSL	1,81676
Target	2,18414
USL	2,55152
Sample Mean	-1,59732e-007
Sample N	23
StDev(Overall)	1,02247
StDev(Within)	0,374191

Overall Capability	
Pp	0,12
PPL	-0,59
PPU	0,83
Ppk	-0,59
Cpm	0,05

Potential (Within) Capability	
Cp	0,33
CPL	-1,62
CPU	2,27
Cpk	-1,62

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	100,00	96,22	100,00
% > USL	0,00	0,63	0,00
% Total	100,00	96,85	100,00



Process Capability Report for Turno 3, día, no admin, moda 2

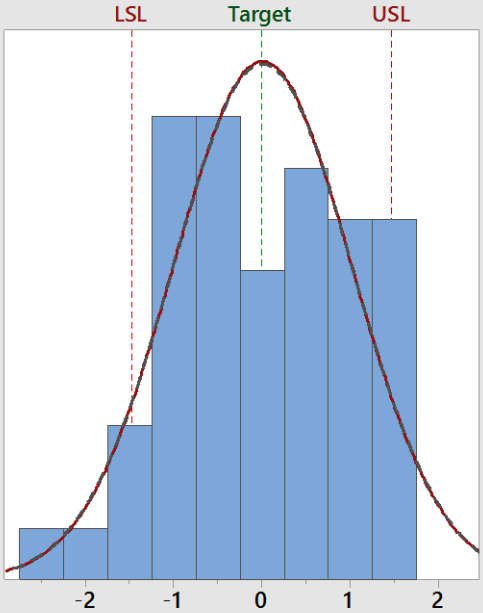
Process Data	
LSL	-1,48304
Target	-0,00792514
USL	1,46719
Sample Mean	-1,44619e-009
Sample N	51
StDev(Overall)	1,00995
StDev(Within)	1,01501

Overall Capability	
Pp	0,49
PPL	0,49
PPU	0,48
Ppk	0,48
Cpm	0,49

Potential (Within) Capability	
Cp	0,48
CPL	0,49
CPU	0,48
Cpk	0,48

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	7,84	7,10	7,20
% > USL	5,88	7,31	7,42
% Total	13,73	14,41	14,62



Process Capability Report for Turno 4, día, no admin, moda 1

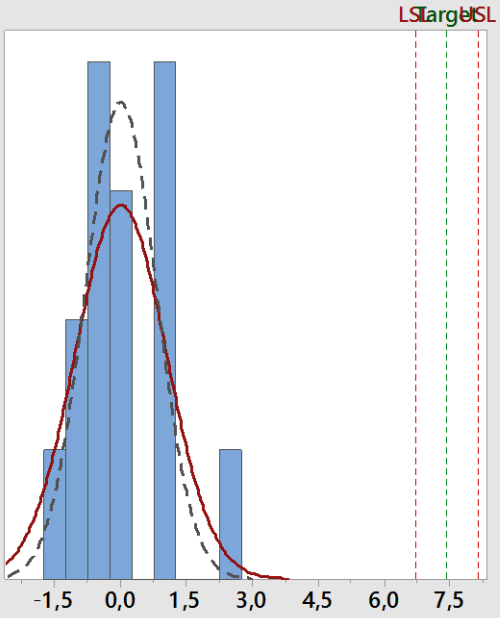
Process Data	
LSL	6,72639
Target	7,43576
USL	8,14513
Sample Mean	4,72916e-010
Sample N	15
StDev(Overall)	1,0351
StDev(Within)	0,812579

Overall Capability	
Pp	0,23
PPL	-2,17
PPU	2,62
Ppk	-2,17
Cpm	0,03

Potential (Within) Capability	
Cp	0,29
CPL	-2,76
CPU	3,34
Cpk	-2,76

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	100,00	100,00	100,00
% > USL	0,00	0,00	0,00
% Total	100,00	100,00	100,00



