

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



CONTROL OPERATIVO DE LOS METROS DE AVANCE POR DISPARO

MEDIANTE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

AUTORES

Espinoza Picoy, Frank Wilder

Carreño Rosales, Joseph Antony

ASESOR:

Gala Soldevilla, Luis Fernando

Lima, agosto, 2022

Informe de Similitud

Yo, LUIS FERNANDO GALA SOLDEVILLA,

docente de la Facultad de CIENCIAS E INGENIERÍA de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

“CONTROL OPERATIVO DE LOS METROS DE AVANCE POR DISPARO MEDIANTE LA METODOLOGÍA LEAN SIX SIGMA”,

de los autores

FRANK WILDER ESPINOZA PICOY,

JOSEPH ANTONY CARREÑO ROSALES,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 24/02/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 24 de febrero de 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>GALA SOLDEVILLA LUIS FERNANDO</u>	
DNI: 09997663	FIRMA: 
ORCID: 0000-0001-6147-5630	

RESUMEN

El presente proyecto de mejora continua denominado “Control Operativo de los metros de avance por disparo mediante la metodología Lean Six Sigma” se llevó a cabo en una unidad minera con una empresa contratista especializada en soluciones de gestión integral de operaciones para minería y construcción. Durante sus operaciones mineras en la preparación, desarrollo y explotación de los frentes de trabajo, se ha realizado evaluaciones en el proceso de perforación y voladura, como resultado de ello se identificó una alta variabilidad en los metros de avance por disparo. Esto dificulta que se cumpla el metraje mensual programado por Empresa Empleadora, generando penalidades y menores ingresos a los establecidos. El presente estudio tiene como objetivo el desarrollo y aplicación de la herramienta de gestión Lean Six Sigma para reducir la variación en el cumplimiento de avance diario, específicamente ejecutar los metros de avance programados. Este proyecto se desarrolló a inicios del mes de octubre del año 2020 estableciendo un período de 7 meses para su ejecución y se usó la metodología DMAIC que consta de 5 etapas las cuales son definir, medir, analizar, mejorar y controlar.

En primer lugar y como punto de partida en la etapa definir, los gerentes corporativos de la contratista identificaron que la empresa dejó de valorizar \$512,203.16 dólares solo en partida de metros de avance en un periodo de 6 meses (junio-noviembre), luego del reinicio de operaciones. Producto de ello se formó un equipo multidisciplinario conformado por el gerente de operaciones, el jefe de perforación y voladura, el Black belt Frank Espinoza, el Green belt Joseph Carreño, las jefaturas de las áreas de mantenimiento y operaciones mina para ejecutar un proyecto de mejora continua para revertir la situación. Además, se ejecutó el análisis pre-proyecto de un mapeo de participantes clave en el cual se evaluó a 25 personas de la operación de las cuales 5 tuvieron una posición inicial en contra del proyecto, 3 a favor y 17 neutrales. El proyecto consistió

en incrementar los ingresos optimizando la calidad y eficiencia de los metros de avance por disparo, ya que la problemática operativa inicial fue que el 63% del total de disparos en el periodo de mayo-octubre, de una población de 618 disparos, estaban fuera de la especificación. Esto quiere decir que fueron disparos con una eficacia menor a 3,4 metros de avance. Por ello se hizo un análisis por nivel de procesos con el fin de identificar aquel proceso e indicador clave para mejorar la problemática operativa de la operación dando como resultado un proceso de nivel 03 (perforación y voladura) con el KPI metros de avance por disparo (m./disp).

Luego en la etapa medir, después de identificar el proceso clave (perforación y voladura), se realizó un diagrama SIPOC y un mapeo de procesos para identificar todas las variables de entrada y salida, con el fin de clasificar, detallar y obtener toda la información cuantitativa y cualitativa necesaria para el posterior análisis del proyecto; asimismo, se desarrolló un análisis de la matriz CT donde se obtuvo que el KPI metros de avance por disparo tiene el mayor impacto en el proceso y que el alcance del proyecto va a estar ligado a las actividades de perforación de taladros y secuenciamiento. Paralelo a ello, se realizó una tabla de análisis de modo de efectos y falla (FMEA) identificando 4 ítems con riesgo alto de 12 cuyo objetivo fue prevenir algún inconveniente o retrasos en el proyecto, planteando acciones recomendadas. Como entregable final de esta etapa medir se procesó la data del KPI metros de avance por disparo, se verificó que tenga una distribución normal y esté en control para luego obtener la capacidad de proceso. El resultado final fue una capacidad inicial del proceso del 54,27%. Esto quiere decir que solo 114 voladuras de 210 ejecutadas en el mes de octubre del 2020, cumplen con los requerimientos del cliente en base al KPI metros de avance por disparo.

En la etapa analizar se tuvo como objetivo incrementar la capacidad de proceso encontrando las variables Xs más significativas. Para ello se realizó un diagrama Ishikawa, luego

se evaluó las variables preliminares cualitativas (turno, guardia y operadores) en un diagrama de efectos principales de los cuales el que tiene mayor variabilidad en los metros de avance por disparo es la variable operadores con un peso del 76% a comparación de las otras variables (pareto de efectos). Posteriormente, se obtuvo como resultado final que los operadores generan un 49,98% de variabilidad en los metros de avance por disparo resultado del análisis ANOVA. Asimismo, se evaluó las variables preliminares cuantitativas (Burden, diámetro de taladros, número de taladros) mediante un análisis con regresiones. Como resultado final de este análisis se obtuvo como mejor modelo la combinación de Burden (cuadrático) y número de taladros (cuadrático) con un R-cuadrado ajustado de 79,72%. Esto quiere decir que el 79,72% de la variación en los metros de avance por disparo pueden ser explicados por el modelo generado con la regresión.

Identificadas las variables significativas se inicia la etapa mejorar en el periodo de enero y febrero con un enfoque en rediseñar el diseño de malla con nuevos parámetros para el Burden y el número de taladros. Para ello se realizó un diseño de experimento en la primera quincena de enero cuyas pruebas fueron de dos factores (Burden y número de taladros), cada factor de dos niveles 25 cm y 35 cm para el Burden y 30 y 44 para el número de taladros ejecutándose 3 réplicas. El objetivo fue obtener disparos mayores a 3,40 metros de avance. La configuración optima final de este experimento fue un Burden de 25 cm con 44 taladros, ya que este burden genera una buena rotura y hace cara libre correctamente, además, el número de taladros distribuidos correctamente darán un buen avance por disparo, resultado de ello disparos de 3,40 metros. Luego de la implementación de la prueba piloto (DOE) se decidió estandarizar el diseño de malla bajo los nuevos parámetros de Burden y número de taladros. Los resultados fueron positivos para la empresa ya que la capacidad del proceso en enero y febrero fueron 59,7% y 71,9% respectivamente, esto quiere decir que, a comparación de los resultados de noviembre, con una capacidad de proceso 42,7%, hubo

reducción del porcentaje fuera de especificación en 51%. Así mismo, se realizó una evaluación económica de costo-beneficio del proyecto sin piloto y con piloto con un wacc del 6% y una proyección a diciembre del 2021, cuyo resultado fue que al corte del mes de julio el proyecto tiene un valor actual neto (VAN) de \$71,571.21. Este resultado muestra la rentabilidad adicional o el valor agregado que le da ejecutar el proyecto aplicando un capex inicial de \$24 000 por salarios y materiales de oficina y un capex de \$3 000 dólares en enero como inversión en la ejecución del DOE.

Finalmente, en la etapa controlar, se buscaron las herramientas correctas para entregar el proyecto de mejora al dueño del proceso en este caso al jefe de perforación y voladura. El control del KPI metros de avance por disparo se empezó a ejecutar con una frecuencia por guardia con supervisión en campo y de manera semanal a través de gráficos de control. Todo ello con la finalidad de analizar los resultados semanales en reuniones de calidad. Además, se ha implementado el ranking por operadores en la cual los mejores 3 operadores al mes respecto al KPI metros de avance por disparo recibirán un bono. Los resultados durante todo el proyecto de mejorar han sido favorables y el proceso en el mes de abril y mayo ya estaba entrando en control debido a una baja desviación estándar entre las mediciones de metros de avance por disparo.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Antecedentes	2
1.2.	Justificación.....	5
1.3.	Objetivos	6
1.4.	Hipótesis de la Investigación.....	7
1.5.	Formulación del Problema	7
1.6.	Delimitación de la Investigación.....	8
1.7.	Plan de Trabajo.....	9
2.	MARCO TEÓRICO	10
2.1.	Operaciones Unitarias del Ciclo de Minado	10
2.1.1.	Perforación:.....	11
2.1.2.	Voladura:.....	15
2.2.	Control Estadístico y Lean Six Sigma.....	19
2.3.	Balanced Scorecard	22
2.4.	Variables de Análisis Económico	24
3.	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DMAIC EN EL CASO DE ESTUDIO.....	27
3.1.	Etapa Definir	27
3.1.1.	Información General	28
3.1.2.	Definición del Problema	29
3.1.3.	Justificación del Problema	31
3.1.4.	Mapa de Participantes Clave.....	34
3.1.5.	Análisis Stakeholders.....	35
3.1.6.	Diagrama SIPOC	36
3.1.7.	Six Pack Summary.....	38

3.2.	Etapa Definir	39
3.2.1.	Identificación del KPI.....	39
3.2.2.	Análisis FMEA:	45
3.2.3.	Detalle estadístico del KPI.....	46
3.3.	Etapa Analizar	54
3.3.1.	Análisis Ishikawa	55
3.3.2.	Análisis gráfico de efectos principales	57
3.3.3.	Análisis de supuestos de ANOVA.....	59
3.3.4.	Análisis de varianza (ANOVA).....	62
3.3.5.	Análisis de regresión.....	64
3.4.	Etapa Mejorar	67
3.4.1.	Estado actual acciones tomadas FMEA:.....	68
3.4.2.	Evaluación de las soluciones planteadas:	69
3.4.3.	Implementación de la prueba piloto (DOE).....	70
3.4.4.	Ejecución de la prueba piloto (DOE).....	73
3.4.5.	Resultados fase mejora	80
3.5.	Etapa Controlar	85
3.5.1.	Sostenimiento de mejora	85
3.5.2.	Formato plan de control.....	87
3.5.3.	Resultado antes y después de la mejora.....	88
3.5.4.	Estandarizar los cambios	95
4.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	96
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
5.1.	Conclusiones	99
5.2.	Recomendaciones.....	100
	BIBLIOGRAFÍA	101
	ANEXOS	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Plan de Trabajo	9
Tabla 2 Equipos de Perforación	14
Tabla 3 Tipos de Flujo	26
Tabla 4 Participantes del Proyecto	34
Tabla 5 Análisis de Stakeholders	36
Tabla 6 Análisis de matriz CT nivel 2	40
Tabla 7 Análisis de matriz CT nivel 3	40
Tabla 8 Matriz de modos de falla y análisis de efecto (FMEA)	44
Tabla 9 Prueba de bondad de ajuste (prueba de distribuciones)	49
Tabla 10 Resultados Estadísticos del supuesto normalidad	59
Tabla 11 Resultados Estadísticos del supuesto independencia de datos	60
Tabla 12 Resultados Estadísticos de análisis ANOVA (P-value;0%)	62
Tabla 13 Resultados Estadísticos de análisis ANOVA (R-sq;49.98%).....	63
Tabla 14 Resultados estadísticos de análisis de regresión (Combinatoria variables Xs)	65
Tabla 15 Resultados estadísticos de análisis de ANOVA (P-value;0%)	66
Tabla 16 Resultados estadísticos de análisis de ANOVA (R-sq;79.72%)	66
Tabla 17 Análisis FMEA	68
Tabla 18 Evaluación de Soluciones	69
Tabla 19 Implementación de prueba piloto	70
Tabla 20 Resultados de las 12 voladuras	78
Tabla 21 Plan de control para N° de taladros perforados por disp. y m. avance por disparo	88
Tabla 22 Evaluación Económica ingresos	96

Tabla 23 Detalle de costos directos de un metro de avance por disparo	97
Tabla 24 Evaluación Económica costos	98
Tabla 25 Evaluación Económica valor actual neto del proyecto	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfica 1 Cadena de Valor	9
Gráfica 2 Ciclo de Minado	10
Gráfica 3 Malla de Perforación	13
Gráfica 4 Clasificación de Materiales Peligrosos	17
Gráfica 5 Efectos de la detonación de explosivos y propiedades técnicas	17
Gráfica 6 Parámetros para la eficiencia y estabilidad de explosivos	18
Gráfica 7 Six Sigma	20
Gráfica 8 Balanced Scorecard	23
Gráfica 9 Valorización Programada vs Ejecutada	29
Gráfica 10 Niveles del Proceso	31
Gráfica 11 Gráfica de Control (Línea Base)	32
Gráfica 12 Gráfica de Control (Mes Octubre)	32
Gráfica 13 Mapa de Participantes Clave	35
Gráfica 14 Organigrama de Participantes Clave	35
Gráfica 15 Diagrama SIPOC del Proceso de Perforación	36
Gráfica 16 Six Pack Summary	38
Gráfica 17 Mapeo de procesos de Perforación y Carguío de explosivos	41
Gráfica 18 Identificación de las variables Ys del subproceso perforación de taladros	42

Gráfica 19 Identificación de las variables Ys del subproceso Secuenciamiento	42
Gráfica 20 Histograma poblacional mayo – octubre	47
Gráfica 21 Histograma poblacional octubre	47
Gráfica 22 Histogramas muestras aleatorias a un n=45 y n=30 de m/disparo	48
Gráfica 23 Histograma muestra aleatoria a un n=30 y parámetros estadísticos de m./disparo	50
Gráfica 24 Gráfica de control before/after de m./disparo mayo-setiembre y octubre	51
Gráfica 25 Histograma de m./disparo período octubre (valores dentro y fuera de especificación)	53
Gráfica 26 Análisis Resumen del indicador metros de avance por disparo	53
Gráfica 27 Esquema de la Etapa Analizar	55
Gráfica 28 Análisis Ishikawa	56
Gráfica 29 Análisis en el Minitab de la variabilidad de metros de avance	57
Gráfica 30 Análisis de Pareto de efectos principales (Variabilidad metros de avance)	58
Gráfica 31 Análisis de varianzas iguales de la variable operadores de jumbo	61
Gráfica 32 Supuestos a verificar para la validación de ANOVA	62
Gráfica 33 Análisis ANOVA de la variable operadores de jumbo	63
Gráfica 34 Análisis Regresión de variables: Burden, Taladros y Diámetro de taladros	64
Gráfica 35 Gráfica de control del KPOV m/disparo período mayo – octubre 2020	71
Gráfica 36 Detalle de Plan de Pruebas	72
Gráfica 37 Gráfica de Regresión m/disparo respecto al burden	74
Gráfica 38 Diseño de Burden – Lopez Jimeno	75
Gráfica 39 Diseño de Burden – Konya	75

Gráfica 40 Gráfica de regresión m/disparos respecto al Nro de taladros ejecutados	76
Gráfica 41 Clasificación de variables Burden y Nro de taladros DOE (factores y niveles) ...	77
Gráfica 42 Diseño de arranque Burden 25 cm	77
Gráfica 43 Malla de perforación con Burden 25 cm	77
Gráfica 44 Diseño de arranque Burden 35 cm	77
Gráfica 45 Malla de perforación con Burden 35 cm	77
Gráfica 46 Gráfica de interacción entre Burden y Nro de taladros	79
Gráfica 47 Gráfica 2D de líneas de contorno de interacción entre Burden y nro de taladros	79
Gráfica 48 Diseño de Malla	80
Gráfica 49 Distribución Energética	80
Gráfica 50 Implementación Prueba Piloto	81
Gráfica 51 Planes de actividades a realizar	82
Gráfica 52 Gráfica de control período Octubre – Febrero	82
Gráfica 53 Resumen de media de metros de avance por disparo	83
Gráfica 54 Porcentaje fuera de especificación	83
Gráfica 55 Resumen Capacidad del Proceso	84
Gráfica 56 Dashboard de control de los metros de avance en Power BI	85
Gráfica 57 Flujo de control de los metros de avance por disparo	86
Gráfica 58 Reunión de calidad de los resultados metros avance por disparo con el gerente de operaciones, jefe de perforación voladura y residente de obra	86
Gráfica 59 Gráfica de control de KPI metros de avance por disparo desde octubre 20 hasta mayo 21 con límites de especificación de la data mensual	88

Gráfica 60 Gráfica de control de KPI metros de avance por disparo desde enero 21 hasta mayo 21 con límites de especificación según la voz del cliente	90
Gráfica 61 Gráfica de rango movable de KPI metros de avance por disparo desde enero 21 hasta mayo 21	90
Gráfica 62 Gráfica de intervalo de confianza 95% de la media en períodos semanales	91
Gráfica 63 Boxplots semanal del mes de enero por guardias A, B, C	91
Gráfica 64 Boxplots semanal del mes de febrero por guardias A, B, C	92
Gráfica 65 Boxplots semanal del mes de marzo por guardias A, B, C	93
Gráfica 66 Boxplots semanal del mes de abril por guardias A, B, C	94
Gráfica 67 Boxplots semanal del mes de mayo por guardias A, B, C	94
Gráfica 68 Estándar Corporativo de diseño de malla	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Sustento del supuesto de normalidad de los op. Cesar y Eduardo - etapa analizar	107
Anexo 2 Sustento del supuesto de normalidad de los op. Jemmy y Joel - etapa analizar	107
Anexo 3 Sustento del supuesto de normalidad de los op. Jose y Luis - etapa analizar	108
Anexo 4 Sustento del supuesto de normalidad de los op. Marco y Quiñones - analizar	108
Anexo 5 Sustento del supuesto de normalidad de los op. Ramon y River - analizar	109
Anexo 6 Sustento estadístico de variable Burden (lineal)	110
Anexo 7 Sustento estadístico de variable número de Burden (cuadrático)	111
Anexo 8 Sustento estadístico de variable número de número de taladros (lineal)	112
Anexo 9 Sustento estadístico de variable número de número de taladros (cuadrático)	113
Anexo 10 Sustento estadístico de variable número de diámetro de taladros (lineal)	114

Anexo 11 Sustento estadístico de las variables Burden y número de taladros	115
Anexo 12 Sustento estadístico de las variables Burden y diámetro de taladros	116
Anexo 13 Sustento estadístico de las variables número de taladros y diámetro de taladros	117
Anexo 14 Sustento estadístico de las variables Burden, número de taladros y diámetro de taladros	118
Anexo 15 Imagen de mejora en el pintado de malla – frente	119
Anexo 16 Imagen de mejora en el pintado de malla – arranque	119
Anexo 17 Imagen de mejora en técnicas de perforación	120
Anexo 18 Imagen del resultado óptimo del diseño de experimento (DOE) – 12/01/21 SN 850_S	120
Anexo 19 Imagen del resultado óptimo del diseño de experimento (DOE) – 17/01/21 CX 934_W	121
Anexo 20 Imagen del resultado óptimo del diseño de experimento (DOE) – 24/01/21 SN 868_S	121

1. INTRODUCCIÓN

En toda mina subterránea, es muy importante llevar un adecuado control de la producción, preparación y desarrollo de mina. En estas últimas, los procesos clave del ciclo de minado son las operaciones unitarias de perforación y voladura. Por lo que identificar la principal falencia que se esté generando en estas operaciones resulta fundamental y de gran impacto en la productividad y rentabilidad de la empresa. Y el presente caso de estudio, es un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente, ya que en el período 2020 la empresa contratista, encargada de ejecutar desarrollo y preparación, solo cumplió con el 62% de los metros de avance programados por deficiencias en el ciclo de minado, principalmente en las operaciones de perforación y voladura, en una mina polimetálica ubicada en la región de Pasco. Los indicadores clave que tuvieron mayor impacto en el porcentaje de cumplimiento de entrega de metros de avance de la empresa son: metros de avance por disparo y el número de disparos por día (Álvarez, 2020).

Es por esta razón que la presente tesis busca mejorar y reducir la variabilidad del número de metros de avance y número de disparos de los procesos clave (perforación y voladura) a través de la metodología DMAIC con el fin de solucionar los problemas que se generaron en el 2020 e impactaron en la productividad y rentabilidad de la empresa. Por ello el presente trabajo de investigación se ha estructurado en 5 capítulos.

El capítulo 2 (marco teórico), cubren los aspectos necesarios para la comprensión de términos estadísticos, económicos, financieros, mineros usados a lo largo de la investigación.

En el capítulo 3 se desarrolla la metodología DMAIC del caso estudio la cual consiste en el desarrollo de las etapas Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos y desarrolla el análisis y evaluación económica.

Finalmente, en el capítulo 5 se manifiesta las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

1.1. Antecedentes

Si bien la experiencia aplicada para dar solución a los problemas operativos del ciclo de minado que se presentan en los procesos es importante, se requiere complementar esto con sustentos técnicos, herramientas de gestión y análisis estadísticos, para optimizar los KPIs que impactan en la productividad, eficacia y rentabilidad de la operación (Ortega, 2019). Por ende, el punto de partida para realizar la presente investigación surge de la necesidad de una metodología que permita a la empresa gestionar y optimizar sus procesos del ciclo de minado, que a su vez impactan en los ingresos.

A partir de ello se busca implementar la metodología Lean Six Sigma en las operaciones unitarias (Perforación y Voladura) con la finalidad de reducir la variabilidad de los indicadores clave que tienen mayor impacto directo con respecto a los ingresos de la empresa (Anchiraico, 2020) (Infantas, 2021).

Según los antecedentes indagados respecto a la investigación “Incremento de Ingresos con la reducción de la variabilidad de los metros de avance por disparo y del número de disparos por día aplicando la Metodología Lean Six Sigma” se pudo recopilar fuentes de información (tesis), entre los más importantes se tiene los siguientes:

Cruz Ccahuana (2019) en su tesis para optar el título profesional de ingeniero de minas, Optimización del Proceso de Perforación Primaria con el Método Lean Six Sigma en la Unidad Minera Antapaccay; menciona: “ A partir de la implementación de cartillas de control y reduciendo la variabilidad de las demoras, se logró un aumento en la utilización de

perforadoras primarias con un aumento del sigma del proceso usando el método Lean Six Sigma, de igual manera se identificó que las demoras programadas y demoras no programadas no estaban bajo un sistema de control, también se identificó que el estado de Stand By de las perforadoras primarias no afecta en gran escala a la utilización de las perforadoras primarias, entonces podremos decir que haciendo uso de la metodología Lean Six Sigma se pudo aumentar la utilización de las perforadoras primarias en la Unidad Minera Antapaccay” Este trabajo indica la importancia de la implementación de la metodología Lean Six Sigma, con el fin de incrementar la rentabilidad, optimizando la utilización de los equipos en el proceso de perforación primaria. Es por ello que esta metodología tiene un atractivo para la mejora continua y gestión de procesos.