Process Capability Report for Turno 4, día, no admin, moda 2

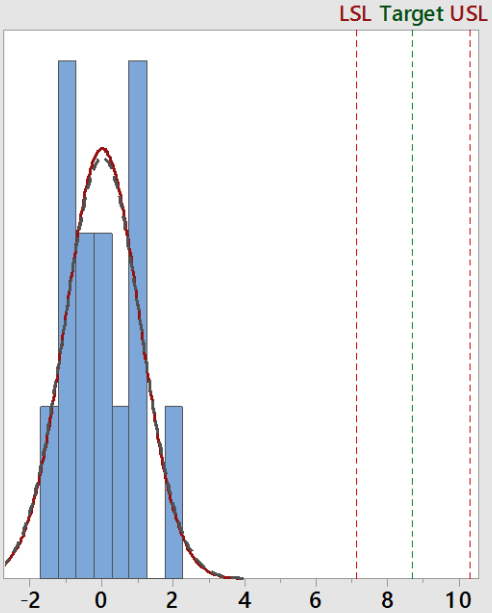
Process Data	
LSL	7,12041
Target	8,70739
USL	10,2944
Sample Mean	-1,22075e-009
Sample N	13
StDev(Overall)	1,04083
StDev(Within)	1,06272

Overall Capability	
Pp	0,51
PPL	-2,28
PPU	3,30
Ppk	-2,28
Cpm	0,06

Potential (Within) Capability	
Cp	0,50
CPL	-2,23
CPU	3,23
Cpk	-2,23

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	100,00	100,00	100,00
% > USL	0,00	0,00	0,00
% Total	100,00	100,00	100,00



Process Capability Report for Turno 4, día, no admin, moda 3

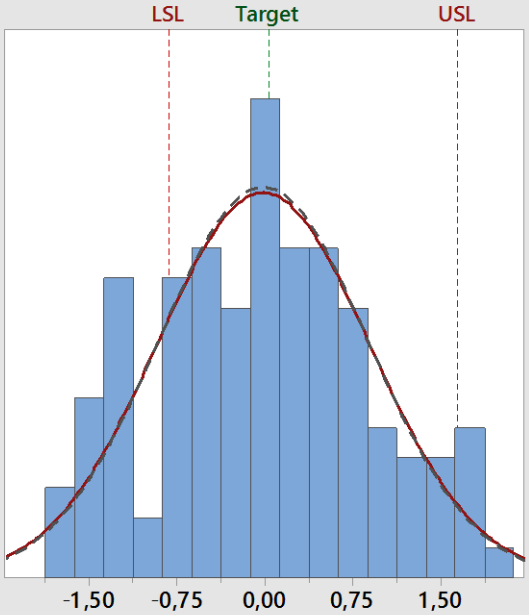
Process Data	
LSL	-0,814139
Target	0,0364913
USL	1,64872
Sample Mean	-0,016844
Sample N	117
StDev(Overall)	0,907355
StDev(Within)	0,894896

Overall Capability	
Pp	0,45
PPL	0,29
PPU	0,61
Ppk	0,29
Cpm	0,31

Potential (Within) Capability	
Cp	0,46
CPL	0,30
CPU	0,62
Cpk	0,30

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	18,80	18,98	18,65
% > USL	4,27	3,32	3,14
% Total	23,08	22,30	21,78



Process Capability Report for Turno 1, noche, no admin

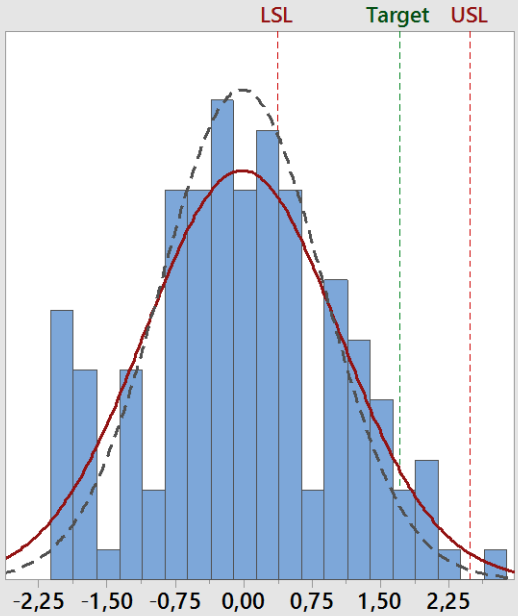
Process Data	
LSL	0,369229
Target	1,70142
USL	2,48172
Sample Mean	-0,0282163
Sample N	146
StDev(Overall)	1,0652
StDev(Within)	0,888786

Overall Capability	
Pp	0,33
PPL	-0,12
PPU	0,79
Ppk	-0,12
Cpm	0,13

Potential (Within) Capability	
Cp	0,40
CPL	-0,15
CPU	0,94
Cpk	-0,15

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	66,44	64,55	67,26
% > USL	0,68	0,92	0,24
% Total	67,12	65,47	67,50



Process Capability Report for Turno 2, noche, no admin

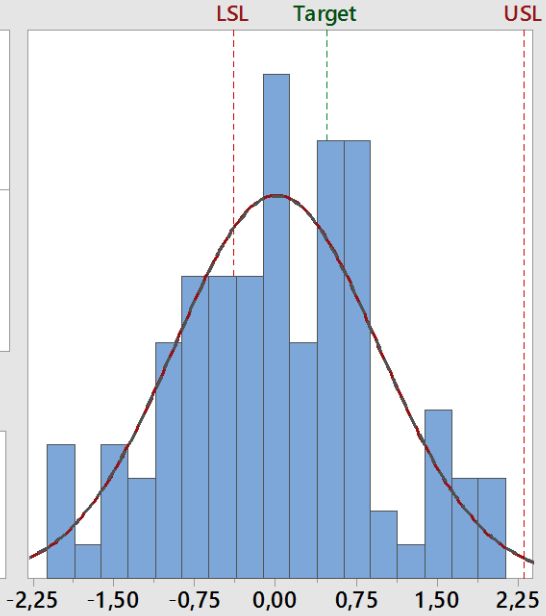
Process Data	
LSL	-0,396058
Target	0,473282
USL	2,28946
Sample Mean	0,00233014
Sample N	108
StDev(Overall)	0,945704
StDev(Within)	0,947916

Overall Capability	
Pp	0,47
PPL	0,14
PPU	0,81
Ppk	0,14
Cpm	0,27

Potential (Within) Capability	
Cp	0,47
CPL	0,14
CPU	0,80
Cpk	0,14

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	34,26	33,68	33,71
% > USL	0,00	0,78	0,79
% Total	34,26	34,46	34,51



Process Capability Report for Turno 3, noche, no admin

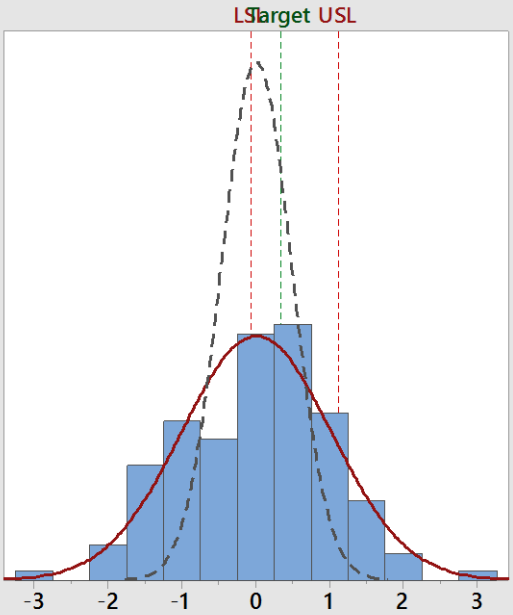
Process Data	
LSL	-0,0707548
Target	0,333171
USL	1,10769
Sample Mean	0,00441503
Sample N	141
StDev(Overall)	1,01406
StDev(Within)	0,478021

Overall Capability	
Pp	0,19
PPL	0,02
PPU	0,36
Ppk	0,02
Cpm	0,13

Potential (Within) Capability	
Cp	0,41
CPL	0,05
CPU	0,77
Cpk	0,05

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	43,97	47,05	43,75
% > USL	12,06	13,83	1,05
% Total	56,03	60,88	44,80