Chuquín Orihuela, Farro Yamaguchi, Valdivia Díaz, (2018) en su tesis para optar el grado de magister en administración estratégica de empresas, Diagnóstico operativo de la Empresa ABC; menciona: “ABC ha requerido optimizar sus operaciones con el objetivo de potencializar su rentabilidad para lo cual se ha llevado a cabo un Diagnóstico Operativo Empresarial (DOE). Se han propuesto 15 oportunidades de mejora, dentro de las que destacan: (a) mejorar el avance por disparo a 50% > 2.7m en el primer año y a 75% > 2.7m en el segundo año; (b) implementar una política de mantenimiento correctivo 30% y mantenimiento preventivo 70%, (c) encontrar un proveedor alternativo de brocas y barras de perforación, y (d) renovar 50% de la flota de jumbos con jumbos de dos brazos. Con estas medidas se espera lograr un incremento de la utilidad bruta de 754k USD/año en el primer año y 718k USD/año en el segundo año.” Esta investigación nos demuestra que para una empresa cuyo Core de negocio son los avances, el indicador más importante es el avance por disparo. Como resultado

en esta investigación hubo un incremento en la productividad y buena calidad de servicio brindado lo cual se considera importante para afianzar la satisfacción del cliente.

Quiroz Alegría (2016) en su tesis para optar el grado de magíster en gestión y dirección de empresas de la industria minera, Implementación de Metodología Lean en Minería Subterránea – Estudio de Caso Esmeralda ; menciona: “En la implementación y resultados de la metodología LEAN aplicados en uno de los sectores productivos en la Gerencia de Minas de División El Teniente, en la mina Esmeralda, se obtuvieron resultados relevantes en términos de productividad, costos, KPIs y por supuesto cumplimiento de metas del plan minero” Este trabajo nos muestra los beneficios obtenidos al aplicar LEAN en una operación minera, dado que se genera una nueva estructura y lógica de operación basado en una cultura de desempeño que se refleja en una mayor utilización de activos, reducción de costos de operación y cumplimiento en los planes de producción mediante la gestión y seguimiento de KPI.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se comprueban los beneficios obtenidos al aplicar LEAN en una operación minera, dado que se genera una nueva estructura y lógica de operación basado en una cultura de desempeño que se refleja en una mayor utilización de activos, reducción de costos de operación y cumplimiento en los planes de producción mediante la gestión y seguimiento de KPI.

1.2. Justificación

Las razones por el cual se ha elegido el presente tema a investigar involucran un aspecto técnico y económico.

1.2.1. Justificación Técnica

Normalmente en minería, el enfoque para dar solución a un problema es la experiencia, si bien es importante, se requiere de sustentos técnicos, herramientas de gestión y análisis estadísticos.

El estudio técnico se realiza con el fin de sustentar con un análisis estadístico y herramientas de gestión, las variables clave del incumplimiento de metros de avance. Entre ellas las de mayor impacto están en los operadores, parámetros de diseño de malla y conocimientos técnicos de la operación.

Adicional a ello, es importante conocer el aspecto técnico con respecto a la implementación de nuevas tecnologías (equipos de perforación) en un nuevo proyecto, con el fin de optimizar el ciclo de minado.

1.2.2. Justificación Económica

La presente investigación, a través de la implementación de la metodología de gestión Lean Six Sigma busca reducir costos y generar mayores ingresos en un corto período de tiempo, logrando así, una mejor eficiencia en los procesos y mayor rentabilidad en la empresa.

Una de las principales razones por la aplicación de esta metodología es a razón de que la empresa dejó valorizar \$5 472 000 en el período 2020, solo en partida de metros de avance, debido al incumplimiento de la entrega al 100% de metraje programado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General del Proyecto:

Incrementar los ingresos mensuales de la empresa en la partida de valorización de avances para el año 2021 respecto al 2020.

1.3.2. Objetivos Específicos del Proyecto:

- Definir y determinar los factores que tienen mayor incidencia en los ingresos del proyecto.
- Disminuir la variabilidad de metros de avances por disparo e incrementar el número de disparos por día.
- Reducir la variación en el cumplimiento del avance diario.
- Medir la capacidad del proceso (C_p) a estudiar en el presente proyecto
- Analizar las variables independientes (X_s) que impactan en la eficiencia del número de disparos por guardia realizados y los metros de avance por disparo ejecutados.
- Establecer planes de mejora y pruebas piloto para incrementar el número de disparos por guardia y los metros de avance por cada disparo.
- Controlar que los planes de mejora sean sostenibles en el tiempo.
- Comparar la capacidad de proceso inicial (2020) vs capacidad de proceso a futuro (2021) y llevarlo a una evaluación económica.

1.4. Hipótesis de la Investigación

La empresa generará mayores ingresos en el periodo 2021 con respecto al año 2020 al implementar la metodología DMAIC en el proceso de perforación y voladura para la reducción de la variación en el cumplimiento de las variables claves (número de disparos y metros de avance por disparo). Además, con la aplicación de Lean Six Sigma en el proyecto se alcanzará más del 85 % en el cumplimiento del metraje programado por la empresa empleadora.

1.5. Formulación del Problema

La inadecuada gestión de los recursos y desconocimiento de los subprocesos clave del ciclo de minado son los principales obstáculos para crear valor a la empresa. Por lo tanto, surgen los siguientes cuestionamientos:

- **Pregunta General**

¿Cómo optimizar la variabilidad de los metros de avance por disparos e incrementar número de disparos por día con la metodología Lean Six Sigma en la Unidad Minera?

- **Preguntas específicas**

- ¿Implementar nuevas tecnologías sin un estudio previo aumentará la eficacia de los procesos?
- ¿De qué manera afecta la falta de conocimiento técnico-económico en la productividad y rentabilidad de la empresa?
- ¿Ejecutar una reingeniería a los diseños estándar de la mina generará una mejora en los procesos?

- ¿Cuáles son las variables clave de alto impacto para el cumplimiento de metraje de avances programado?

1.6. Delimitación de la Investigación

El sector minero comprende una serie de actividades y/o procesos que generan valor; a nivel macro este conjunto de actividades forman parte de la cadena de valor de un sector o empresa organizacional (Ramírez, 2020). El enfoque de la presente investigación se centra en dos subprocesos de la actividad minera (Etapa de Explotación), las operaciones unitarias de Perforación y Voladura, donde se encuentran los factores clave que influyen en la variación de los metros de avance diario (Problemática de la tesis). Si bien estas operaciones constan de muchas actividades y/o tareas como pintado de malla y arranque, perforación de taladros, limpieza de taladros, carguío de explosivos, amarre y voladura, entre otros, se requiere de una metodología que permita analizar la causa raíz de los problemas operativos para mejorar los procesos.

Por ende, nuestro tema de análisis va enfocado a realizar una propuesta de mejora utilizando la Metodología Lean Six Sigma en los procesos de Perforación y Voladura para reducir la variabilidad de los metros de avance por disparo e incrementar el número de disparos por día con el fin de incrementar los ingresos de la empresa.



Gráfica N°1: Cadena de valor

1.7. Plan de Trabajo

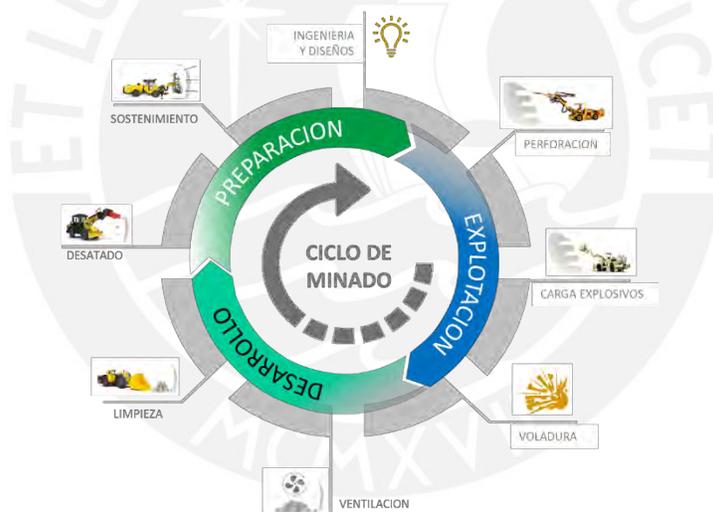
Tabla N°1: Plan de Trabajo

N°	ACTIVIDADES	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Coordinaciones para el acceso a la toma de datos en campo	X																			
2	Toma de datos y desarrollo del proyecto de mejora en campo		X	X	X																
3	Definición del estado actual del proceso (línea base)					X	X	X	X												
4	Análisis de datos para identificar la variable más significativa						X	X	X	X	X	X									
5	Aplicación de la mejora continua												X	X	X	X					
6	Redacción y revisión del informe												X	X	X	X	X	X	X	X	
7	Presentación del informe																				X

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Operaciones Unitarias del Ciclo de Minado

En la industria minera, la extracción o explotación del mineral se da mediante los métodos de minería a tajo abierto y subterránea. El presente caso de estudio tiene un enfoque de minería subterránea en el cual se ejecutan actividades para explotación, preparación y desarrollo de labores. Estas actividades pueden ser separadas en operaciones unitarias que se deben ejecutar en una secuencia definida, con el fin de generar labores de avances en interior mina. El conjunto de estas operaciones unitarias se denomina ciclo de minado (Imagen N°2) los cuales son perforación, voladura, ventilación, limpieza, desatado, sostenimiento (Bastidas, 2020).



Gráfica N°2: Ciclo de Minado

Fuente: Plan gestión de procesos excavaciones subterráneas 2021 v 1.0 – IESA

2.1.1. Perforación:

La perforación en minería subterránea se puede ejecutar de manera horizontal para frentes de avance o vertical para tajeos de mineral. En el presente informe de tesis se detallará la perforación horizontal ya que el caso de estudio involucra labores de desarrollo y preparación.

Esta operación unitaria es la que da inicio al ciclo de minado. Se realiza esta actividad perforando orificios cilíndricos (taladros de perforación) en la roca in-situ para que luego se inserten ahí los explosivos con el fin de fragmentar y se pueda extraer el mineral de explotación o preparación, o desmonte si es desarrollo. Para realizar el orificio es necesario que la mina disponga de equipos de perforación que generen energía. Los equipos a utilizar van a depender si la mina es mecanizada, semi-mecanizada o convencional. La aplicación de energía para perforar la roca se efectúa mediante 3 acciones; percusión, rotación y avance.

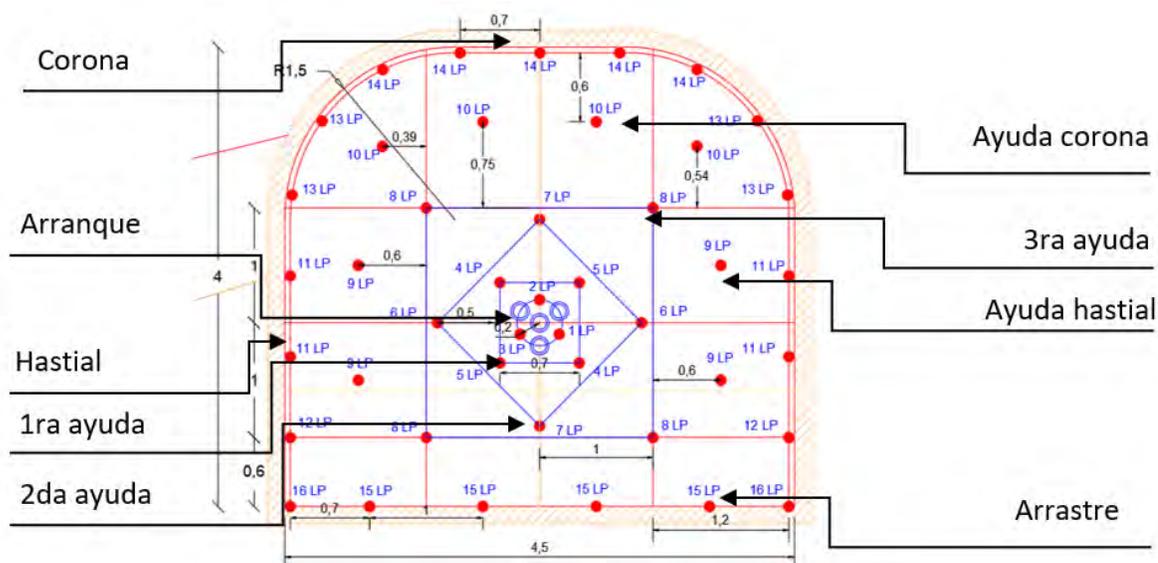
- Percusión: la energía es transmitida por efectos de impactos sucesivos de la broca de perforación hacia la roca penetrando a esta última.
- Rotación: la energía es aplicada a la roca haciendo rotar la broca de perforación conjuntamente con la acción de una fuerza de empuje.
- Avance: la energía es aplicada a la roca haciendo que la perforadora genere una fuerza de empuje que combinado con la percusión y rotación se genere un taladro de perforación (Chinchay, 2020).

- **Actividades de perforación**

La perforación de los taladros en los frentes de avance para labores de desarrollo y preparación en interior mina supone la ejecución de la siguiente secuencia de actividades:

- Planificación y programación de las labores a perforar.
- Entrega de órdenes de trabajo y mallas de perforación a los operadores de equipos de perforación
- Inspección de la zona de trabajo, verificando si la labor cuenta con gradiente y rasante (topografía)
- Inspección de condiciones inseguras en la zona de trabajos.
- Iniciar con el pintado de malla y arranque.
- Realizar check list (vuelta de gallo) a los equipos de perforación.
- Posicionamiento del boom del equipo (en cada taladro)
- Perforación (en cada taladro)
- Limpieza de detritos (en cada taladro)
- Verificar la calidad y cantidad de taladros perforados
- Retirar equipo del frente de trabajo

Un concepto importante para el desarrollo de este proceso es malla de perforación que es un diseño definido por el número de taladros a perforar, el espacio o distancia entre cada taladro (espaciamiento) y el método de secuenciamiento (Imagen N°3). El diseño de malla de perforación está compuesto por arranque, primera ayuda, segunda ayuda, tercera ayuda, ayuda hastial, ayuda de corona, hastial, corona y arrastre. Esta distribución por familia de taladros está diseñada para que al momento que detonen los explosivos fragmenten la roca con una granulometría definida. Cabe mencionar que cada taladro queda definido por su longitud de perforación y diámetro, estas características van a depender del tipo de roca a perforar, del tipo de equipo disponible en mina y del tipo de labor (Quispe, 2018).



Gráfica N°3: Malla de Perforación

Una de las características más importantes de una malla de perforación es el diseño de arranque cuyos parámetros son los siguientes:

- Burden: Distancia más próxima de la perforación del taladro de producción hacia la cara libre o taladro rimado.
- Espaciamiento: Distancia entre los taladros de producción que genera una distribución de los taladros en el frente de trabajo a explotar.

• **Equipos utilizados en perforación:**

La operación unitaria de perforación cuenta con una alta gama de equipos tanto para perforación vertical y horizontal. Según las características de la mina, dimensiones de las secciones de minado y los diseños de los tajos, el área de planeamiento selecciona y define los equipos más adecuados disponibles en el mercado.

Los equipos de perforación cuentan tanto con sistema mecánico, eléctrico e hidráulico. La velocidad de traslado promedio va de 20 – 30 km/h.

Los equipos de perforación más usados a nivel nacional son de las empresas Epiroc y Sandvik. A continuación, una breve descripción de las características de los equipos de las empresas mencionadas que licitaron para el proyecto que se está ejecutando en la mina del centro del Perú (Huamaní, 2008).

Tabla N°2: Equipos de Perforación

EQUIPOS DE PERFORACIÓN	CARACTERÍSTICAS	MEDIDAS
 <p>Boomer S1D (Epiroc)</p>	<p>Peso del equipo: 12,850 Kg Motor Diésel Deutz BF4L914 (72kW, TIER II) Tanque de Combustible: 60 L Sistema contraincendios ANSUL Capacidad bomba hidráulica: 12 bar, 66 l/m Valor de Venta: 490,000 USD</p>	<p>Longitud: 11,040 mm Ancho: 1,750 mm Altura: 2,828 mm Radio de Curvatura interno: 2,950 mm Radio de Curvatura externo: 4,950 mm</p>
 <p>DD311 (Sandvik)</p>	<p>Peso del equipo: 15,000 Kg Motor Diesel Deutz BF4M 2012 (70kW, TIER II) Tanque de Combustible: 90 L Sistema contraincendios ANSUL Capacidad bomba hidráulica: 15 bar, 33 l/m Valor de Venta: 530,000 USD</p>	<p>Longitud: 12,585 mm Ancho: 1,875 mm Altura: 3,100 mm Radio de Curvatura interno: 3,185 mm Radio de Curvatura externo: 6,290 mm</p>

Las características similares con las que cuenta estos equipos son que ambos tienen una barra de perforación de 14 pies, solo poseen un brazo, la cabina del operador es con techo protector retráctil para la adecuada ergonomía del operador al momento de realizar la perforación y para la protección del operador ante cualquier peligro de caída de rocas. Se presentó estos equipos debido a que, en el proyecto a analizar la empresa, encargada de ejecutarlo, solicitó cotizaciones de estos modelos de jumbos en las marcas EPIROC y SANDVIK en base al Término de Referencia de una licitación (TDR) enviado por la compañía minera (De Linan, 1994).

2.1.2. Voladura:

En la operación unitaria de voladura el traslado de explosivos desde el polvorín a los frentes de avance se debe realizar con todos los protocolos de seguridad con el fin de que la mina no genere ninguna tragedia por explosión. Es por ello que el traslado de accesorios de voladura se realiza separado al traslado de explosivos. Cuando el explosivo ya se encuentra en el frente de trabajo los maestros cargadores tiene la función de preparar el explosivo, si el carguío es con cartuchos se realiza cortes para una correcta adherencia al volumen del taladro, por otro lado, si es a granel es necesario de que la mina disponga de equipos de carguío de explosivos ya que se necesita inyectar este tipo de explosivo a los taladros de perforación. Estos equipos pueden ser anfoloaders (camiones con canastillas) o bomboneras. Además de ello es importante verificar que la labor o frente de trabajo tengo la presión de aire adecuada para inyectar el explosivo de los taladros a través de la manguera del equipo. A continuación, un listado de las actividades que se realizan en esta operación unitaria (Mestas, 2007).

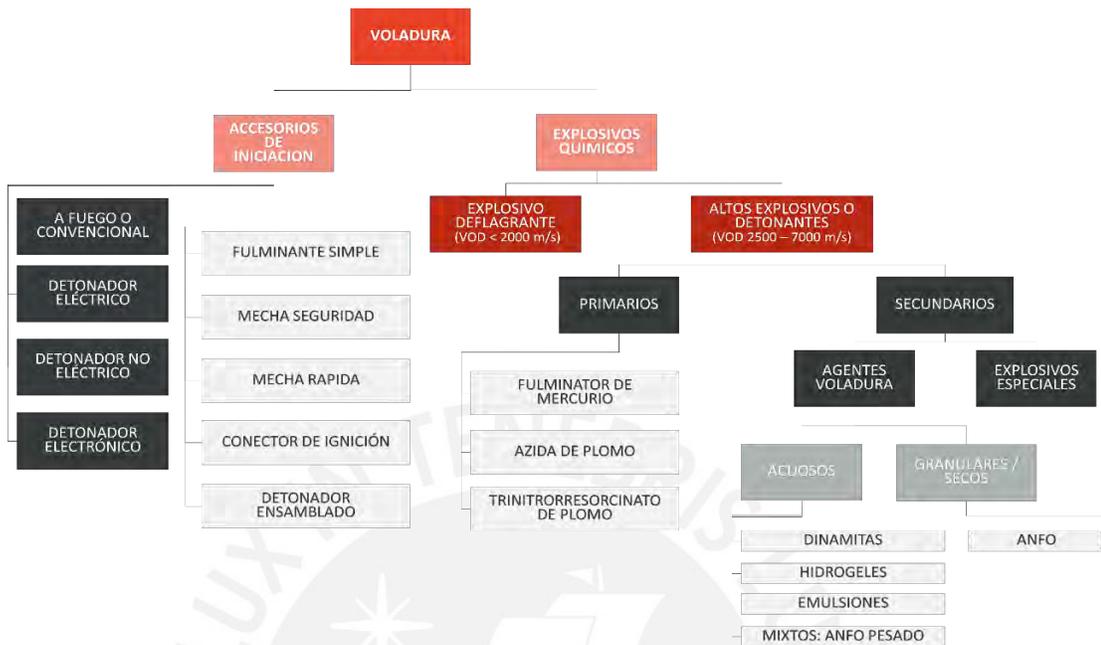
- **Actividades de voladura:**

- Planificación y programación de las labores a cargar.
- Entrega de órdenes de trabajo y mallas de carguio a los maestros cargadores y sus respectivos ayudantes
- Inspección de condiciones inseguras en la zona de trabajos.
- Inspección del equipo cargador (bombonera) y presión en la labor
- Iniciar con la preparación de los cebos (cartucho + fulminante) según secuenciamiento
- Verter el explosivo a granel (ANFO) a la bombonera

- Desate de rocas con barretilla
- Limpieza de los taladros con cucharilla
- Colocar los cebos en cada taladro según su secuenciamiento
- Inyectar el explosivo en cada taladro
- Unir todos los cordones detonantes en uno general para una distribución correcta
- Iniciar la voladura
- Retirarse del frente trabajo (Ramírez, 2020).

Se tomó de ejemplo el carguío con ANFO ya que la mina, donde se está ejecutando el caso de estudio, utiliza este tipo de explosivo. Sin embargo, en el mercado peruano existen distintas empresas (internacionales y nacionales) que ofrecen una variedad de explosivos y accesorios de voladura. Es por ello que se considera importante que se conozca la clasificación, los fundamentos, las propiedades y características de los explosivos.

• **Clasificación de los explosivos:**



Gráfica N°4: Clasificación de materiales explosivos a usar en la voladura

• **Propiedades y características de los explosivos**



Gráfica N°5: Efectos de la detonación de explosivos y propiedades técnicas

Como se puede observar tocar el tema de explosivos es un tema muy amplio. Sin embargo, para el tema de investigación se hondará más en las propiedades técnicas de eficiencia y estabilidad del explosivo las cuales son:



Gráfica N°6: Parámetros a evaluar para comparar eficiencia y estabilidad de explosivos

De todos los parámetros mencionados en la gráfica N°6 los más importantes son la velocidad de detonación (VOD), potencia explosiva y densidad de carga. Las diversas empresas que ofrecen sus productos de explosivos a las mineras muestran estos parámetros en sus catálogos.

- Velocidad de detonación: “es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo, y por tanto es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía.” (Manual Exsa). Es decir, es la propiedad más importante ya que cuanto más grande sea la velocidad mayor será la potencia del explosivo.
- Potencia explosiva: es cuán rápido el explosivo llega a tener su máxima presión.
- Densidad explosiva: este parámetro tiene influencia determinante sobre la velocidad de detonación y sensibilidad (Sánchez, 2012).

2.2. Control Estadístico y Lean Six Sigma

POBLACION Y MUESTRA

Población es el conjunto o totalidad de elementos de la investigación. Muestra es una parte o subconjunto de elementos que se seleccionan previamente de una población para realizar el estudio (Lilia, 2015).

HISTOGRAMA:

Un histograma es la representación gráfica (en forma de barras) de la distribución de un conjunto de datos (muestra o población). Cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores cuantitativos y continuos (Moore, 2005).

DISTRIBUCIÓN NORMAL:

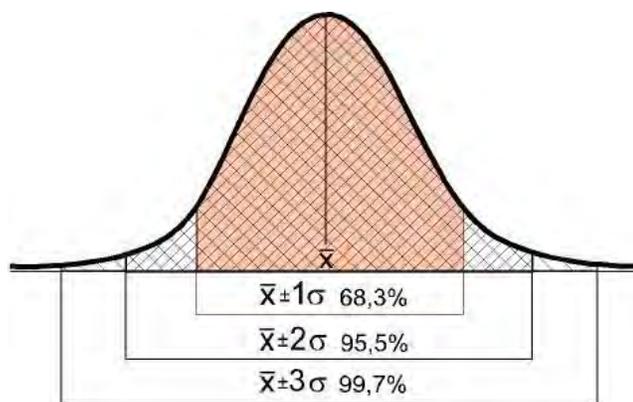
Distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana es una distribución de probabilidad de variable continua; es decir, que cuando se incrementa el número de experimentos o pruebas la representación del conjunto de datos se aproxima cada vez más a un histograma suave en forma de campana (Pértegas, 2001).

Entre sus principales propiedades:

- Es simétrica con respecto a la media
- Coinciden, la media, la mediana y la moda
- La distancia que hay entre la media al punto de inflexión es la desviación estándar

Entre sus parámetros están la media, la desviación estándar, entre otros:

- Media: Valor central de la distribución
 - Desviación Estándar: Medida de dispersión que nos indican que tan cerca o lejos están los datos con respecto a la media (σ)
 - Varianza: Medida de dispersión de los datos respecto a la media y se calcula con la desviación estándar al cuadrado (S), por ende, da resultados positivos.
 - Curtosis: Grado de concentración que presentan los datos respecto a la media
 - Intervalo de confianza: Nos va a permitir calcular dos valores alrededor de una media muestral (uno superior y otro inferior). Estos valores van a acotar un rango dentro del cual, con una determinada probabilidad, se va a localizar el parámetro poblacional.
- ✓ Si nos alejamos 1 desviación estándar a cada lado a partir de la media, se cubre aproximadamente el 68% de la población.
- ✓ Si nos alejamos 2 desviaciones estándar a cada lado a partir de la media, se cubre aproximadamente el 95% de la población.
- ✓ Si nos alejamos 3 desviaciones estándar a cada lado a partir de la media, se cubre aproximadamente el 99.73% de la población. (Six sigma)



Gráfica N°7: Six Sigma

LEAN SIX SIGMA

Es una metodología cuyo objetivo es mejorar los procesos, reducir la variabilidad de los procesos con el propósito de incrementar la rentabilidad y productividad de estos. Para ello, emplea una serie de herramientas estadísticas.

Lean Six Sigma emplea la metodología Six Sigma y una conjugación de herramientas Lean y estadísticas. Seis Sigma define cinco pasos fundamentales en el proceso de mejora de calidad, el Método DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar) marca el rumbo del funcionamiento del método. Con esta sucesión de pasos se consigue una mejora (Uribe, 2019).

R-Cuadrado (R²)

Se utiliza el R² para determinar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos. Mientras mayor sea el valor de R², mejor se ajustará el modelo a los datos. El R² siempre está entre 0% y 100%.

Se calcula como 1 menos la relación de la suma de los cuadrados del error (que es la variación que no es explicada por el modelo) a la suma total de los cuadrados (Urias, 2014).

P VALUE

En estadística, el P-Value es la probabilidad de obtener resultados al menos tan extremos como los resultados observados de una prueba de hipótesis estadística, asumiendo que la hipótesis nula es correcta. El P-Value se utiliza como una alternativa a los puntos de rechazo para proporcionar el nivel más pequeño de significancia en el que se rechazaría la hipótesis nula. Un P-Value más pequeño significa que hay pruebas más sólidas a favor de la hipótesis alternativa (Domenech, 2018).

GRAFICA DE CONTROL ESTADÍSTICO:

Una gráfica de control es un diagrama que sirve para examinar si un proceso se encuentra en una condición estable, o para asegurar que se mantenga en esa condición. En estadística, se dice que un proceso es estable (o está en control) cuando las únicas causas de variación presentes son las de tipo aleatorio y están dentro de las especificaciones.

La estructura de estas gráficas contiene una “línea central” (LC), una línea superior que marca el “límite superior de control” (LSC), y una línea inferior que marca el “límite inferior de control” (LIC). Los puntos contienen información sobre las lecturas hechas; pueden ser promedios de grupos de lecturas, o sus rangos, o bien las lecturas individuales mismas. Los límites de control marcan el intervalo de confianza en el cual se espera que caigan los puntos.

Uno de los softwares estadísticos más comunes utilizados en la industria es el Minitab (Carro, 2012).

2.3. Balanced Scorecard

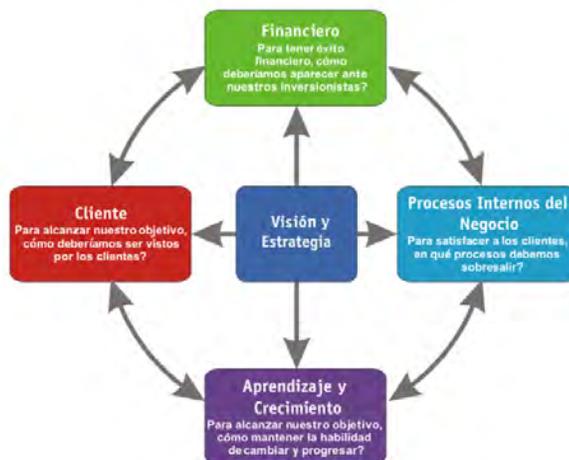
Es una metodología de gestión estratégica que posibilitan un seguimiento más concreto y detallado del plan estratégico de una empresa.

Es una metodología de gestión estratégica utilizada para definir y hacer seguimiento al plan estratégico de una organización. Esta metodología permite estructurar los objetivos estratégicos de forma dinámica e integral para ponerlos a prueba según una serie de indicadores corporativos que evalúan el desempeño de todas las iniciativas y los proyectos necesarios para lograr su cumplimiento satisfactorio (Fernández, 2001).

Los propósitos con los que se construye un Balanced Scorecard son:

- Describir y comunicar su estrategia.
- Medir su estrategia.

- Hacer un seguimiento de las acciones que se están tomando para mejorar sus resultados.



Gráfica N°8: Balanced Scorecard

KPIs Corporativos de la Empresa

Los KPI (Key Performance Indicators) o Indicadores Clave de Desempeño miden el nivel del desempeño de un proceso determinado de la empresa. Entre los KPIs corporativos de la empresa tenemos KPIs operativos, KPIs del cliente, KPIs Financieros (Benlloch, 2014).

Para el presente caso de estudio se establece lo siguiente:

- KPI Operativo: El indicador de metro de avances por disparo (Crecimiento y aprendizaje)
- KPI Procesos de Negocios Interno: Innovacion, cultura y personas.
- KPI Cliente: El indicador de metros entregados por mes (marketing, crecimiento de fidelidad)
- KPI Financiero: El indicador de \$ por mes que pasa la empresa empleadora (ventas por año y margen)

A partir de estos KPIs Financieros y del Cliente se identifican proyectos de mejora (Proyectos Lean Six Sigma)

2.4. Variables de Análisis Económico

INGRESOS

Se hace referencia a los ingresos cuando hay un valor económico que recibe la empresa por algún producto vendido o servicio realizado. Las compañías mineras trabajan con proveedores o empresas contratistas. Como ejemplo se tiene el presente caso de estudio ya que la empresa contratista ofrece servicios de desarrollos mineros por la cual percibe ingresos mensuales según los metros de avance que desarrolla (Tovio, 2016).

COSTOS

Los costos operativos es una parte muy importante para el negocio de la minería que todo ingeniero de minas debe de saber analizar, plantear mejoras en los procesos sobre todo aquellos que implican costos elevados y optimizarlos. Si se optimiza los costos por ende la rentabilidad de la empresa mejora y es lo que todo accionista o inversionista desearía obtener un mayor ingreso a bajo costo (Dammert, 2021). Los costos se clasifican de la siguiente manera:

- **Costos directos:** Según el libro de contabilidad de costos el autor hace referencia que el costo directo es todo el costo que tienen participación directa con la operación. Por ejemplo: En minería los costos directos pueden ser el costo de minado, costo de planta, costo de fundición, costo de refinación.
- **Costos indirectos:** Según el libro de contabilidad de costos el autor hace referencia que el costo indirecto es todo el costo que tienen participación indirecta con la operación. Por ejemplo: en minería los costos indirectos pueden ser gastos financieros, ventas o administrativos.

- Costos unitarios: “Un costo unitario, el cual también se denomina costo promedio, se calcula dividiendo el costo total entre el número de unidades relacionadas. Las unidades se podrían expresar en varias formas.” Afirma Horngren en el capítulo 2 de su libro contabilidad de costos (p.36)

FLUJO DE CAJA

El flujo de caja, o también llamado cash-flow o flujo de efectivo, es parte de los estados financieros complementarios de una empresa y se utiliza para realizar un análisis financiero histórico o futuro (proyecciones) durante el tiempo que se desee y que puede ser fraccionado mensual, trimestral, semestral o anual. Esta herramienta financiera indica todos los ingresos y egresos (gastos, costos) de dinero en efectivo (hace referencia a dinero físico o dinero en una entidad bancaria) que se da en un tiempo determinado. Según Ross en su libro de “Fundamentos de finanzas corporativas” en el capítulo Nro. 02 indica que es importante no confundir el flujo de efectivo con el capital de trabajo neto. (p. 28). El flujo de caja, con respecto a nuevos proyectos mineros, se enfoca en convertir la información técnica (leyes de los minerales, recuperaciones metalúrgicas, valor del mineral o net smelter return NSR, costos operativos, gastos administrativos e impuestos) de estos proyectos en dinero, además de que se estima el valor actual neto (VAN) o net present value (NPV) y la rentabilidad o tasa interna de retorno (TIR) (Bustamante, 2015).

La estructura de manera resumida es la siguiente:

<i>(+) Ingresos del periodo</i>
<i>(–) Inveriones del periodo</i>
<i>(–) Egresos del periodo</i>
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>
<i>Saldo del periodo</i>

Donde:

Los ingresos del periodo comprenden todo dinero generado de los productos o servicios que una empresa vende u ofrece. Este dato se obtiene del estado de ganancias y pérdidas. Para el caso de una mina el producto a vender puede ser el mineral de cabeza, mineral concentrado o mineral refinado esto va a depender del tipo de comercialización que tiene la empresa minera con su cliente. Se utiliza el valor del mineral NSR expresado en dólares por tonelada \$/tn y la cantidad de toneladas a comercializar en un cierto periodo de tiempo para calcular los ingresos.

Las inversiones del periodo comprenden todo el dinero que se invierte como CAPEX.

Los egresos del periodo comprenden todo el dinero que se invierte como OPEX.

Los tipos de flujos de caja se clasifican de la siguiente manera para el sector de minería:

Tabla N°3: Tipos de Flujo

TIPOS DE FLUJO DE CAJA			
	F.C. EMPRESA EN DESARROLLO	F.C. PROYECTO MINERO	F.C. DE TESORERÍA
OBJETIVO A DETERMINAR	Valor de una empresa	Rentabilidad	Análisis de efectivo de la empresa
PERIODO	Largo Plazo	Largo Plazo	Corto Plazo
INVERSION	No tiene CAPEX	CAPEX inicial (Año cero)	-
	No existe TIR	Si existe TIR	-

3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DMAIC EN EL CASO DE ESTUDIO

3.1. Etapa Definir

La primera etapa de la Metodología DMAIC, es la etapa de Definir en el que se definen los requerimientos del proveedor y cliente, y se realiza el diagnóstico del proceso. En esta etapa abarcamos los siguientes puntos:

- **Información general de la empresa:** El caso de estudio, antecedentes y objetivos luego de un análisis operativo y económico del año 2020.
- **Definición del Problema:** Incumplimiento del metraje de avance programado, por ende, pérdidas económicas solo en la partida de avances. El caso de estudio se delimita en 3 niveles para un mejor enfoque.
- **Justificación del problema:** Ineficiencia técnica y pérdida económica en base a 2 factores clave: número de disparos por guardia y metros de avance por disparo.
- **Mapa de participantes clave:** Se identificaron y definieron 5 participantes clave que tienen un alto impacto en el cambio y alta influencia en el proyecto (3 con apoyo al proyecto, 1 neutral y 1 oponente)
- **Análisis Stakeholders:** Se identifica, evalúa y analiza la posición neutral, en contra o favor de realizarse el proyecto de Lean Six Sigma.
- **Diagrama SIPOC:** Representación gráfica del proceso de gestión de la operación de Perforación y voladura identificando el Supplier (Proveedor), Inputs (Entradas), Process (Procesos), Output (Salida) y Customer (Cliente)
- **Six Pack Summary:** Resumen de la Etapa Definir en 6 puntos clave (Bacilio, 2018).

3.1.1. Información General

El presente Caso de Estudio abarca a una empresa contratista peruana que brinda soluciones en gestión integral de operaciones para minería y construcción.

Empresa con 65 años de experiencia, 52 millones USD en ventas promedio anual, 10 proyectos en licitación, 8 proyectos en operación y aproximadamente 1500 colaboradores.

- Antecedentes en Minería
 - Más de 300 km en preparaciones y desarrollos
 - Más de 100,000 m³ de shotcrete
 - Más de 2'000,000 m³ de relleno
 - Más de 5'000,000 tn de mineral roto
- Antecedentes en Construcción
 - Más de 25km en tunelería de aducción
 - Más de 500,000 m³ de concreto y shotcrete
 - Más de 500,000 m³ de movimiento de tierra

En el presente caso de estudio, se analiza el cumplimiento de entregas de labores de preparación y desarrollo en Mina, a la cual la empresa contratista brinda servicios desde octubre del 2019.

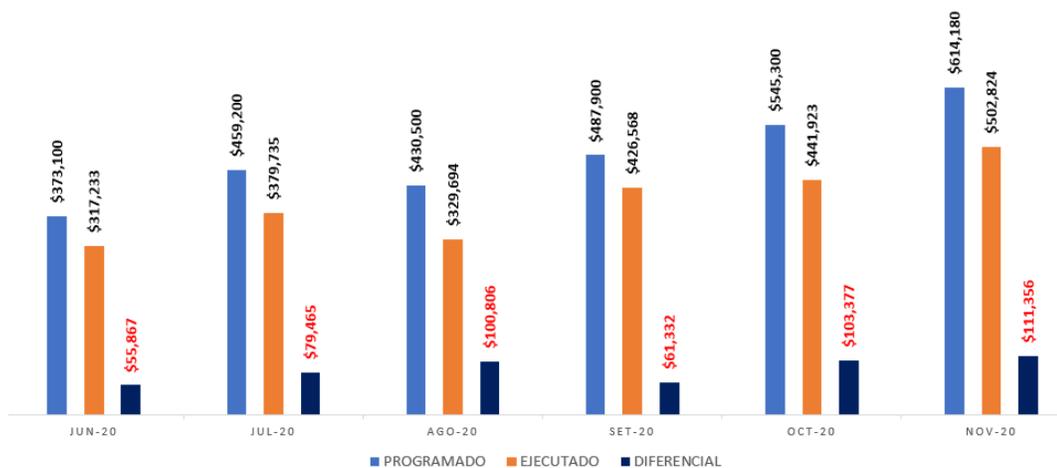
- Objetivos:

Luego de un análisis corporativo con enfoque operativo y económico en el proyecto en el año 2020 , la empresa contratista define los siguientes objetivos:

- Incrementar los ingresos del Budget para el 2021 respecto al 2020
- Incrementar la rentabilidad

- Reducir la variación en el cumplimiento de los metros de avance diario
- Entregar Trabajos de calidad al cliente

Gráfico N°9: Valorización Programada vs Ejecutada



3.1.2. Definición del Problema

A partir de la revisión de los KPIs corporativos (liquidez, productividad, ratio de endeudamiento e ingresos anuales) por parte de la Gerencia, se pudo definir que no se alcanzó la meta de ventas en el año 2020 debido al incumplimiento de metraje programado en la unidad minera de la Empresa Empleadora.

Para el año 2020, a partir del mes de junio 2020 (reinicio de operaciones) la empresa ha dejado de valorizar por temas operativos \$ 512, 203.16 solo en la partida de avances durante 6 meses.

- Delimitación de Estudio

Para determinar el alcance del proyecto de mejora utilizando la metodología Lean Six Sigma se delimitó los niveles de procesos desde un análisis a nivel macro hasta un nivel específico.

A continuación, se detalla lo mencionado:

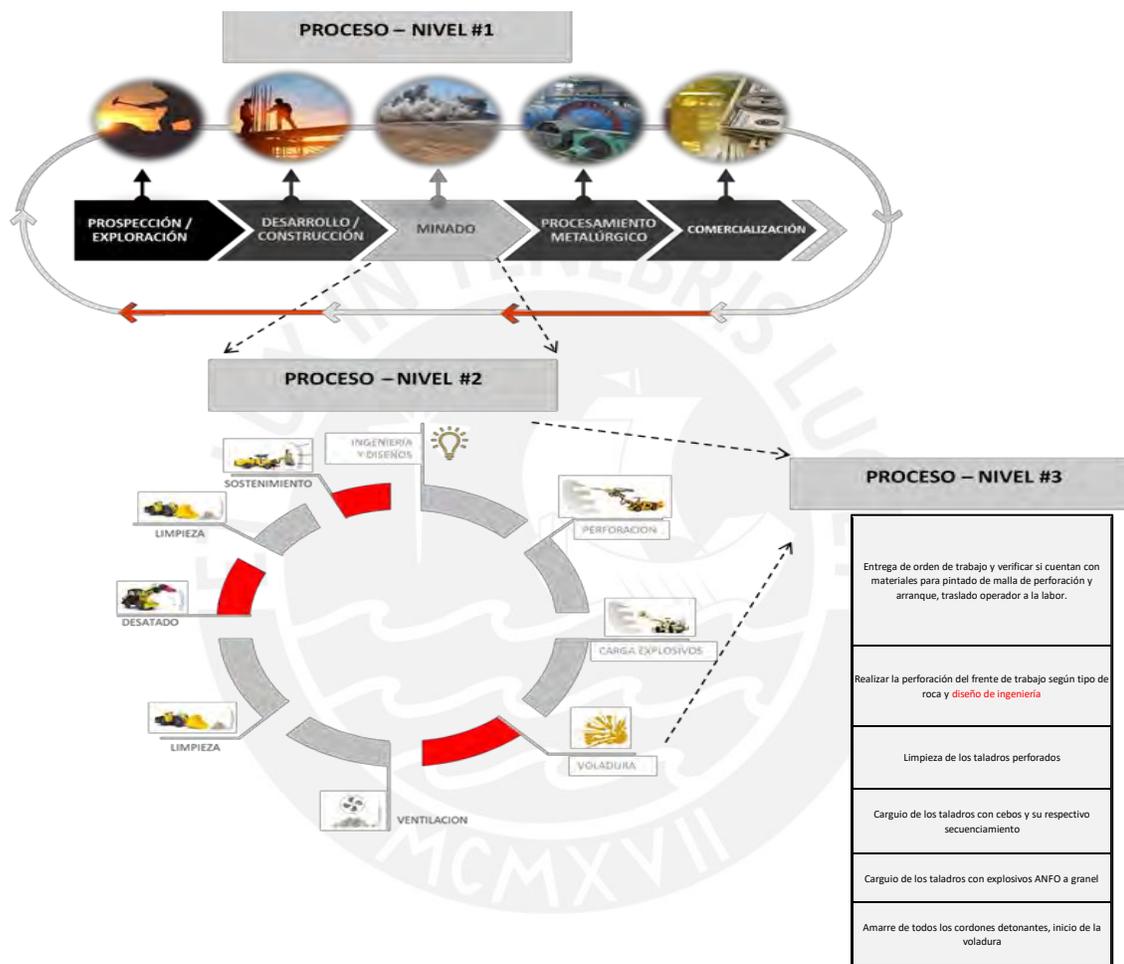


Gráfico N°10: Niveles del Proceso

Proceso Nivel 1: Para definir el problema se parte del panorama global, la cadena de valor, para lo cual nuestro presente caso de estudio se enfoca en la etapa de Minado, en la que la empresa contratista brinda servicios de desarrollo, preparación y explotación de frentes de avance.

Proceso Nivel 2: De la etapa de minado, el enfoque del presente estudio se da en las operaciones unitarias de Perforación y Voladura, donde se encuentran los factores clave que influyen en la variación de los metros de avance diario.

Proceso Nivel 3: De las Operaciones de Perforación y Voladura, se tiene un listado de las actividades y/o tareas que ayudarán a determinar el factor o factores con mayor incidencia en el problema. Para ello tenemos los siguientes: Pintado de malla de perforación y arranque, perforación de taladros, limpieza de taladros, carguío de taladros con cebos, carguío de taladros con explosivos ANFO a granel, amarre de los cordones detonantes e inicio de la voladura.

3.1.3. Justificación del Problema

El incumplimiento en los metros de avance diario es producto de una ineficiencia operativa. Esto se ve reflejado por 2 factores clave: Número de disparos por guardia y metros de avance por disparo que influyen en los metros de avance total y los ingresos por metro de avance al año. Para el presente estudio enfocaremos el factor clave “Metros de avance por disparo”.

- **Metros de Avance por disparo**

El caso de estudio considera información de datos desde el mes de febrero al Mes de Octubre del Año 2020. Para considerar la línea base se tomó en cuenta el período de octubre debido a que el período de mayo a setiembre tuvo alta variabilidad respecto al KPI (metros de avance por disparo) por la coyuntura del COVID-19.