Process Capability Report for Turno 4, noche, no admin, moda1

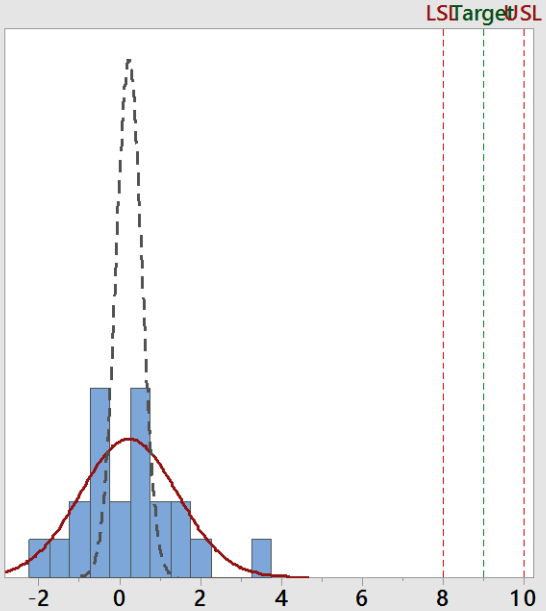
Process Data	
LSL	8
Target	9
USL	10
Sample Mean	0,205576
Sample N	22
StDev(Overall)	1,20341
StDev(Within)	0,321398

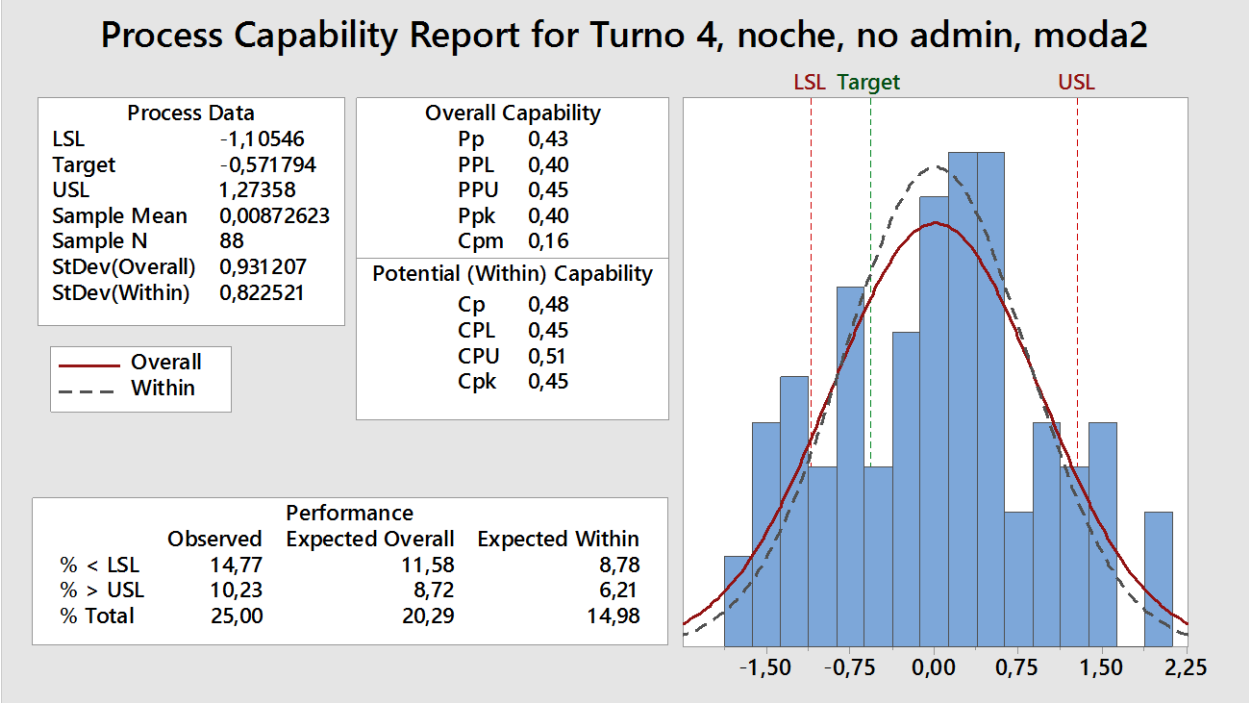
Overall Capability	
Pp	0,28
PPL	-2,16
PPU	2,71
Ppk	-2,16
Cpm	0,04

Potential (Within) Capability	
Cp	1,04
CPL	-8,08
CPU	10,16
Cpk	-8,08

Overall
Within

Performance	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	100,00	100,00	100,00
% > USL	0,00	0,00	0,00
% Total	100,00	100,00	100,00