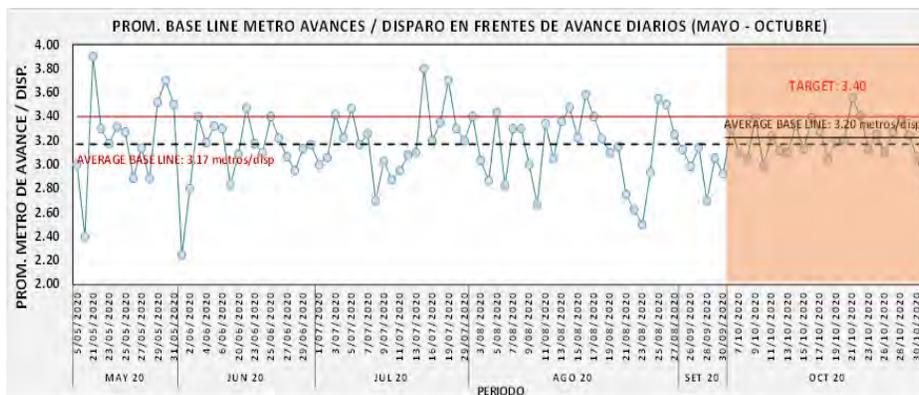


Gráfico N°11: Gráfica de Control (Línea Base)

Los metros lineales de avance promedio por disparo de la línea base son menores al programado (3.2 ml/disp. vs 3.40 ml/disp.)

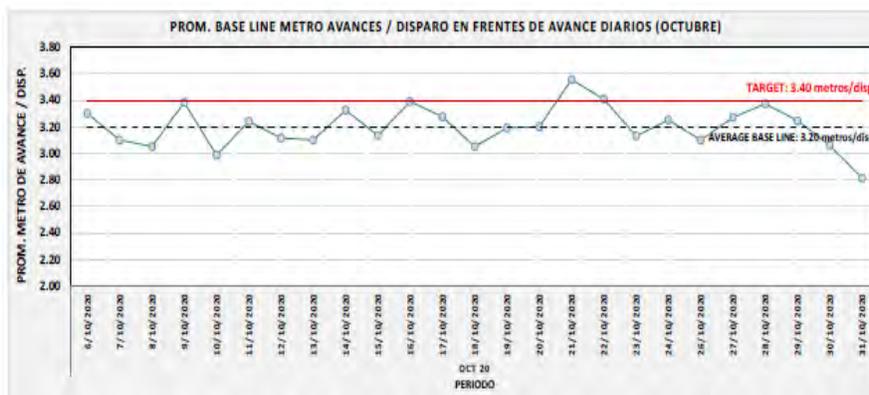


Gráfico N°12: Gráfica de Control (Mes Octubre)

En el presente proyecto se busca demostrar que a partir de implementar una mejora operativa (metros de avance/disparo) es posible incrementar los ingresos.

Tomando en cuenta el bajo performance de los metros de avance por disparo y su impacto en el cumplimiento del metraje mensual, se consideró realizar el presente caso de estudio aplicando la metodología Lean Six Sigma.

Como punto de partida se realizó un diagnóstico desde un enfoque técnico y económico.

A. Justificación Técnica

La ineficiencia operativa es una de las razones clave para realizar el estudio del presente caso, ya que no se logra cumplir con el metraje programado de avances mensual. El cumplimiento promedio es 62.75 % del objetivo.

$$\text{Programado} = 3.4 \frac{\text{ml}}{\text{disp}} \times 12 \text{ disp} \times 30 \text{ días} = 1224 \frac{\text{m. de avance}}{\text{mensual}}$$

$$\text{Ejecutado} = 3.2 \frac{\text{ml}}{\text{disp}} \times 8 \text{ disp} \times 30 \text{ días} = 768 \frac{\text{m. de avance}}{\text{mensual}}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{768 \text{ m.}}{1224 \text{ m.}} \times 100 \% = 62.75 \%$$

Con respecto a los metros de avance mensual programado y ejecutado, se puede observar que hay dos indicadores clave para la ineficiencia operativa, que son los metros de avance por disparo y el número de disparos por día. Para el presente caso de estudio debido a especificaciones de contrato (penalizaciones) sobre la calidad de entregar la labor el primero enfoque será evaluar y controlar los metros de avance por disparo.

B. Justificación Económica

De manera preliminar, considerando 10 disparos/día, si se ejecuta el proyecto con el objetivo de los metros de avance por disparo (3.4) la empresa contratista generaría ingresos mensuales adicionales de

$$\text{Valor} = (3.4 - 3.2) \frac{\text{m. de avance}}{\text{disparo}} \times \frac{10 \text{ disparos}}{\text{día}} \times \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} \times 574 \frac{\$}{\text{m. av.}} = \$ 34,440$$

3.1.4. Mapa de Participantes Clave

En este proceso se identificaron todos los participantes que están directa o indirectamente involucrados en el proyecto y se definió aquellos que tienen un alto impacto en el cambio y alta influencia en el proyecto (Participantes clave)

Tabla N°4: Participantes del Proyecto

CLASIFICACION	Nro	PUESTO	NOMBRE Y APELLIDO	IMPACTO	INFLUENCIA
EXTERNOS	1	GERENTE GENERAL IESA	ANDRES CHIAPORI	MEDIO	MEDIO
	2	GERENTE OPER. CORP	ELVIS TORRES	ALTO	MEDIO
	3	GERENTE OP. NEXA	GREGORI CAMPOS	ALTO	ALTO
INTERNOS	4	ING. VOLADURA	EDWAR MOREANO	ALTO	ALTO
	5	RESIDENTE	ISRAEL SANTOS	ALTO	ALTO
	6	GERENTE DE OP. IESA	ARMANDO PICOY	ALTO	ALTO
	7	JEFE DE GUARDIA A	EDGAR ALDIAR	ALTO	MEDIO
	8	JEFE DE GUARDIA B	FRANCO SILVESTRE	ALTO	MEDIO
	9	JEFE DE GUARDIA C	GILBERT RUIZ	ALTO	MEDIO
	10	ASIST. RESIDENTE 1	FELIX TORRES	ALTO	ALTO
	11	ASIST. RESIDENTE 2	CARLOS GAMARRA	MEDIO	BAJO
	12	SUP. OPERACIÓN A	LUIS RAYMUNDO	MEDIO	MEDIO
	13	SUP. OPERACIÓN A	JACINTO VERASTEGUI	MEDIO	BAJO
	14	SUP. OPERACIÓN A	JERSY SOSA	MEDIO	BAJO
	15	SUP. OPERACIÓN B	DIONICIO VEGA	MEDIO	BAJO
	16	SUP. OPERACIÓN B	JULIO LEIVA	MEDIO	BAJO
	17	SUP. OPERACIÓN B	GUZMAN	MEDIO	BAJO
	18	SUP. OPERACIÓN B	NILTON HULLANCA	MEDIO	MEDIO
	19	SUP. OPERACIÓN C	JOSEPH BUSTAMANTE	MEDIO	ALTO
	20	SUP. OPERACIÓN C	DANIEL GARCIA	MEDIO	BAJO
	21	SUP. OPERACIÓN C	JOSE HERRERA	MEDIO	MEDIO
	22	SUP. OPERACIÓN C	BENJAIN VIZCARRA	MEDIO	BAJO
PROVEEDORES	23	EXSA	-	MEDIO	BAJO
	24	EPIROC	-	MEDIO	MEDIO
	25	LOGISTICA	RICARDO	MEDIO	BAJO

En el cuadro presentado se identificaron 5 participantes con alto impacto en el cambio y alta influencia en el proyecto de las cuales a 3 se les caracteriza como estusiasta (apoyo al proyecto al 100%) , 1 que se mantiene neutral y 1 que se opone al proyecto a realizarse (Lean six sigma); esto nos permite conocer nuestro enfoque al plantear e implementar el proyecto para tomar acciones preventivas en caso ocurra obstáculos antes y durante la ejecución del proyecto o por otro lado, presentar y trabajar conjuntamente con aquellos participantes claves que favorecen al proyecto.

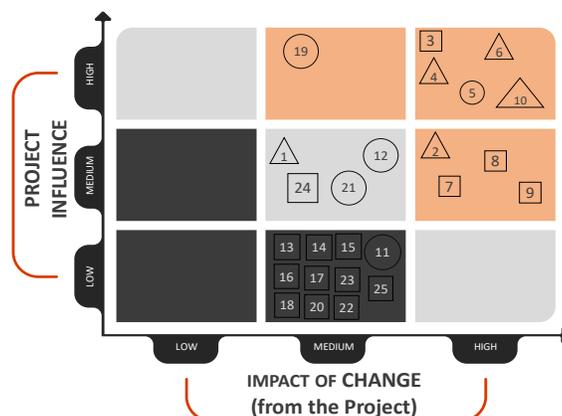


Gráfico N°13: Mapa de Participantes Clave

De la imagen se puede observar que el residente de obra (5) tiene un alto impacto al cambio y una influencia alta al proyecto, sin embargo, es oponente al proyecto, debido a que quiere soluciones inmediatas y le resulta difícil entender la mejora en el proceso de perforación y voladura mediante la metodología Lean Six sigma que en la mayoría de los casos tiene una duración como mínimo de 5 meses para obtener los resultados esperados.

3.1.5. Análisis Stakeholders

Se presenta el organigrama y/o distribución de la supervisión de la empresa contratista que brinda servicios en una de las Unidades Mineras de la empresa empleadora.

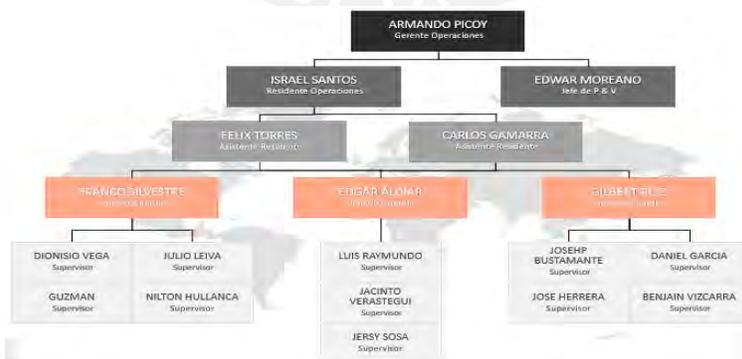


Gráfico N°14: Organigrama de Participantes Clave

Tabla N°5: Análisis de Stakeholders

STAKEHOLDERS		STRONGLY AGAINST	MODERATE AGAINST	NEUTRAL	MODERATE SUPPORT	STRONGLY SUPPORT
SUPERVISION OPERACIONES	A	X				
	JACINTO VERASTEGUI			X		
	JERSY SOSA			X		
	B			X		
	DIONICIO VEGA			X		
	JULIO LEIVA			X		
	GUZMAN			X		
	NILTON HULLANCA			X		
	C		X			
	JOSEHP BUSTAMANTE		X			
DANIEL GARCIA			X			
JOSE HERRERA	X					
BENJAIN VIZCARRA			X			
A			X			
EDGAR ALDIAR			X			
B			X			
FRANCO SILVESTRE			X			
C			X			
GILBERT RUIZ			X			
ING. P & V						X
EDWAR MOREANO						X
1						X
FELIX TORRES						X
2			X			
CARLOS GAMARRA			X			
RESIDENTE		X				
ISRAEL SANTOS		X				
GERENTE OPERACIONES						X
ARMANDO PICCOY						X

A partir de la identificación de los stakeholders se evaluó y analizó el interés e influencia en el proyecto de las cuales la mayoría presenta una posición neutral. Por otro lado, hay 5 personas que tienen una posición inicial en contra del proyecto y 3 que lo favorecen.

3.1.6. Diagrama SIPOC

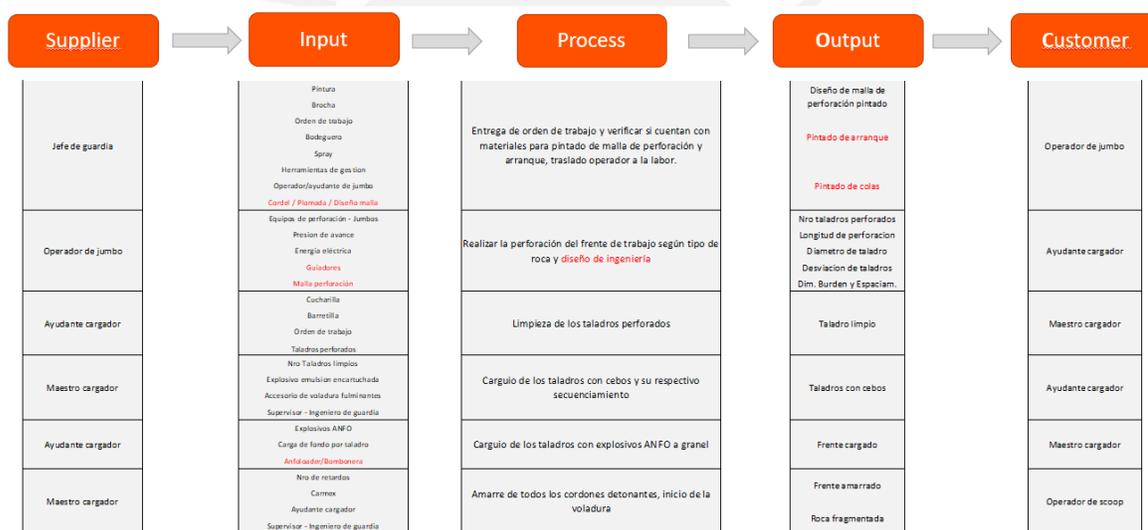
El análisis del Diagrama SIPOC representa gráficamente el proceso de gestión de la operación unitaria de perforación y voladura delimitada del proceso macro (cadena de valor y ciclo de minado) y enfocado al desarrollo de metros de avance diarios del cual brinda servicios la empresa contratista. A partir de la operación de Perforación y Voladura se identifica una serie de actividades y/o subprocesos (Procesos Nivel 3 de la Delimitación del Caso de Estudio), del cual se establece las entradas del proceso (recursos necesarios), se establece los proveedores, las salidas del proceso y el cliente o receptor de cada una de las salidas obtenidas.

Este diagrama muestra la secuencialidad de las actividades del proceso de Perforación y Voladura, por ende cada cliente o receptor se vuelve proveedor en la siguiente actividad para

cubrir los requerimientos del nuevo cliente hasta concluir todo el proceso de perforación y voladura.

El objetivo de esta representación es la gestión del proceso para cerrar brechas, cubrir necesidades o proveer insumos en cada actividad o subproceso y así lograr el objetivo de Incrementar los ingresos de la empresa.

En la siguiente gráfica, podemos visualizar a detalle la representación secuencial (Diagrama SIPOC) de las actividades del proceso de Proceso de Perforación y Voladura



Gráfica N°15: Diagrama SIPOC del Proceso de Perforación

3.1.7. Six Pack Summary

La Etapa definir de la Metodología DMAIC, se resume en los siguientes 6 puntos

(Problema, Objetivo, Plan Proyecto, Caso, Alcance, Equipo de Trabajo) que se muestran en la figura.



Gráfica N°16: Six Pack Summary

En Resumen, el enfoque se da en el factor clave de metros de avance diarios en las operaciones unitarias de perforación y voladura (Subproceso de perforación en el frente de trabajo) con el objetivo de incrementar los ingresos.

3.2. Etapa Definir

En la etapa medir el equipo de excelencia operativa ha identificado el problema que la empresa desea mejorar la cual es la falta de cumplimiento de metros avanzados del plan mensual que se programa por parte del cliente (la compañía minera). Este problema ha generado que la empresa tenga un fuerte impacto negativo en ingresos, es por ello que se identificó que los procesos claves a analizar son perforación y voladura y asimismo el indicador clave para mejorar el porcentaje del cumplimiento de metros de avance por mes, disminuir las penalizaciones e incrementar los ingresos es:

- Metros de avance por disparo (m/disp.)

Para el presente caso de estudio esta etapa se divide en dos partes la primera es el sustento de cómo se identificó el KPI mencionados anteriormente y la segunda parte es el detalle estadístico del diagnóstico base analizado en el periodo de octubre del KPI mas relevante antes de que se inicie con el proyecto de mejora.

3.2.1. Identificación del KPI

Para que se identifique el KPI de metros de avance por disparo, el área de excelencia operacional, encargada de realizar el proyecto de mejora, realizó una reunión con el área de gerencia de operaciones, planeamiento, perforación y voladura, mantenimiento mecánico y los supervisores de mina en la cual el fin fue elaborar la matriz de causa y efecto nivel 2 (Tabla N°6) y 3 (Tabla N°7).

Tabla N°6: Análisis de matriz CT nivel 2

Rating of Importance to Customer	7	8	10	7	7	5	
	1	2	3	4	5	6	
Process Steps / Input Variables	Índice de severidad	Nro de disparos/día	Metro avance/disparo	Disponibilidad mecánica %	Pernos + malla inst./mes	Tn movidas/ mes	Total
Making reservations							
1 Perforación	8	10	10	6	6	5	345
2 Carguío de explosivo	8	8	10	0	0	8	260
3 Voladura	8	9	10	0	0	6	258
4 Ventilación	2	2	2	0	0	1	55
5 Limpieza	6	2	2	8	0	10	184
6 Desatado de rocas	5	2	2	8	8	0	183
7 Sostenimiento	3	3	3	8	10	0	201
Total	280	288	390	210	168	150	

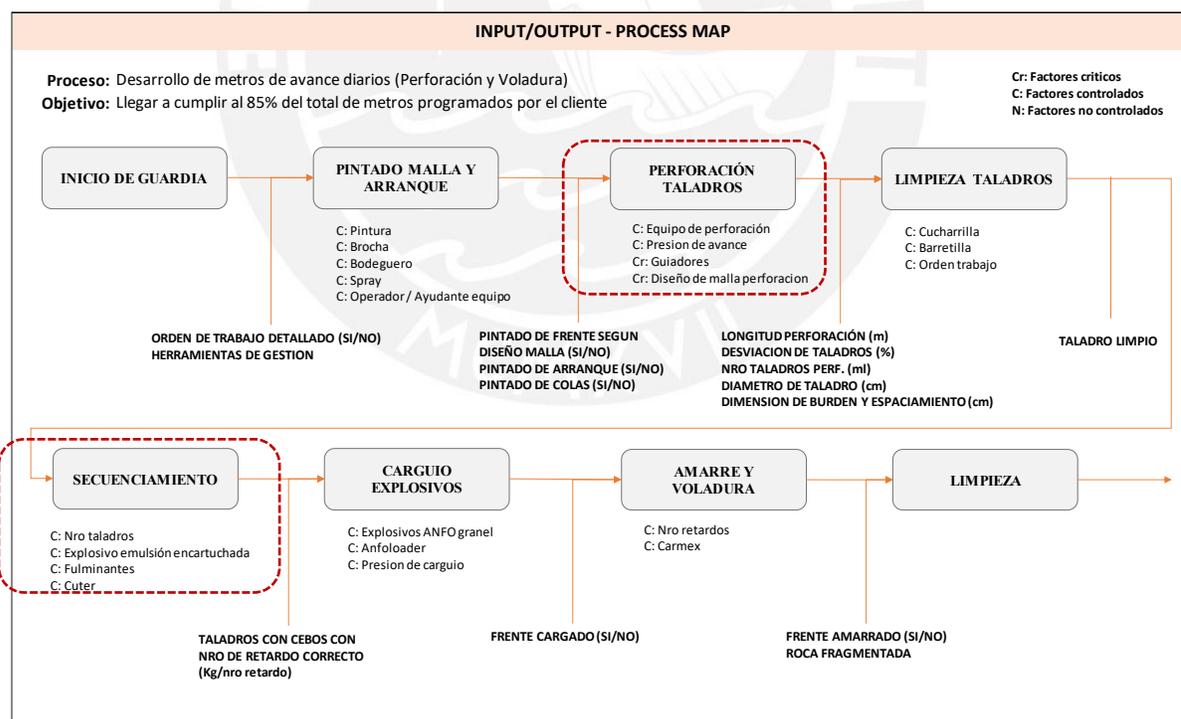
Tabla N°7: Análisis de matriz CT nivel 3

Rating of Importance to Customer	10	8	6	7	
	1	2	3	4	
Perforación Voladura / Input Variables	Metro avance/disparo	Tiempo de ciclo	Disponibilidad mecánica %	Índice de frecuencia	Total
Making reservations					
1 Pintado malla y arranque	8	2	0	3	117
2 Perforación taladros	10	7	10	4	244
3 Limpieza de taladros	7	1	0	4	106
4 Secuenciamiento	10	3	0	3	145
5 Carguío Explosivos	7	5	10	6	212
6 Amarre y Voladura	6	7	0	9	179
Total	480	200	120	203	

Los indicadores claves del proceso (KPIs proceso) se definen en base a los puntajes que se obtienen de las matrices. En la reunión, para la matriz de nivel 2, se plantearon 6 KPIs que se miden en el ciclo de minado los cuales fueron: índice de severidad, número de disparos por día, metros de avance por disparo, disponibilidad mecánica de flota equipos, pernos y malla instalados por mes y toneladas movidas por mes. El indicador más relevante fue metros de avance por disparo con un puntaje de 390 cabe mencionar que estos puntajes fueron determinados por las jefaturas de las áreas mencionadas anteriormente que participaron en la reunión. Sin embargo, como se requiere tener mayor detalle se puede observar en la tabla N°6. que los procesos más relevantes en función al mayor puntaje horizontal fue la perforación seguido del carguío de explosivo con un puntaje total de 345 y 260 respectivamente. Sobre este resultado la recomendación del equipo de excelencia operativa fue que la empresa busque ser más eficiente en los procesos mencionados y elaborar la matriz de nivel 3 para que se pueda identificar el indicador más relevante de los procesos de perforación y carguío de explosivos. Para ello el dueño del proceso, ingeniero de perforación y voladura, detalló en la reunión que los subprocesos son pintados de malla y arranque, perforación de taladros,

limpieza de taladros, secuenciamiento, carguío de explosivos, amarre y voladura. Como se puede observar en la tabla N°7 el indicador con mayor brecha con respecto a estos subprocesos otra vez fue metros de avance por disparo con un resultado de 480. Además, con esta matriz se definió el alcance del proyecto según prioridad la cual va a depender de la actividad de perforación taladros y secuenciamiento.

Luego de que se ha identificado el indicador clave del proceso de perforación y voladura el área de eficiencia operativa se reunió con el dueño del proceso, jefe de guardia, para poder realizar un mapeo del proceso con el fin de poder identificar, entender y conocer todas las variables de entrada (Xs) y salida (Ys), como se puede observar en la gráfica N°17 y así poder realizar ,en la siguiente etapa del proyecto, el análisis de las variables Xs que tienen alto impacto en la variable Y principal la cual es metros de avance por disparo.



Gráfica N°17: Mapeo de procesos de Perforación y Carguío de explosivos

Como se detalló líneas arriba la delimitación del proyecto será con un enfoque en los subprocesos de perforación de taladros y secuenciamiento de los cuales las variables Xs e Ys son las siguientes:

Subproceso perforación de taladros:



Gráfica N°18: Identificación de las variables Ys del subproceso perforación de taladros

Subproceso secuenciamiento:



Gráfica N°19: Identificación de las variables Ys del subproceso secuenciamiento

El objetivo de poder identificar las variables de entrada de los sub-procesos más relevantes del proyecto de mejora es encontrar las Xs que son significativas, ya que cada X es una fuente de variación y es capaz de modificar las variables de salida (Ys), además permitió identificar, delimitar y clasificar la data a recolectar en campo. Este análisis se realizará en siguiente etapa.

Por otro lado, como se puede observar en la gráfica N°17 cada sub-proceso tiene variables de entrada y de salida unos más relevantes que otros, pero no menos importantes es por ello que el área encargada del proyecto decidió realizar de manera preventiva una matriz de modos de falla y análisis de efecto (FMEA) de cada sub-proceso para poder analizar algún riesgo que impida desarrollar el proyecto de mejora.



Tabla N°8: Matriz de modos de falla y análisis de efecto (FMEA)

Funcion del Proceso	Modo de falla potencial	Efecto(s) de falla potencial	S E V	CAU SAS	O C C	Controls	D E T	R P N	Acciones recomendadas	Persona responsable	P S	P O	P D	P r p n
Pintado de malla y arranque	Falta de pintura, flexometro	No se pinta el frente a perforar	7	Logistica no cuenta con stock en el almacen de pintura	2	Realizar un check list donde se verifique los materiales necesarios	8	112	Personal operador solicite a logistica los materiales necesarios cuando ya se estan por agotar	Jefe de Logistica	7	1	8	56
	Deficiente diseño de malla y arranque	Pintado de frente según criterio del operador. Mala calidad de voladura	8	Falta de ingeniería en los diseños de perforacion y voladura	5	Supervision directa	6	240	Ejecutar una reingeniería en los diseños de perforacion y voladura a traves de un analisis cuantitativo.	Jefe de Perforacion y Voladura	8	4	5	160
			4	Falta de inspección al cumplimiento del estandar operacional (diseños de malla)	4	Supervision directa	7	224	Difundir y capacitar a todo personal operador de jumbo los tipos de mallas que se usan de acuerdo al tipo de roca que se tiene en la unidad minera.	Jefe de Perforacion y Voladura	8	2	4	64
Falta de presion aire/ agua	Retraso en el ciclo de minado	5	Sistema de aire y/o agua malas condiciones	4	Mantenimiento correctivos del sistema de servicios auxiliares	6	120	Verificar el plan de mtto preventivo del sistema de aire y agua.	Jefe de servicios auxiliares	5	2	4	40	
Perforacion de taladros	Rotura de aceros (shank, barra, coupling)	Demora en entrega de frente perforado con posibilidad de no ser ejecutado	7	Perforacion a presiones de percusion, rotacion fuera de lo normal.	4	Regular las presiones de avance de los Jumbos (correctivos)	7	198	Verificar las presiones de los equipos de perforacion (preventivamente) y capacitar al personal operador de equipos.	Jefe de Perforacion y Voladura	7	4	4	112
			2	Falta de control de barillaje	2	Control de vida util de barras no de couplin y shank	8	112	Monitoreo de la vida util de los aceros respecto a los metros perforados. Hacer un estudio para identificar el rendimiento de los aceros por tipo de roca	Jefe de productividad	7	1	5	35
	Falla equipo (Jumbo)	Taladros no perforados	6	Incorrecto programa de mantenimiento preventivo	4	Control del cumplimiento del programa de mtto	6	144	Verificar que los equipos esten con un DM mayor al 85%.	Jefe de mtto mecánico	6	3	4	72
Limpeza Taladros	Taladros tapados por mucha presencia de detritos	Reperforacion de taladros en el frente	6	Perforacion de los taladros a percusion alta y con excesiva presion de agua	2	Limpeza de taladros con cucharillas para evitar tapado de taladros	7	84	Si la calidad de roca es fracturada realizar la perforacion a percusion lenta.	Jefe de guardia	6	1	4	24
Secuenciamiento	Incorrecta distribucion de retardos en el secuenciamiento	Voladurara incompleta (soplado, anillado)	8	Incumplimiento al estandar operacional (malla de perforacion y voladura)	5	Inspecciones del comité de calidad en el proceso unitario de perforacion y voladura	6	240	Entrenar a todo personal maestro cargador los tipos de diseños de secuenciamiento que se usan de acuerdo al tipo de roca que se tiene en la unidad minera.	Jefe de Perforacion y Voladura	8	4	4	128
Carguo Explosivos	Anfoloader inoepativo	Frente no cargado	7	Incorrecto programa de mantenimiento preventivo	4	Control del cumplimiento del programa de mtto	7	198	Verificar que los equipos esten con un DM mayor al 85%.	Jefe de mtto mecánico	7	2	5	70
	Baja presion de aire en la labor para inyeccion de arfo	Bajo confinamiento de la columna de carga (explosivo)	7	Falta de control en la presion de inyeccion al taladro	4	Manometro para el control de la presion de aire (ingreso)	6	168	Implementar un manometro de salida en los equipos de carguo (jetanol). Realizar un programa de mantenimiento preventivo en los equipos de carguo (jetanol).	Jefe de mtto mecánico	7	2	4	56
Amarre y voladura	Amarre inadecuado	Tiros cortados, anillados	6	Falta de tiempo para realizar todo el proceso de carguo	3	Tener preparada la secuencia de carguo para optimizar el tiempo	7	126	Realizar un estudio de tiempos para poder mejorar los tiempo del ciclo de minado.	Residente de mina	6	2	7	84

Las 4 secciones delimitadas en rojo son prioritarias es por ello que se van a analizar y establecer un plan de acción debido a que son de riesgo alto para el correcto desarrollo de la mejora del proyecto.

3.2.2. Análisis FMEA:

La primera función para analizar es el pintado de malla y arranque, ya que el modo de falla potencial es el deficiente diseño de malla de perforación por parte del área de ingeniería y planeamiento con un efecto de falla potencial de pintado de frente según el criterio del operador que generaría una mala calidad de la voladura. Según el análisis existen dos causas de que se genere lo mencionado. La primera sería falta de ingeniería en los diseños de perforación y voladura y la segunda sería la falta de inspección al cumplimiento del estándar operacional (diseños de malla según el estándar de la compañía), ante lo mencionado el único control que se lleva en la operación es supervisión directa. Sin embargo, en el mes de octubre 2020 el jefe de perforación y voladura en una reunión con gerencia y el área de excelencia operativa indicó que es recomendable ejecutar una reingeniería de los diseños de perforación a través de un análisis cuantitativo y difundir y capacitar a todo el personal de los diseños de malla que se tienen en base al tipo de roca que cuenta la operación minera.

La segunda función para analizar es la perforación de taladros, ya que el modo de falla potencial es excesiva rotura por desgaste prematuro de aceros de perforación (shank, barra, broca y cupling) con un efecto de falla potencial de demora de entrega de frente perforado con posibilidad de no ser ejecutado. Según el análisis la posible causa es que las presiones de percusión y rotación se ejecuten fuera de los parámetros normales, ante lo mencionado el control que se lleva en la operación es regular las presiones de perforación de los jumbos cuando el operador detecta el problema en el equipo. Sin embargo, el jefe de perforación y voladura, junto con el área de excelencia operativa, coordinaron con el encargado de mantenimiento mecánico para que se realice una inspección preventiva de las presiones de los equipos quincenalmente.

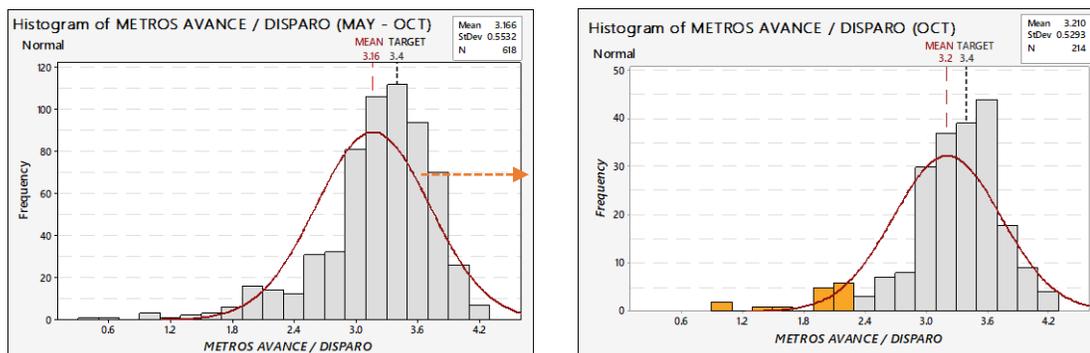
La tercera función para analizar es el secuenciamiento, ya que el modo de falla potencial es la incorrecta distribución de retardos en el secuenciamiento con un efecto de falla potencial de voladura incompleta (soplado, anillado). Según el análisis de los jefes de guardia junto con el área excelencia operativa la posible causa es que existe un incumplimiento al estándar operacional (malla de perforación y voladura), ante lo mencionado el control que se lleva en la operación es inspecciones del comité de calidad en el proceso unitario de perforación y voladura. Sin embargo, el área de excelencia operativa sugirió realizar un entrenamiento a todo personal maestro cargador con el fin de realizar el secuenciamiento según el estándar operacional de la compañía minera. Todo lo mencionado se realizó con el fin de disminuir el riesgo de fracasar una vez iniciado con el proyecto de mejora.

3.2.3. Detalle estadístico del KPI

El detalle estadístico del diagnóstico base analizado en el periodo de octubre del KPI antes de que se inicie con el proyecto de mejora se ejecutó de la siguiente manera:

- Toma y recolección de datos de metros de avance por disparo en el periodo marzo 2020 hasta octubre 2020. Se ha considerado toda la información como datos poblacionales de los cuales, como se explicará más adelante, se realizaron corridas muestrales en el software Minitab.
- Elección de la mejor data poblacional como línea base con comparativos de histogramas.
- Descripción de la variable clave: tipo de distribución, intervalos de confianza.
- Gráficas de control (before/after)
- Capacidad del proceso: cumple o no con las condiciones que un proceso debe tener para estimar la capacidad del proceso.

Variable clave Y1 – metros de avance por disparo:
Línea base



Gráfica N°20: Histograma poblacional mayo – octubre Gráfica N°21: Histograma poblacional octubre

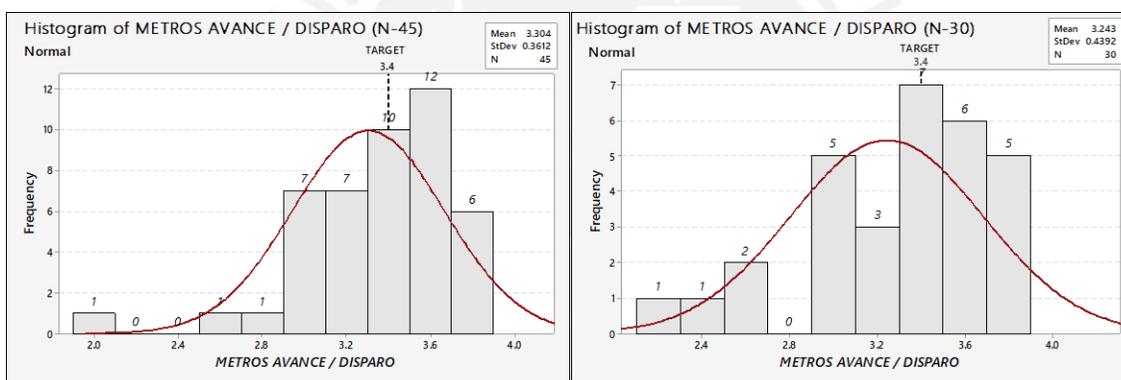
Se realizó un análisis de comportamiento de toda la población del periodo mayo 2020 hasta octubre 2020 para que se pueda identificar la línea base del proceso. El equipo de mejora continua pudo observar que si se considera toda la información mayo – octubre la media de los metros de avance sería 3.16 m/dispo. a diferencia de solo considerar octubre con una media de 3.20 m/dispo.; sin embargo, los datos mencionados no son estables hasta inicios del mes de octubre debido al efecto COVID-19, es por ello que para el proyecto se va a trabajar con la data poblacional del mes de octubre para que se pueda analizar la situación actual del proceso con respecto al indicador clave metros de avance por disparo. Sin embargo, como se puede observar en la gráfica N°21, las barras de color naranja no se van incluir debido a que son eventos puntuales que distorsionan la información y al análisis. Estos eventos puntuales que fueron identificados pertenecen a la clasificación de tipo de labor. Toda la información de color plomo es de tipo de labor frente de avances y la de color naranja es del tipo de labor sellada la cual es una voladura que está en promedio entre 1 a 2 metros.

Los cálculos realizados en las siguientes gráficas fueron trabajados con la información del periodo del mes de octubre, sin considerar las frecuencias naranjas y extraídos aleatoriamente.

Tipo de distribución

Para que se pueda estimar el tipo de distribución se escogió aleatoriamente dos muestras de información de metros de avance por disparo; la primera con un n igual a 30 datos y la segunda con un n igual a 45 datos. Esta información fue procesada en el software como se puede observar en los siguientes histogramas y así mismo se realizó la prueba de bondad de ajuste (tabla N°9).

Tabla N°9: Prueba de bondad de ajuste (prueba de distribuciones)



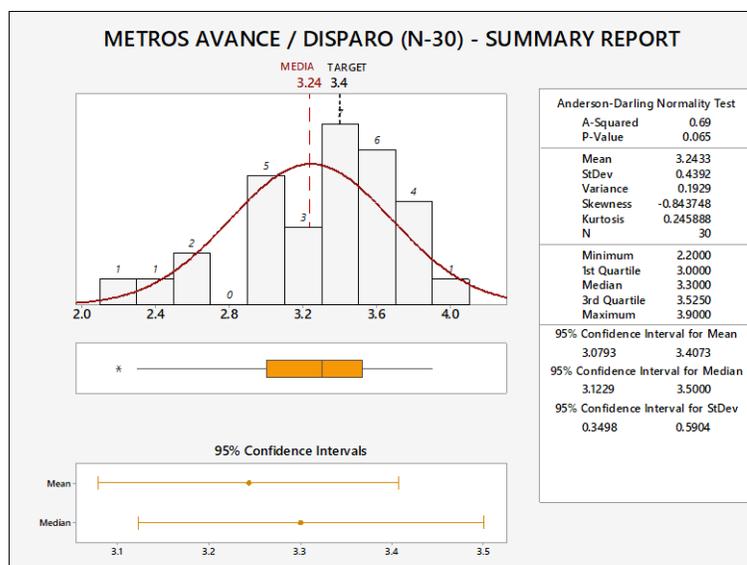
Distribution	AD (N 30)	AD (N 45)	P (N 30)	P (N 45)	LRT P (N 30)	LRT P (N 45)
Normal	0.688	0.728	0.065	0.053		
Box-Cox Transformation	0.258	0.317	0.695	0.527		
Lognormal	1.081	1.239	0.007	<0.005		
3-Parameter Lognormal	0.679	0.714	*	*	0.047	0.006
Exponential	10.458	16.693	<0.003	<0.003		
2-Parameter Exponential	4.876	11.431	<0.010	<0.010		0
Weibull	0.321	0.326	>0.250	>0.250		
3-Parameter Weibull	0.217	0.334	>0.500	0.398	0.415	0.453
Smallest Extreme Value	0.217	0.334	>0.250	>0.250		
Largest Extreme Value	1.581	2.795	<0.010	<0.010		
Gamma	0.946	1.021	0.018	0.011		
3-Parameter Gamma	6.609	62.689	*	*	1.000	1
Logistic	0.517	0.484	0.146	0.183		
Loglogistic	0.754	0.645	0.027	0.056		
3-Parameter Loglogistic	0.517	0.485	*	*	0.796	0.054
Johnson Transformation	0.197	0.305	0.878	0.555		

Gráfica N°22: Histogramas muestras aleatorias a un n=45 y n=30 respectivamente de m/disparo

Al realizar la prueba de bondad de ajuste el software calcula el P-value según el tipo de distribución que se puede observar en la tabla N°9. Sin embargo, si el p-value es menor al 5% significa que la data procesada no pertenece a ese tipo de distribución.

Como se puede ver en la Tabla N°9 las distribuciones a analizar en el caso de estudio son: normal, log normal, exponencial. No se considera las distribuciones con transformaciones ni logísticos debido a que son datos que se usan cuando se quiere transformar de una distribución a normal.

Para el análisis de la información de metros de avance por disparo se encontró que entre todas las distribuciones a analizar el mayor valor de PVALUE fue 6.5% para un tamaño de muestra de 30 y 5.3% para un tamaño de muestra de 45. Según lo mencionado anteriormente y los análisis realizados con el equipo de trabajo las distribuciones de las dos muestras aleatorias con N igual a 30 y N igual a 45 del parámetro metros de avance por disparo son normales. Por lo tanto, esta sería la mejor distribución con la cual se trabajará al extraer datos aleatorios de la población. Por otro lado, con la misma data de la gráfica N°22 se realizó un reporte resumen (gráfica N°23) para que el equipo encargado del proyecto de mejora pueda analizar el comportamiento de los metros de avance por disparo con sustento estadístico.



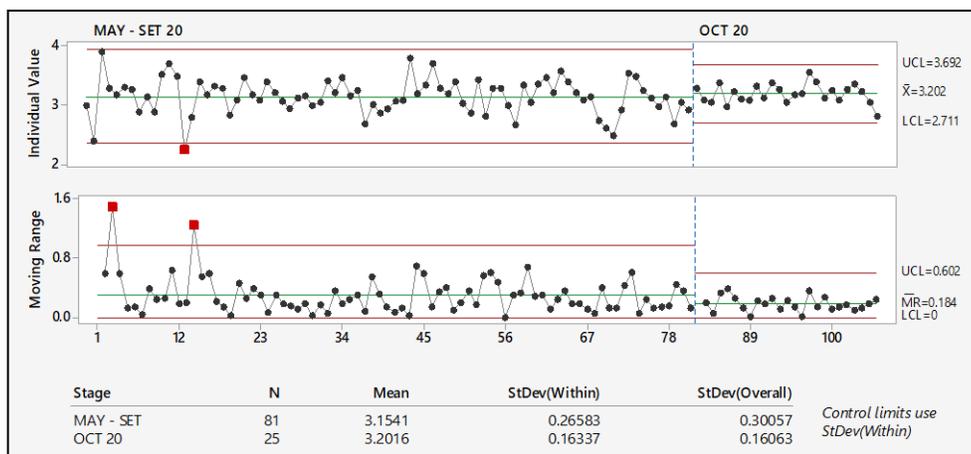
Gráfica N°23: Histograma de muestra aleatoria a un $n=30$ y parámetros estadísticos de m./disparo

De la gráfica N°23 se observó que:

- El valor de P-VALUE es 6.5% este dato es mayor a 5% por lo tanto la data tiene una distribución NORMAL.
- La media está en 3.24 m./disparo con una desviación estándar de 0.4392 m. Sin embargo, el target del proceso es obtener una media de 3.4 m./disparo al día para la fase inicial.
- La simetría es negativa con un valor de -0.8437 por lo cual se tiene una distribución, que se puede observar en el box plot, sesgada a la izquierda, se busca que esos datos estén acumulados a la derecha.
- La kurtosis es positiva con un valor de 0.245 por lo tanto la data no tiene centralidad debido a que no hay información de metros de avance por disparos acumulados en la media.
- Los intervalos de confianza a un 95 % están en el rango de 3.07 m/disp. – 3.40 m/disp. El objetivo solicitado por la compañía minera es que el intervalo de confianza inferior llegue a ser mayor o igual a 3.2 m/disp.

Gráficas de control

Una vez comprobado de que la data tiene una distribución normal, realizar el análisis de control del proceso es el segundo requisito para que se pueda calcular la capacidad del proceso. Para el análisis se realizó un comparativo de las gráficas de control del periodo mayo-setiembre y del periodo octubre.



Gráfica N°24: Gráfica de control before/after de m./disparo mayo-setiembre y octubre

Como se puede observar en la gráfica N°24 (parte superior) en el periodo de mayo-setiembre 2020 el proceso estaba en control; sin embargo, la data de metros de avance por disparo tiene una alta variabilidad es por ello que los límites de especificaciones estaban fuera de lo esperado ya que tienen una amplitud muy alta que van desde 2.35 m./disp hasta 3.9 m./disp. Esto se debe, como ya se mencionó anteriormente, a que fue un periodo de pandemia en el cual según los jefes de operaciones indican que no tuvieron a sus operadores, topógrafos y supervisión completos. Por otro lado, en el periodo de octubre el proceso también estaba en control, sin embargo, a diferencia del anterior periodo analizado, la información de metros de avance por disparo está concentrada en unos límites de especificación más reducidos que van

desde disparos de 2.71 metros de avance a más. Con lo mencionado anteriormente el área encargada del proyecto de mejora se ha planteado dos preguntas claves las cuales fueron:

- ¿La desviación estándar del proceso se redujo?

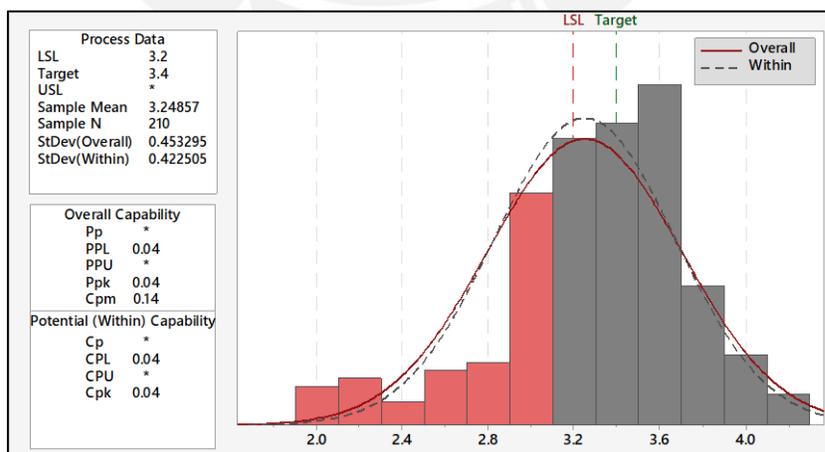
Sí se redujo la desviación estándar del proceso debido a que se logró controlar la variabilidad de metros de avance / disparo por efecto pandemia en el mes de OCT a comparación de MAY - SET.