Process Capability Report for Turno 4, noche, no admin, moda2
Process Data
LSL -1,10546
Target -0,571794
USL 1,27358
Sample Mean 0,00872623
Sample N 88
StDev(Overall) 0,931207
StDev(Within) 0,822521
Overall Capability
Pp 0,43
PPL 0,40
PPU 0,45
Ppk 0,40
Cpm 0,16
Potential (Within) Capability
Cp 0,48
CPL 0,45
CPU 0,51
Cpk 0,45
Overall
Within
Performance
Observed
Expected Overall
Expected Within
% < LSL 14,77 11,58 8,78
% > USL 10,23 8,72 6,21
% Total 25,00 20,29 14,98
LSL
Target
USL
-1,50
-0,75
0,00
0,75
1,50
2,25

B. Ecuaciones y tabulaciones

B-1. Definición de prueba Anderson-Darling

El estadístico A se define como:

$$A^2 = -n - S$$

Donde S se calcula de la siguiente forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \frac{2i-1}{n} \left[ln\left(F(Y_i)\right) + ln\left(1 - F(Y_{n+1-i})\right) \right]$$

Siendo:

F: La función de distribución acumulada

n: El tamaño de la muestra

$\{Y_1 < ... < Y_n\}$: Los datos del muestreo debidamente ordenados.

Los valores críticos para distribución Weibull y Valor extremo mínimo/máximo están tabulados a continuación según el nivel de significancia "α".

α	0,1	0,05	0,025	0,01
$\mathbf{A^2_{Crit}}$	0,637	0,757	0,877	1,038

Ref: D'Agostino and Stephens, 1986, Table 4.17, p.146

B-2. Función de distribución acumulativa para Valor extremo mínimo y su función inversa

Función de distribución acumulativa:

$$F(x) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{\omega - x}{\varphi}\right)}}$$

Función de distribución acumulativa inversa:

$$F^{-1}(x) = \varphi * ln\left(-ln(1, -x)\right) + \omega$$

B-3. Desglose de impactos por iniciativa y por caso para cada tipo de falla

		Sistema experto			Reentrenamiento operadores			Protocolo transversal			Implementación conjunta		
Falla	**Frecuencia relativa porcentual**	**Pesimista**	**Medio**	**Optimista**	**Pesimista**	**Medio**	**Optimista**	**Pesimista**	**Medio**	**Optimista**	**Pesimista**	**Medio**	**Optimista**
Espera camión	42,92%	5%	10%	15%				41%*	66%*	83%*	46%	76%	98%
Variabilidad operacional	28,76%	30%	50%	70%	10%	25%	30%				40%	75%	100%
Picando bolón	8,55%				5%	10%	15%	5%	8%	10%	10%	18%	25%
Falla eléctrica	6,78%				10%	15%	20%				10%	15%	20%
Falla mecánica	4,72%				10%	15%	20%				10%	15%	20%
Detector de metales	3,98%										0%	0%	0%
Desalineamiento	2,21%										0%	0%	0%
Pullcord	1,77%										0%	0%	0%
Stock alto	0,29%	50%	70%	90%	20%	30%	40%	0%	0%	0%	70%	100%	100%
Impacto		1,23%	2,12%	3,01%	0,51%	1,11%	1,39%	2,04%	3,26%	4,07%	3,77%	6,49%	8,46%
Esperanza de impacto			2,12%			1,05%			3,19%			6,36%	

**Estimación basada en resultados de ensayo de carga realizado por Ingeniero Senior de Operación chancado, Oscar Leiva Sanhueza.*

C. Información Software Minitab

Producto licenciado para:
Administrador, BHP Billiton

Producto instalado:
Minitab® 17.1.0

Componentes instalados:

- Language Pack - English: 17.1.0.0
- Licensing: 17.1.0.0
- Core: 17.1.0.0

© 2013 Minitab Inc. Todos los derechos reservados.

MINITAB® y el logo de MINITAB® son marcas de Minitab Inc. Todas las otras marcas referenciadas permanecen propiedad de sus respectivos dueños.

Porciones de este producto fueron creadas usando LEADTOOLS © 1991-2004, LEAD Technologies, Inc. Todos los derechos reservados.