- ¿La media del proceso cambió?

El cambio de la media del proceso fue mínimo de 3.15 m/disp a 3.20 m/disp. Sin embargo, el objetivo de la empresa es obtener avances de 3.40 m/disp. y a la operación aún le falta mejorar un 10.4% respecto al TARGET.

Capacidad del proceso

Después de que ya se comprobó que la data tiene una distribución normal y el proceso está en control. Se procedió a estimar la capacidad del proceso en el software Minitab del cual se obtuvo la siguiente información:

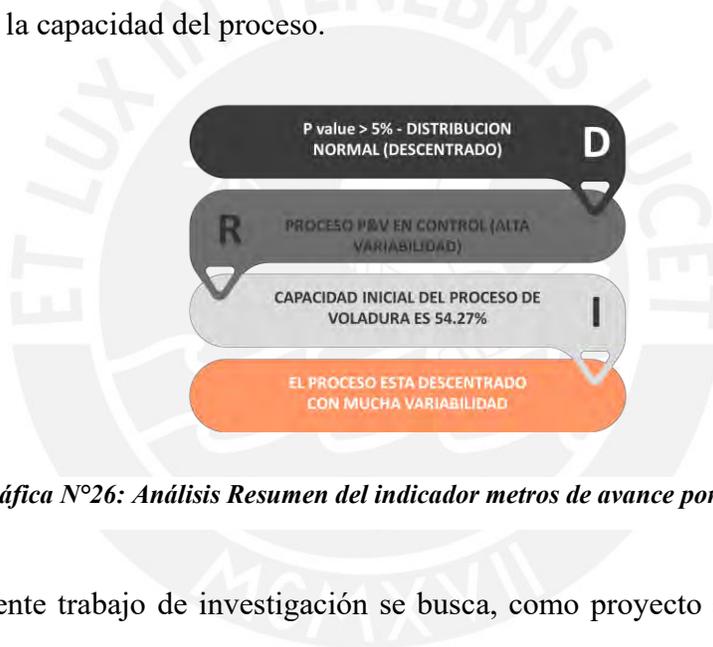


Gráfica N°25: Histograma de m./disparo período octubre (valores dentro y fuera de especificación)

De toda la información analizada en la gráfica N°25 el 45.73% de la frecuencia total de metros de avance por disparo están fuera del límite de especificación inferior solicitado por el cliente. Esto quiere decir que solo 114 voladuras de 210 ejecutadas en el mes de octubre del 2020, que equivale al 54.27%, cumplen con los requerimientos del cliente en base al KPI metros de avance por disparo.

Resumen

A continuación, una gráfica resumen de todo el análisis presentado del indicador hasta llegar a estimar la capacidad del proceso.



Gráfica N°26: Análisis Resumen del indicador metros de avance por disparo

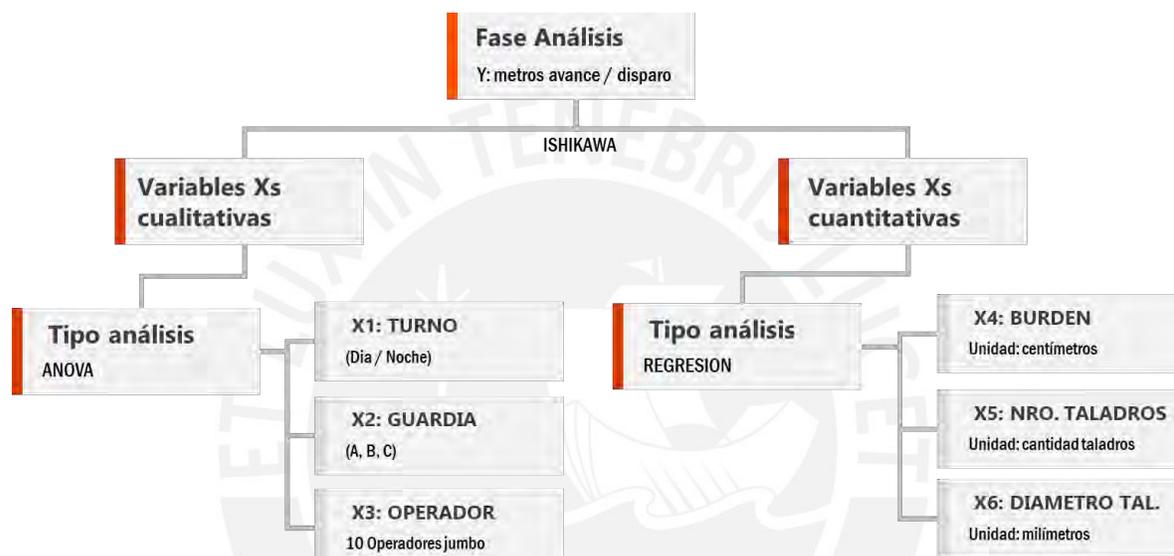
Para el presente trabajo de investigación se busca, como proyecto de mejora, reducir el porcentaje fuera de especificación y para ello en la siguiente etapa se analizará e identificará que variables Xs son las que tienen un alto impacto ante el indicador metros de avance por disparo.

3.3. Etapa Analizar

En la etapa analizar se ha identificado y analizado las variables de entrada de los subprocesos más relevantes del proyecto de mejora (las Xs que son significativas), ya que cada X es una fuente de variabilidad en el KPI metros de avance por disparo. Para ello primero se ha realizado un diagrama de Ishikawa con el objetivo de identificar las causas, obtener las variables preliminares Xs y definir las más relevantes para un análisis estadístico. Luego se trabajó con las variables preliminares cualitativas (turno, guardia y operadores) en un diagrama de efectos principales de los cuales el que tiene mayor variabilidad en los metros de avance por disparo es el de operadores con un peso del 76% a comparación de las otras variables (pareto de efectos). Continuando con el análisis, se obtuvo como resultado final que Los operadores generan un **49.98%** de variabilidad en los metros de avance por disparo. Para llegar a ese resultado se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA) junto con sus respectivos análisis de datos de supuestos (normalidad, independencia de datos y varianzas iguales). Por otro lado, se trabajó con las variables preliminares cuantitativas (Burden, diámetro de taladros, número de taladros) de los cuales se realizó un análisis con regresiones. Como resultado final de este análisis se obtuvo como mejor modelo la combinación de Burden (cuadrático) y número de taladros (cuadrático) con un R-cuadrado ajustado de 79.72%. Esto quiere decir que el **79.72%** de la variación en los metros de avance / disparo pueden ser explicados por el modelo generado con la regresión usando variables Burden y Nro Taladros.

Las variables claves más relevantes (cualitativas y cuantitativas) a mejorar y controlar según los resultados de la fase analizar son:

- Operadores de jumbo
- Burden
- Número de taladros

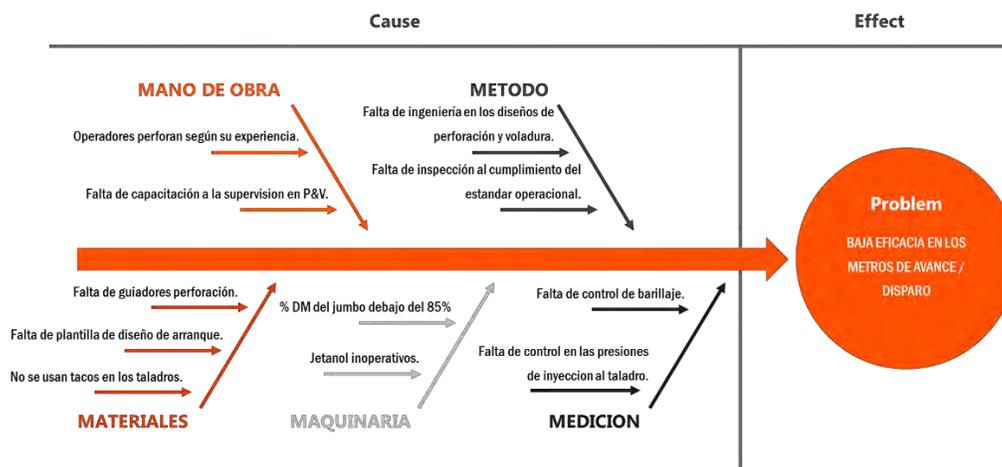


Gráfica N°27: Esquema de la Etapa Analizar

3.3.1. Análisis Ishikawa

Para el análisis de Ishikawa se ha realizado una reunión con el gerente de operación, residente, jefe de P&V, la supervisión de operaciones y el área de mantenimiento mecánico.

Como se puede observar en el diagrama el problema de la baja eficacia en los metros de avance por disparo se debe a 11 posibles causas relacionadas con mano de obra, método, materiales, maquinaria y medición.



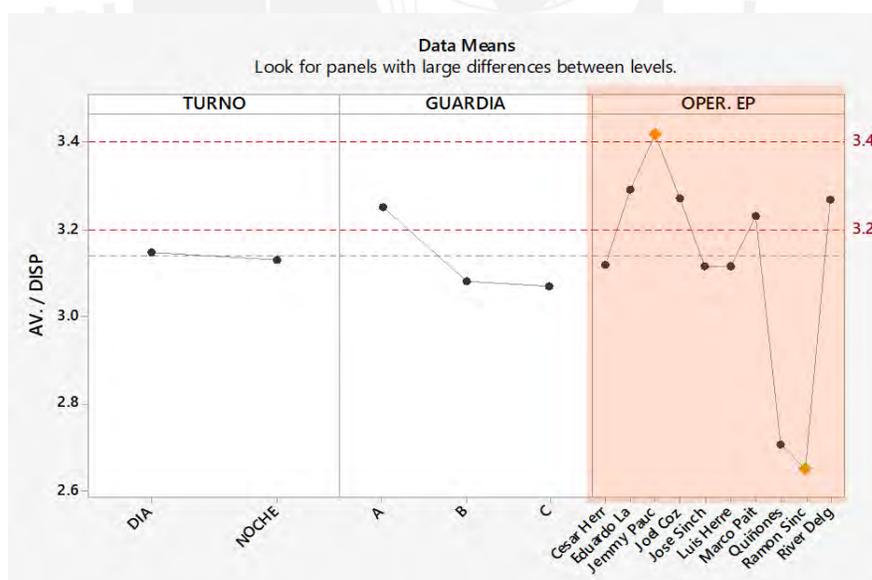
Gráfica N°28: Análisis Ishikawa

- Mano de obra: Lo que se ha podido observar en los frentes de avance es que cada operador por guardia (A, B, C) realizaba la perforación de frente según su criterio o experiencia, por otro lado, según una encuesta realizada a la línea de supervisión de operaciones existía la falta de capacitación en tema de perforación y voladura. Las variables significativas son operadores, guardia, turno y supervisión.
- Método: Los diseños de malla estándar para frentes de avance que la compañía brindó a la empresa contratista no eran los adecuados, por otro lado, no existía una inspección o seguimiento a la ejecución de los diseños del estándar operacional. La variable significativa es diseño de malla (número de taladros, Burden, diámetro del taladro, espaciamiento, longitud de perforación, factor de carga)
- Materiales: Los frentes de avance no contaban con guidores de perforación para que se evite las desviaciones de los taladros, no existían plantilla de diseños de arranques afectando al diseño estándar del Burden y no usaban tacos de arcilla al momento de cargar los taladros.

- Maquinaria: la operatividad de los jumbos frontoneros no eran confiables ya que la disponibilidad mecánica de estos equipos estaba en un rango menor al 85% (target) en ciertos periodos.
- Medición: la contrata no cuenta con un control de varillaje (metros perforados/acero), esto quiere decir que no estiman la vida útil de los aceros de perforación los cuales son cupling, shank, barra y broca.

3.3.2. Análisis gráfico de efectos principales

Del análisis anterior se va a demostrar estadísticamente cuales son las variables cualitativas (Xs) más significativas, para ello se ha utilizado la gráfica de efectos principales cuyas Xs son Turno, Guardia y Operadores, con el objetivo de identificar aquella que tenga un mayor efecto de variabilidad con respecto al KPI metros de avance por disparo.



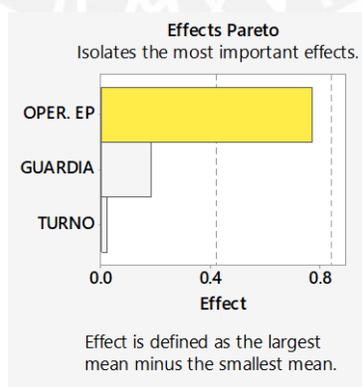
Gráfica N°29: Análisis en el Minitab de la variabilidad de metros de avance

Como se puede observar en la gráfica N°29 se ha realizado el análisis de las variables TURNO, GUARDIA y OPERADOR DE JUMBO de una data muestral del mes de octubre

del 2020 visualizándose el promedio de los metros de avance por disparo según el tipo de variable. De la gráfica se analiza lo siguiente:

- No hay variación de metros de avance / disparo en el turno (DIA – NOCHE)
- Existe una ligera variación de metros de avance / disparo en la guardia A respecto a las guardias B y C. La razón es porque el mejor operador es de esa guardia.
- Existe una alta variación de metros de avance / disparo entre los operadores de jumbo.
- De las variables X cuantitativas (turno, guardia, operador) la que tiene un efecto principal respecto a los metros de avance por disparo es la variable operadores ya que hay una alta variabilidad en sus rendimientos promedio de avance, por ejemplo: RAMON tiene un promedio de 2.64 m/disp, por otro lado, el señor Jemmy es el único que tiene una media (3.41 m/disp) por encima del target.

Además, según la gráfica de Pareto de efectos principales los operadores están con un 76% de participación por lo cual se deduce estadísticamente que el que tiene mayor efecto de variabilidad en el KPI de metros de avance por disparo es la variable de **OPERADORES DE JUMBO**.



Gráfica N°30: Análisis de Pareto de efectos principales (Variabilidad metros de avance)

3.3.3. Análisis de supuestos de ANOVA

Los datos de la variable operadores de jumbo tiene que ser analizados y verificados mediante tres supuestos (normalidad, independencia de datos y varianzas iguales) para después recién ejecutar el análisis ANOVA.

- Normalidad: Se calculó la media, los intervalos de confianza, la desviación estándar y el P-value de la muestra (n=30) de metros de avance por disparo de cada operador. En este supuesto, la hipótesis nula indica que la distribución de la data es normal y la hipótesis alterna que no es.

Se obtuvo, como se puede observar en la tabla N°7, que todos presentan un P-value mayor al 5% esto quiere decir que no se rechaza la hipótesis nula y los datos tienen una distribución normal. Los resultados de los histogramas y valores estadísticos están en el **anexo 1,2,3,4,5**.

Tabla N°10: Resultados Estadísticos del supuesto normalidad

Operador	MEDIA	95% IC DE MEDIA	DESV. ESTANDAR	PVALUE
Cesar	3.17	(3.11;3.22)	0.1420	15%
Eduardo	3.25	(3.14;3.36)	0.3000	17%
Jemmy	3.44	(3.34;3.53)	0.2471	31%
Joel	3.29	(3.19;3.39)	0.2686	64%
Jose	3.17	(3.05;3.29)	0.3311	50%
Luis	3.14	(3.05;3.24)	0.2531	34%
Marco	3.29	(3.17;3.42)	0.3270	61%
Quiñones	2.66	(2.53;2.80)	0.3673	59%
Ramon	2.53	(2.43;2.63)	0.2718	8%
River	3.31	(3.23;3.40)	0.2337	33%

- Independencia de datos: Se calculó una tabla de correlación de Pearson y P-value en la cual la hipótesis nula hace referencia a que no hay correlación y la hipótesis alterna a que si hay correlación. Cuando el P-value es mayor a 5% no se rechaza la hipótesis nula y es lo que se busca en este supuesto de independencia de datos.

Tabla N°11: Resultados Estadísticos del supuesto independencia de datos

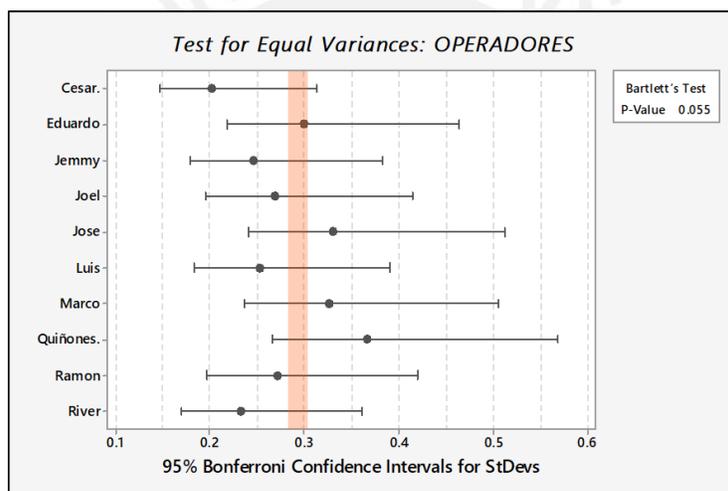
Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
Eduardo	Cesar.	30.00	-0.02	(-0.380; 0.341)	✓ 91%
Jemmy	Cesar.	30.00	-0.28	(-0.578; 0.094)	✓ 14%
Joel	Cesar.	30.00	-0.08	(-0.428; 0.288)	✓ 67%
Jose	Cesar.	30.00	-0.24	(-0.550; 0.135)	✓ 21%
Luis	Cesar.	30.00	0.02	(-0.340; 0.380)	✓ 90%
Marco	Cesar.	30.00	0.16	(-0.215; 0.490)	✓ 40%
Quiñones.	Cesar.	30.00	-0.14	(-0.475; 0.233)	✓ 47%
Ramon	Cesar.	30.00	-0.09	(-0.437; 0.278)	✓ 63%
River	Cesar.	30.00	-0.17	(-0.496; 0.207)	✓ 38%
Jemmy	Eduardo	30.00	-0.01	(-0.366; 0.354)	✓ 97%
Joel	Eduardo	30.00	-0.12	(-0.461; 0.250)	✓ 52%
Jose	Eduardo	30.00	0.11	(-0.261; 0.452)	✓ 57%
Luis	Eduardo	30.00	-0.28	(-0.585; 0.085)	✓ 13%
Marco	Eduardo	30.00	-0.14	(-0.475; 0.234)	✓ 47%
Quiñones.	Eduardo	30.00	-0.02	(-0.376; 0.344)	✓ 92%
Ramon	Eduardo	30.00	0.20	(-0.174; 0.522)	✓ 29%
River	Eduardo	30.00	0.01	(-0.356; 0.364)	✓ 98%
Joel	Jemmy	30.00	0.10	(-0.271; 0.443)	✓ 60%
Jose	Jemmy	30.00	0.09	(-0.279; 0.437)	✓ 63%
Luis	Jemmy	30.00	0.06	(-0.310; 0.408)	✓ 77%
Marco	Jemmy	30.00	0.26	(-0.108; 0.569)	✓ 16%
Quiñones.	Jemmy	30.00	-0.07	(-0.416; 0.302)	✓ 73%
Ramon	Jemmy	30.00	-0.29	(-0.588; 0.079)	✓ 12%

Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
River	Jemmy	30.00	-0.06	(-0.415; 0.303)	✓ 74%
Jose	Joel	30.00	0.15	(-0.220; 0.486)	✓ 42%
Luis	Joel	30.00	-0.09	(-0.435; 0.280)	✓ 64%
Marco	Joel	30.00	0.15	(-0.223; 0.484)	✓ 43%
Quiñones.	Joel	30.00	-0.35	(-0.632; 0.010)	✓ 6%
Ramon	Joel	30.00	-0.03	(-0.387; 0.333)	✓ 87%
River	Joel	30.00	0.23	(-0.147; 0.542)	✓ 23%
Luis	Jose	30.00	-0.13	(-0.468; 0.242)	✓ 49%
Marco	Jose	30.00	0.09	(-0.278; 0.438)	✓ 63%
Quiñones.	Jose	30.00	0.27	(-0.106; 0.571)	✓ 16%
Ramon	Jose	30.00	-0.06	(-0.407; 0.311)	✓ 77%
River	Jose	30.00	-0.44	(-0.690; -0.093)	✗ 2%
Marco	Luis	30.00	-0.07	(-0.416; 0.301)	✓ 73%
Quiñones.	Luis	30.00	-0.13	(-0.472; 0.238)	✓ 48%
Ramon	Luis	30.00	0.12	(-0.248; 0.463)	✓ 52%
River	Luis	30.00	-0.36	(-0.639; -0.003)	✓ 5%
Quiñones.	Marco	30.00	-0.35	(-0.627; 0.017)	✓ 6%
Ramon	Marco	30.00	-0.15	(-0.480; 0.227)	✓ 45%
River	Marco	30.00	0.13	(-0.244; 0.466)	✓ 50%
Ramon	Quiñones.	30.00	-0.23	(-0.545; 0.142)	✓ 22%
River	Quiñones.	30.00	-0.29	(-0.590; 0.076)	✓ 12%
River	Ramon	30.00	0.16	(-0.215; 0.490)	✓ 41%

Según la prueba de independencia de datos no existe correlación entre operadores. Solo entre Rivera y José ya que el P-value es menos a 5%. Sin embargo, un dato respecto a 45 combinaciones no tiene alto impacto para invalidar este supuesto.

- Varianzas iguales: Se calculó el P-value de la prueba de igualdad de varianzas en el software minitab. En este supuesto, la hipótesis nula indica que las varianzas de los metros de avance por disparo de la muestra de los operadores son iguales y la hipótesis alterna que no es igual.

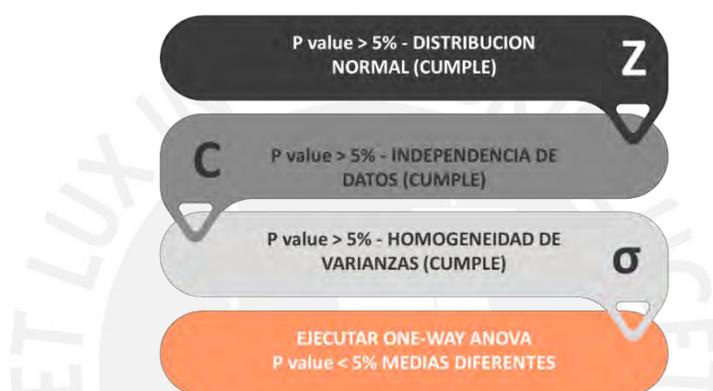
Como resultado de la prueba de igualdad de varianzas se obtuvo un P-value de 5.5% esto quiere decir que no se rechaza la hipótesis nula. Además, al trazar la línea naranja como se puede observar en la gráfica N°31 todos los Intervalos de Confianza al 95% se intersectan por lo tanto se concluye que existe de la probabilidad alta de que todas las varianzas son iguales.



Gráfica N°31: Análisis de varianzas iguales de la variable operadores de jumbo

3.3.4. Análisis de varianza (ANOVA)

Ya que se ha comprobado que la data de los metros de avance de los operadores cumple con los supuestos de normalidad, independencia de datos y varianzas iguales se procede a calcular el % de variabilidad que generan los operadores en los metros de avance por disparo (R-cuadrado) y el valor de P-value, para lo cual la hipótesis nula es que las medias son iguales y la hipótesis alterna las medias son diferentes.

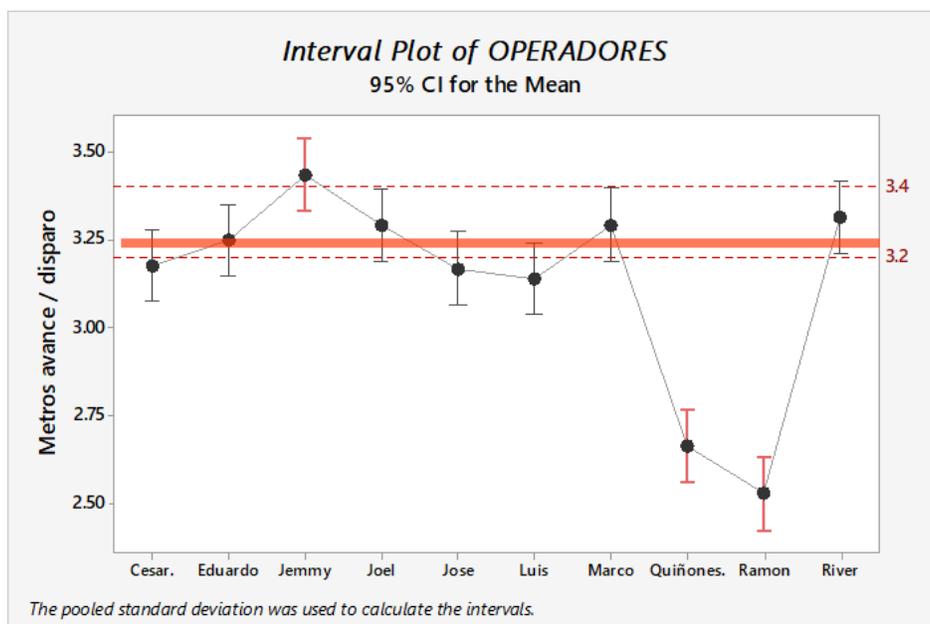


Gráfica N°32: Supuestos a verificar para la validación de ANOVA

Como resultado final de la prueba de análisis de varianzas se obtuvo un P-value de 0.000%, valor menor al 5% esto quiere decir que las medias no son iguales y se rechaza la hipótesis nula.

Tabla N°12: Resultados Estadísticos de análisis ANOVA (P-value;0%)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	9	23.43	2.60293	32.2	0
Error	290	23.44	0.08084		
Total	299	46.87			



Gráfica N°33: Análisis ANOVA de la variable operadores de jumbo

Por otro lado, se obtuvo un R-cuadrado de **49.98%** esto quiere decir que la variable operadores generan ese valor de porcentaje de variabilidad en el KPI metros de avance por disparo.

Tabla N°13: Resultados Estadísticos de análisis ANOVA (R-sq;49.98%)

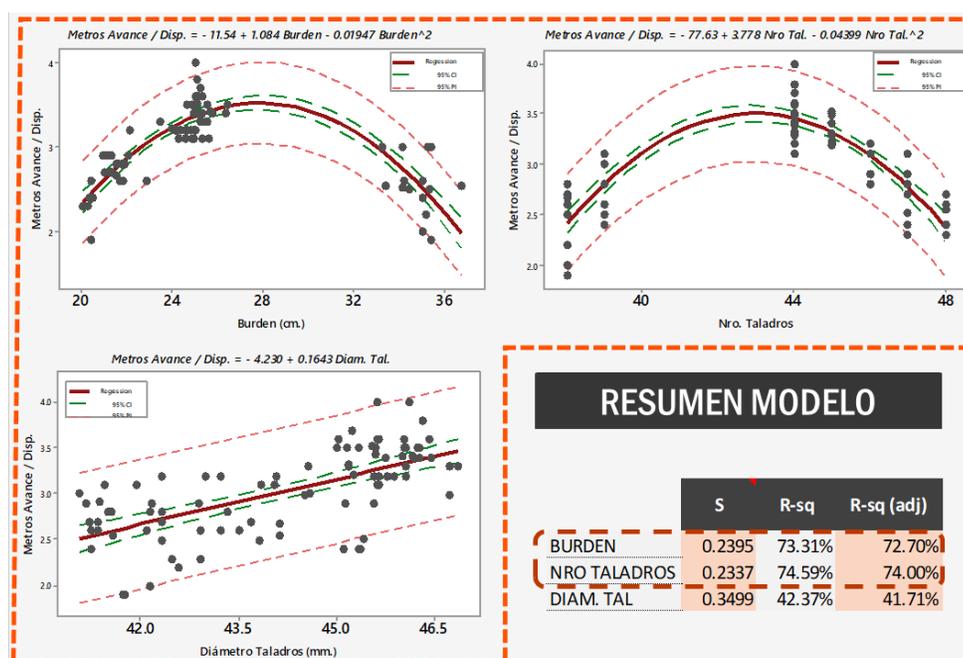
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.28432	49.98%	48.43%	46.47%

3.3.5. Análisis de regresión

Para este análisis se trabajó con las variables burden (cm), número de taladros (cantidad) y diámetro de taladros (mm). Primero se identificó el modelo que más se ajusta a la data de las variables ya mencionadas como se puede observar en la siguiente gráfica.

Gráfica N°34: Análisis Regresión de variables: Burden, N°Taladros y Diámetro de taladros



Análisis de los resultados:

- El mejor modelo para el BURDEN es **cuadrático** respecto a METROS AVANCE / DISP. con un R-sq de 73.31%.
- El mejor modelo para Nro TALADROS es **cuadrática** respecto a METROS AVANCE / DISP. con un R-sq de 74.59%.
- El mejor modelo para DIAMETRO TALADRO es **lineal** respecto a METROS AVANCE / DISP. con un R-sq de 42.37%.

Comentarios de los resultados:

- Se hizo el análisis en base al R-sq y no al R-sq (adj) debido a que todavía no estamos combinando más de una variable.
- El mejor modelo hasta el momento es la relación que existe entre el NRO TALADROS y METROS AVANCE / DISP.
- Se hará seguimiento en campo a la medición de DIAMETRO DE TALADRO debido a que tiene más desviación estándar respecto a las otras variables.
- Luego de identificar los mejores modelos de las variables se realizó 9 corridas de distintas combinaciones con el fin de encontrar el modelo con mejor R-cuadrado ajustado. Ya que para elegir el mejor modelo se escoge el mejor R-sq (adj) debido a que hay combinatorias de variables Xs.

Tabla N°14: Resultados estadísticos de análisis de regresión (Combinatoria variables Xs)

RESUMEN DEL MODELO (CONVINATORIAS)										S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
X1	MODEL	P-value	X2	MODEL	P-value	X3	MODEL	P-value	Y1				
BURDEN	(LINEAL)	0.126							AVANCE/DISP	0.455	2.63%	1.53%	0.00%
BURDEN	(CUADRÁTICA)	0.000							AVANCE/DISP	0.239	73.31%	72.70%	70.48%
			NRO TALADROS	(LINEAL)	0.003				AVANCE/DISP	0.439	9.41%	8.38%	4.84%
			NRO TALADROS	(CUADRÁTICA)	0.000				AVANCE/DISP	0.234	74.59%	74.00%	72.52%
						DIAM. TAL	(LINEAL)	0.000	AVANCE/DISP	0.350	42.37%	41.71%	39.78%
BURDEN	(CUADRÁTICA)	0.000	NRO TALADROS	(CUADRÁTICA)	0.000				AVANCE/DISP	0.206	80.63%	79.72%	77.54%
BURDEN	(CUADRÁTICA)	0.000				DIAM. TAL	(LINEAL)	0.001	AVANCE/DISP	0.225	76.73%	75.92%	73.85%
			NRO TALADROS	(CUADRÁTICA)	0	DIAM. TAL	(LINEAL)	0.105	AVANCE/DISP	0.231	75.36%	74.50%	72.80%
BURDEN	(CUADRÁTICA)	0.000	NRO TALADROS	(CUADRÁTICA)	0.000	DIAM. TAL	(LINEAL)	0.120	AVANCE/DISP	0.205	81.18%	80.06%	77.83%

De la tabla anterior se puede observar que el mejor modelo se da cuando se combinan el burden (cuadrática) y el número de taladros (cuadrática) representada en la siguiente ecuación:

“Metros de Avance por disparo es igual”

$$= -50.03 + 0.572Burden + 2.120 Nro.Taladros - 0.01023 Burden^2 - 0.02465Nro.Taladros^2$$

Por otro lado, no se eligió el modelo del cuadro de tres variables debido a que al analizar el DIAMETRO TALADRO presentó un P-value mayor 5%, por lo cual no hay correlación en el modelo con respecto a los metros avance / disparo.

La información estadística del mejor modelo es el siguiente:

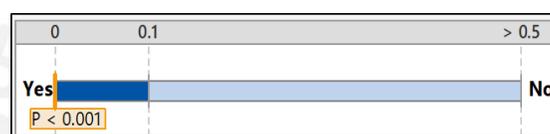
Las relaciones entre la variable Y y las variables Xs en el modelo es estadísticamente significativa. Esto se debe a que el P- value de las variables es menor a 0.001.

Tabla N°15: Resultados estadísticos de análisis de ANOVA (P-value;0%)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	15.0731	3.76827	88.45	0
Burden	1	1.1292	1.12921	26.51	0
Nro Taladros	1	1.2384	1.23836	29.07	0
Burden^2	1	1.1274	1.12736	26.46	0
Nro Taladros^2	1	1.2236	1.22357	28.72	0
Error	85	3.6213	0.0426		
Lack-of-Fit	84	3.6016	0.04288	2.18	0.5
Pure Error	1	0.0197	0.01966		
Total	89	18.6944			

¿Existe una relación entre las variables Y y Xs?

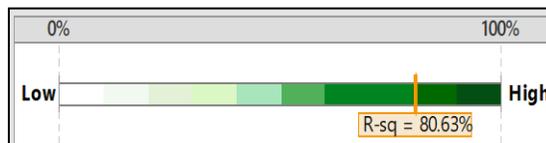


Además, el 80.63% de la variación en los metros de avance / disparo pueden ser explicados por el modelo generado con la regresión cuyos parámetros son Burden, Nro taladros, ambos cuadráticos.

Tabla N°16: Resultados estadísticos de análisis de ANOVA (R-sq;79.72%)

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.206406	80.63%	79.72%	77.54%



3.4. Etapa Mejorar

Como ya se identificaron las variables significativas se decidió iniciar con la etapa mejorar en el periodo de enero y febrero con un enfoque en rediseñar el diseño de malla con nuevos parámetros para el Burden y el número de taladros. Para ello se realizó un diseño de experimento la primera quincena de enero cuyas pruebas fueron de dos factores los cuales son Burden y número de taladros, cada factor de dos niveles 25 cm y 35 cm para el Burden y 30 taladros y 44 taladros para número de taladros y se ejecutó 3 réplicas. El objetivo fue que se pueda obtener disparos mayores a 3.40 metros de avance. El resultado optimó final fue el Burden 25 cm y número taladros 44.

A continuación, el detalle de todo el desarrollo de esta etapa:

- Estado actual acciones tomadas FMEA
- Evaluación de las soluciones planteadas
- Implementación prueba piloto (DOE)
 - Objetivos / Criterios de éxito
 - Pre-piloto: resumen del comportamiento del KPOV (metros avance / disparo)
 - Detalle del plan de pruebas
- Ejecución de la prueba piloto (DOE)
 - Diseño de experimentos (DOE)
 - Clasificación de variables / Resultados del diseño de experimentos
- Resultados fase mejora
 - Técnicos – diseño de malla
 - Operativos – metros de avance por disparo
 - Capacidad proceso - % fuera de especificación

3.4.1. Estado actual acciones tomadas FMEA:

Tabla N°17: Análisis FMEA

Funcion del Proceso	Modo de falla potencial	Efecto(s) de falla potencial	S E V	CAUSAS	O C C	Controls	D E T	R P N	Acciones recomendadas	Persona responsable	Fecha prometida	Acciones tomadas	Actual Compl. Date	P S	P O	P D	P r p n
Pintado de malla y arranque	Falta de pintura, flexometro	No se pinta el frente a perforar	7	Logistica no cuenta con stock en el almacen de mina	2	Realizar un check list donde se verifique los materiales necesario	8	112	Personal operador solicite a loslogistica los materiales necesarios cuando ya se estan por agotar.	Jefe de Logistica	4/4	Mejoró logistica de distribucion de materiales	2/2	7	1	8	56
	Deficiente diseño de malla y arranque	Pintado de frente según criterio del operador.	8	Falta de ingeniería en los diseños de perforacion y voladura	5	Supervision directa	6	240	Ejecutar una reingeniería en los diseños de perforacion y voladura a traves de un analisis cuantitativo.	Jefe de Perforacion y Voladura	11/15	Se ejecuto nuevos diseños de malla de perforacion y voladura	12/1	8	4	5	160
		Mala calidad de voladura	8	Falta de inspección al cumplimiento del estandar operacional (diseños de malla)	4	Supervision directa	7	224	Difundir y capacitar a todo personal operador de jumbo los tipos de mallas que se usan de acuerdo al tipo de roca que se tiene en la unidad minera.	Jefe de Perforacion y Voladura	11/5	Se realizo capacitaciones programadas a todos los operadores y supervisores	11/5	8	2	4	64
Perforacion de taladros	Falta de presion aire/ agua	Retraso en el ciclo de minado	5	Sistema de aire y/o agua malas condiciones	4	Mantenimiento correctivos del sistema de servicios auxiliares	6	120	Verificar el plan de mto preventivo del sistema de aire y agua.	Jefe de servicios auxiliares	4/15	PENDIENTE		5	2	4	40
	Rotura de aceros (shank, barra, coupling)	Demora en entrega de frente perforado con posibilidad de no ser ejecutado	7	Perforacion a presiones de percusion, rotacion fuera de lo normal.	4	Regular las presiones de avance de los Jumbos (correctivos)	7	196	Verificar las presiones de los equipos de perforacion (preventivamente) y capacitar al personal operador de equipos.	Jefe de Perforacion y Voladura	12/20	PENDIENTE		7	4	4	112
				7	Falta de control de barillaje	2	Control de vida util de barras no de couplin y shank	8	112	Monitoreo de la vida util de los aceros respecto a los metros perforados. Hacer un estudio para identificar el rendimiento de los aceros por tipo de roca.	Jefe de productividad	5/1	PENDIENTE		7	1	5
	Falla equipo (Jumbo)	Taladros no perforados	6	Incorrecto programa de mantenimiento preventivo	4	Control del cumplimiento del programa de mto	6	144	Verificar que los equipos esten con un DM mayor al 85%.	Jefe de mto mecánico	4/13	Seguimiento mensual	3/10	6	3	4	72
Limpieza Taladros	Taladros tapados por mucha presencia de detritos	Reperforacion de taladros en el frente	6	Perforacion de los taladros a percusion alta y con excesiva presion de agua	2	Limpieza de taladros con cucharillas para evitar tapado de taladros	7	84	Si la calidad de roca es fracturada realizar la perforacion a percusion lenta.	Jefe de guardia	6/6	PENDIENTE		6	1	4	24
Secuenciamiento	Incorrecta distribucion de retardos en el secuenciamiento	Voladua incompleta (soplado, anillado)	8	Incumplimiento al estandar operacional (malla de perforacion y voladura)	5	Inspecciones del comité de calidad en el proceso unitario de perforacion y voladura	6	240	Entrenar a todo personal maestro cargador los tipos de diseños de secuenciamiento que se usan de acuerdo al tipo de roca que se tiene en la unidad minera.	Jefe de Perforacion y Voladura	11/28	Se realizo capacitaciones programadas a todos los maestros corgadores	11/30	8	4	4	128
Carguio Explosivos	Anfoloader inoepativo	Frente no cargado	7	Incorrecto programa de mantenimiento preventivo	4	Control del cumplimiento del programa de mto	7	196	Verificar que los equipos esten con un DM mayor al 85%.	Jefe de mto mecánico	4/13	PENDIENTE		7	2	5	70
	Baja presion de aire en la labor para inyeccion de anfo	Bajo confinamiento de la columna de carga (explosivo)	7	Falta de control en la presion de inyeccion al taladro	4	Manometro para el control de la presion de aire (ingreso)	6	168	Implementar un manometro de salida en los equipos de carguio (jetanol). Realizar un programa de mantenimiento preventivo en los equipos de carguio (jetanol).	Jefe de mto mecánico	1/14	PENDIENTE		7	2	4	56
Amarre y voladura	Amarre inadecuado	Tiros cortados, anillados	6	Falta de tiempo para realizar todo el proceso de carguio	3	Tener preparada la secuencia de carguio para optimizar el tiempo	7	126	Realizar un estudio de tiempos para poder mejorar los tiempo del ciclo de minado.	Residente de mina	12/12	Toma de tiempo y presentacion de resultados quincenalmente	3/15	6	2	7	84

Como se puede observar esas fueron las acciones tomadas por el equipo de la contrata para mitigar el riesgo del proyecto en las fechas indicadas.

- Se ejecutaron nuevos diseños de malla
- Se realizaron capacitaciones programadas a todos los supervisores, operadores y maestros cargadores.
- Se realiza seguimiento mensual de las %DM de los jumbos de perforación.
- Se realizó seguimientos de toma de tiempo al ciclo de minado para evitar retrasos en el carguío y secuenciamiento del frente.

Todo ello se realizó paralelamente al avance del proyecto de mejorar “incrementar eficacia de los metros de avance por disparo.”

3.4.2. Evaluación de las soluciones planteadas:

Tabla N°18: Evaluación de Soluciones

POSIBLE SOLUCION	CAUZA RAIZ	IMPACT	AUTHORITY	DIFFICULTY	SUM	PRIORITY?
1 Elaboracion de plantillas para el marcado de arranque, a fin de controlar la ejecucion.	MATERIALES: Por falta de esta plantilla operadores marcan el arranque con distintas dimensiones	5	5	3	13	YES
2 Elaborar estandares operaciones para la perforacion de mallas de perforacion	METODO: Falta de ingeniería en los diseños de perforación y voladura	5	5	5	15	YES
3 Creacion de reporte de campo (evidencias fotograficas) para el control de la disciplina operativa	METODO: Falta de inspección al cumplimiento del estandar operacional MANO DE OBRA: Falta de capacitacion a la supervision en P & V.	5	5	4	14	NO
4 Contro de varillaje para monitorear el cumplimiento de numero de taladros por operador.	MEDICION: Falta de control de varillaje (VIDA UTIL DE ACEROS DE PERFORACION)	3	4	5	12	YES
5 Implementaion de matriz de numero de taladros. burden según tipo de roca y seccion.	METODO: Falta de ingeniería en los diseños de perforación y voladura	4	4	5	13	YES

Lo mencionado son las posibles soluciones ante la baja eficacia de los metros de avance esto se obtuvo del Ishikawa realizado en la fase analizar y del FMEA. Además, se busca complementar con los resultados estadísticos obtenidos de la etapa de análisis en el cual se conoce que los parámetros de entrada Xs que tienen mayor impacto a nuestro KPOV (metros de avance por disparo) son Burden, nro de taladros. Es por ello que la posible solución número 2 y 3 son los de más alto impacto,

autoridad y dificultad, además, dentro de esas posibles soluciones están incluidos los parámetros Burden y número de taladros. Por lo cual se está optando en elaborar una prueba piloto a través de un diseño de experimentos (DOE).

3.4.3. Implementación de la prueba piloto (DOE)

La Tabla N°19 muestra el resumen del planeamiento de la implementación de un nuevo diseño de malla para la perforación y voladura en frentes de avance para un tipo de roca regular RMR (40 – 61) y sección 4.5 m x 4.0 m.

Se ejecutarán voladuras con el nuevo diseño vs el diseño estándar de la compañía minera variando las dimensiones del Burden entre 25 cm y 35 cm.

Tabla N°19: Implementación de prueba piloto

TAREA / ENTREGABLE	DESCRIPCION
Alcance de prueba piloto	
¿Qué proceso va a pasar la prueba?	Se aplicará al proceso de perforación y voladura (nuevo diseño de malla)
¿Cuándo ocurrirá la prueba piloto?	Enero - Febrero 2021
¿Dónde se ejecutará la prueba piloto?	En la zona 4 de la mina El Porvenir - NEXA
¿Quiénes son los involucrados en la prueba piloto?	Operadores Jumbo, Supervisor, Jefe de Guardia, Green Belt y Ing. P&V
Plan de recolección de datos	
¿Qué se va a medir?	Se van a medir las dimensiones del burden y contar el nro de talaros en el frente del nuevo diseño de malla de perforación.
¿Quién y como se va a medir la data?	El supervisor de guardia va a medir la data con un flexometro y contabilizar corroborando según el diseño de los planos.
¿Cómo se define el éxito de la prueba piloto?	Al ejecutar el nuevo diseño se espera obtener una eficacia de avance mayor a 3.2 m/avance
Plan de entrenamiento	
¿Cuándo y donde el entrenamiento tomara lugar?	En campo al momento que realicen la perforación.
¿Quién será capacitado?	Operadores de guardias A, B y C.
¿Quién va a entrenar?	Ingeniero de perforación y voladura.
¿Qué materiales serán necesarios para llevar el entrenamiento?	Se requiere flexometro, diseño de malla, plantilla de arranque.

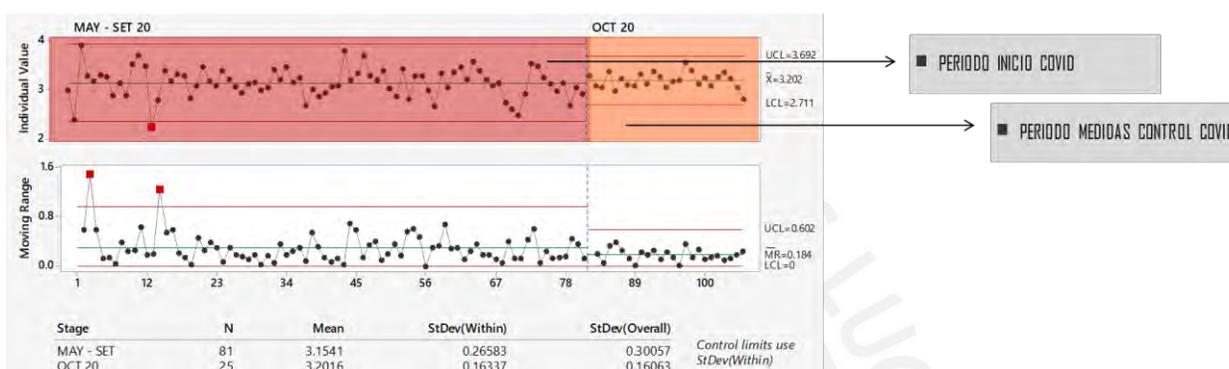
• Objetivos

- Incrementar la eficacia del indicador de metros de avance por disparo
- Incrementar la capacidad de proceso en 30% y comparar el resultado del periodo 2020 respecto al 2021

- **Criterios de éxito**

- Se espera que la implementación del nuevo diseño de malla sea efectiva. De ser así, al implementar como nuevo estándar para todos los disparos la eficacia de metros de avance por disparo se incremente en 30% como una primera etapa.

- **Pre-piloto:** resumen del comportamiento del KPOV (metros avance / disparo)



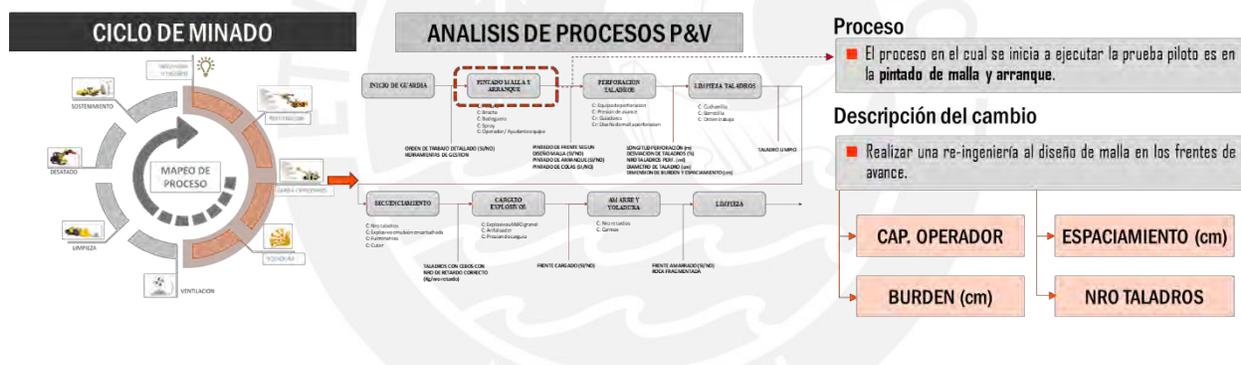
Gráfica N°35: Gráfica de control del KPOV m/disparo periodo mayo – octubre 2020

- Como se puede observar el proceso está en control antes de iniciar con el proyecto de mejora. La información del KPOV metros de avance por disparo en el periodo OCT 20 está concentrada en unos límites de especificación más reducidos a comparación del periodo anterior debido a que ya es un periodo donde se implementaron medidas de control para prevenir el impacto negativo ocasionado por el COVID, es por ello que la desviación estándar es menor. El periodo MAY - SET 20 estuvo con efecto pandemia es por ello que se ve una variación alta de metros de avance / disparo con una desviación estándar alta.

- El comportamiento del indicador metros de avance por disparo parte como línea base a partir del periodo de octubre 2020 con una media de 3.2 m. avance/disp. y desviación estándar de 0.16337 metros.

- **Detalle del plan de pruebas**

Para realizar la prueba (DOE) se ha partido del análisis de los procesos perforación y voladura, procesos unitarios parte del ciclo de minado, cuyo impacto es negativo respecto a los ingresos de la empresa debido a que el KPOV metros de avance por disparo no ha estado llegando al TARGET propuesto por el cliente, la empresa empleadora. Debido a ello se ejecutó un mapeo de subprocesos de los procesos ya mencionados anteriormente identificando en que parte están ubicados los parámetros clave que impacta a los metros de avance por disparo que son el Burden y el espaciamiento. Estos parámetros son variables de salida del subproceso pintado de malla y arranque. Todo este detalle se puede apreciar en el siguiente flujo:



Gráfica N°36: Detalle de Plan de Pruebas

A partir de ello se coordinó con la gerencia de operaciones, residente de obra, jefe de perforación y voladura y supervisores de operaciones para ejecutar un diseño de experimentos (DOE) y poder identificar el óptimo diseño de malla con el fin de obtener voladuras mayores a 3.20 metros de avance por disparo.

3.4.4. Ejecución de la prueba piloto (DOE)

- **Diseño de experimentos (DOE)**

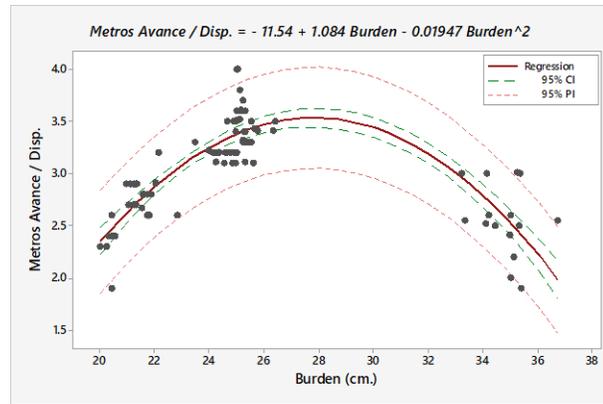
El diseño de experimentos se diferencia de la regresión debido a que en el primero se trabaja con factores y niveles determinados a diferencia del segundo que se estima la mejor distribución a partir de datos aleatorios. Además, es importante recordar que el DOE se aplica a variables controlables más no ruidos.

Para el caso de estudio se realizó una prueba sistemática la cual consiste en analizar las variables que tienen un alto impacto en el KPOV (metros de avance por disparo) para labores que tienen el tipo de roca regular con un RMR de 40 – 61 y una sección de 4.5m x 4.0 m. Esta prueba será de dos factores los cuales son Burden y número de taladros, cada factor de dos niveles que estarán en un rango que son denominados intervalos de predictibilidad y se realizarán 3 réplicas. Como se mencionó líneas arriba el objetivo es que se pueda obtener disparos mayores a 3.40 metros de avance. A continuación, mayor detalle de los factores.

- **BURDEN (20 – 25 – 35 cm)**

La mejor distribución obtenida de disparos ejecutados en las operaciones fue cuadrática, es por ello que se considera que el Burden debe ser parabólica siendo 25 cm dato óptimo.

Para un menor Burden, mayor es el poder rompedor al activarse la energía del explosivo. Sin embargo, si es demasiado corto el Burden se da una insensibilización de cartuchos ya que estarían muy cerca los taladro que detonan un uno pulveriza el explosivo (anfo) del otro.



Gráfica N°37: Gráfica de Regresión m/disparo respecto al burden

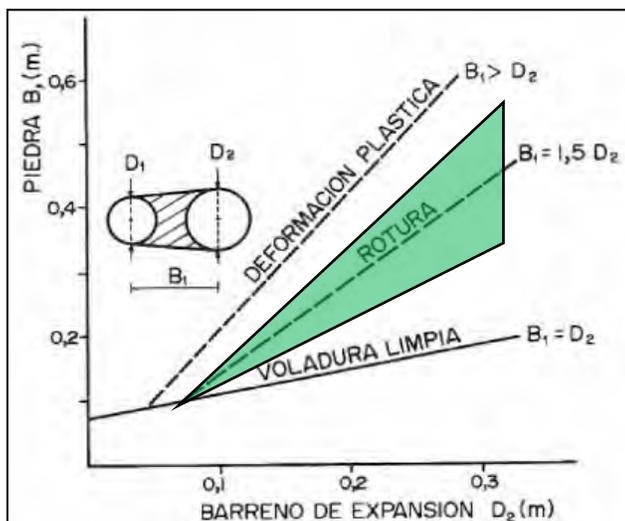
Para que se pueda elegir el Burden del nuevo diseño de malla se ha utilizado los siguientes algoritmos matemáticos de voladura:

- Diseños de burden para arranques

Propuesto por Langefors y Kihlstrons 1963, revisado por Holmberg 1982 y mejorado por Pearson 2001:

- Si el Burden supera 2Φ de broca rimadora; el ángulo de abertura-rotura será deficiente ocasionando el fallo del arranque.
- Si el Burden es menor Φ de broca rimadora; más una alta concentración de carga causaría la sintonización de la roca fragmentada y el fallo del arranque.
- Para este caso específico de arranques; la relación geométrica y la deformación plástica es el único efecto de la voladura. Por lo tanto, la distancia entre el taladro de alivio y los taladros de rotura no debe exceder de 1.7Φ para obtener una abertura y rotura satisfactoria de la roca.

Propuesto por López Jimeno:

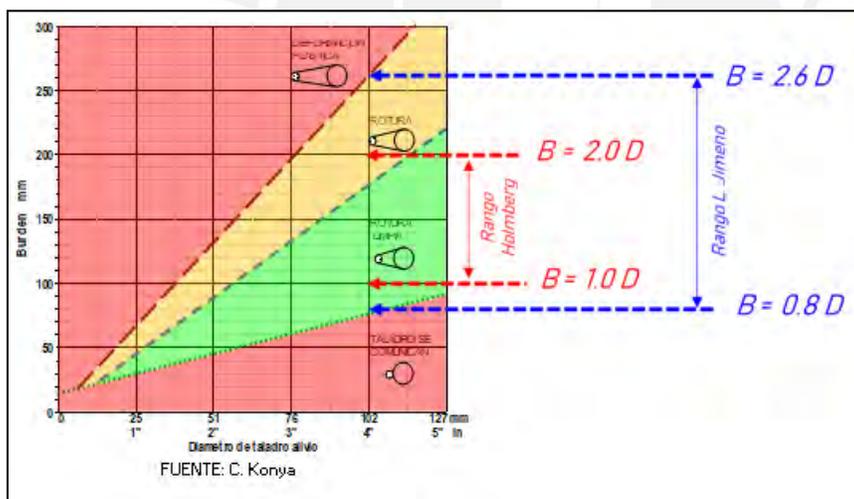


Gráfica N°38: Diseño de Burden – Lopez Jimeno

Análisis:

Lo óptimo para ejecutar una buena rotura del arranque según López Jimeno es que el Burden sea 1.5 veces el diámetro del diámetro de la broca rimadora.

Propuesto por Konya:

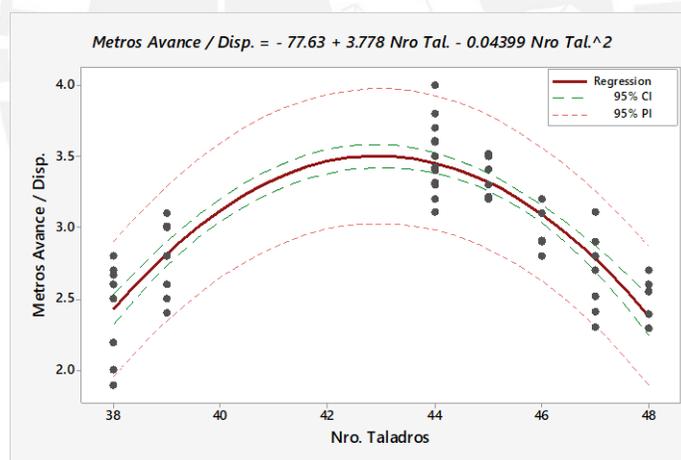


Gráfica N°39: Diseño de Burden – Konya

- Para Konya cuando el diámetro de taladro de alivio está en un rango 4" a 5" el Burden optimo puede estar en un rango óptimo de 10 cm a 30 cm. Sin embargo, también está el detalle de los rangos óptimos planteado por Holmberg ($B = 1.0D - 2.0D$) y López Jimeno ($B = 0.8D - 2.6D$).

NRO TALADROS (39 - 44 – 48)

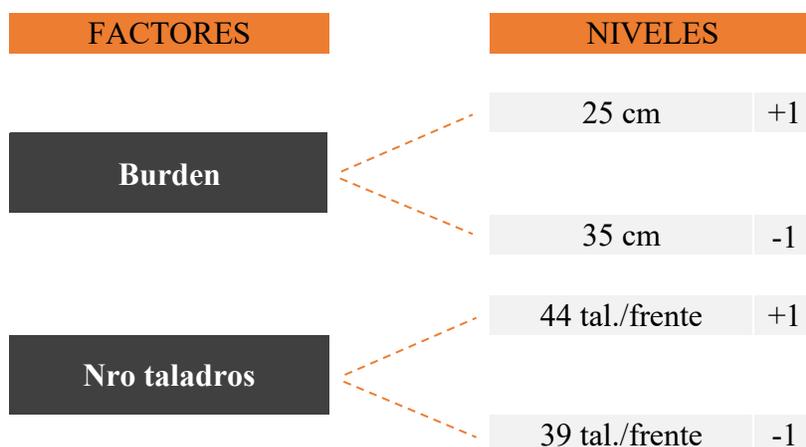
- La mejor distribución obtenida de disparos ejecutados en las operaciones fue cuadrática, es por ello que se considera que el Nro taladros debe ser parabólica siendo 44 taladros dato óptimo.
- Al ejecutar un mayor número de taladros existe un límite de despacho de explosivo además existe una alta sensibilidad al error humano en el carguío y secuenciamiento. Además, el realizar un mayor número de taladros genera un costo adicional en consumo de suministros como aceros de perforación y explosivos. Por otro lado, a menor número de taladros el espaciamiento entre las familias de taladros (arranque, 1era ayuda, 2da ayuda, 3ra ayuda, etc) estará más alejado por lo tanto la energía liberada de los taladros no tendrá el mismo efecto rompedor al tener el número de taladros óptimo.



Gráfica N°40: Gráfica de regresión m/disparos respecto al Nro de taladros ejecutados

- **Clasificación de variables**

La clasificación de variables para el diseño de experimentos (DOE) como se puede observar en el siguiente gráfico será de 2 factores con 2 niveles y 3 réplicas; además, se va a analizar cuál es la sensibilidad de las variables.



Gráfica N°41: Clasificación de variables Burden y Nro de taladros DOE (factores y niveles)

- Evidencia realizada en campo:



Gráfica 42: Diseño de arranque Burden 25 cm



Gráfica 43: Malla de perforación con Burden 25 cm



Gráfica 44: Diseño de arranque Burden 35 cm



Gráfica 45: Malla de perforación con Burden 35 cm

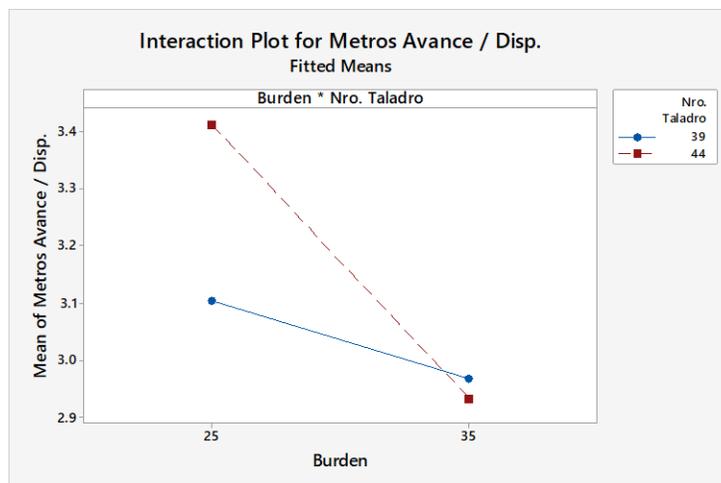
- **Resultados del diseño de experimentos**

Tabla N°20: Resultados de las 12 voladuras

Burden	Nro taladros	Metros Avance / Disparo		
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
25	44	3.41	3.39	3.44
25	39	3.10	3.09	3.12
35	44	2.81	2.85	2.87
35	39	2.95	2.98	2.97

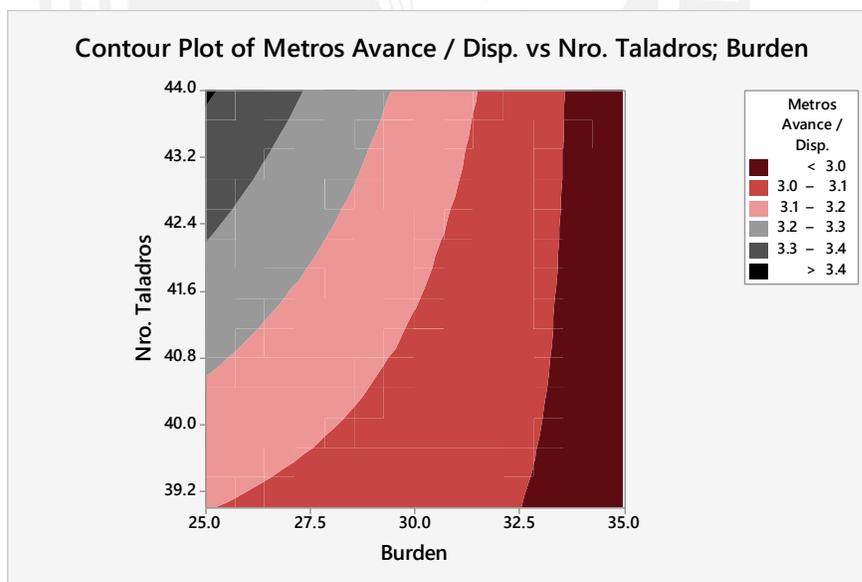
Se puede observar lo siguiente a partir de los resultados:

- A un Burden 25 cm y número taladros 44 es el óptimo, ya que es un Burden que genera una buena rotura y hace cara libre correctamente, además, el número de taladros distribuidos correctamente darán un buen avance por disparo resultado de ello disparos de 3.40 metros.
- A un Burden de 25 cm y número de taladros 39 se obtuvo voladuras regulares debido a que el arranque puede que salga bien, pero la distancias entre los taladros al tener una distribución mayor hará que no se aproveche adecuadamente la energía de los explosivos.
- A un Burden 35 cm y número taladros 44 al ser mayor el Burden y el frente cargados de muchos taladros pegados se genera un dead preasing haciendo que la voladura no se ejecute de manera adecuada y los metros de avance resultaron bajos.
- A un Burden 35 cm y 39 taladros resulto una voladura de casi 3 metros se debe a que a mayor dimensión de Burden menor el número de taladros. Sin embargo, según los resultados no la combinación óptima.



Gráfica N°46: Gráfica de interacción entre Burden y Nro de taladros

Existe una interacción entre el Burden y el número de taladros. Si el Burden es menor y el número de taladros mayor se obtendrá un metro de avance alto, por otro lado, si el Burden es mayor y el número de taladros mayores la eficacia del disparo es baja.



Gráfica N°47: Gráfica 2D de líneas de contorno de interacción entre Burden y nro de taladros

- Gráfica 2D de líneas de contorno de la relación entre dos predictores continuos (Burden y nro taladros) para una respuesta ajustada respecto a metros de avance por disparo.

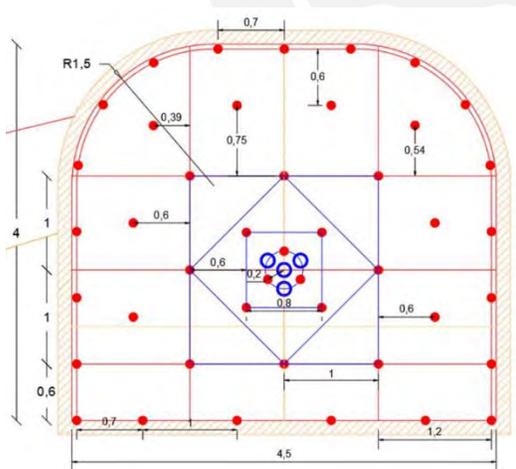
- Se obtendrá mayores metros de avance por disparo cuando el Burden este en el rango de 25 – 26 cm con un numero de taladros 44.
- De los resultados obtenidos por el DOE se optó por usar los valores que dan un avance por disparo óptimo en el nuevo diseño de malla:
 - Burden: 25 cm
 - Número de taladros: 44 cargados

3.4.5. Resultados fase mejora

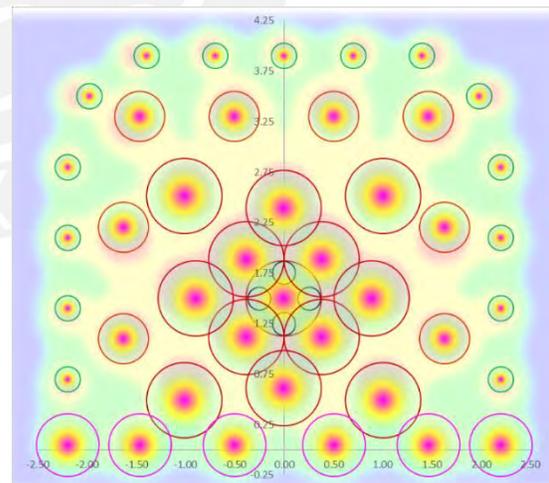
• Resultados Técnicos – Diseño de malla

Se ha obtenido el siguiente diseño de malla que será implementado como nuevo estándar para las labores de avances de la empresa contratista.

El resultado del diseño de malla y simulación de voladura fue la siguiente:

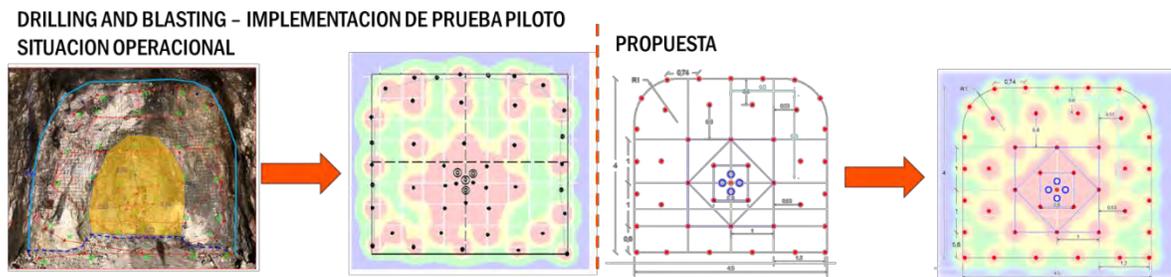


Gráfica N°48: Diseño de Malla



Gráfica N°49: Distribución Energética

El resultado del diseño de malla vs la malla estándar que se estaba usando fue la siguiente:

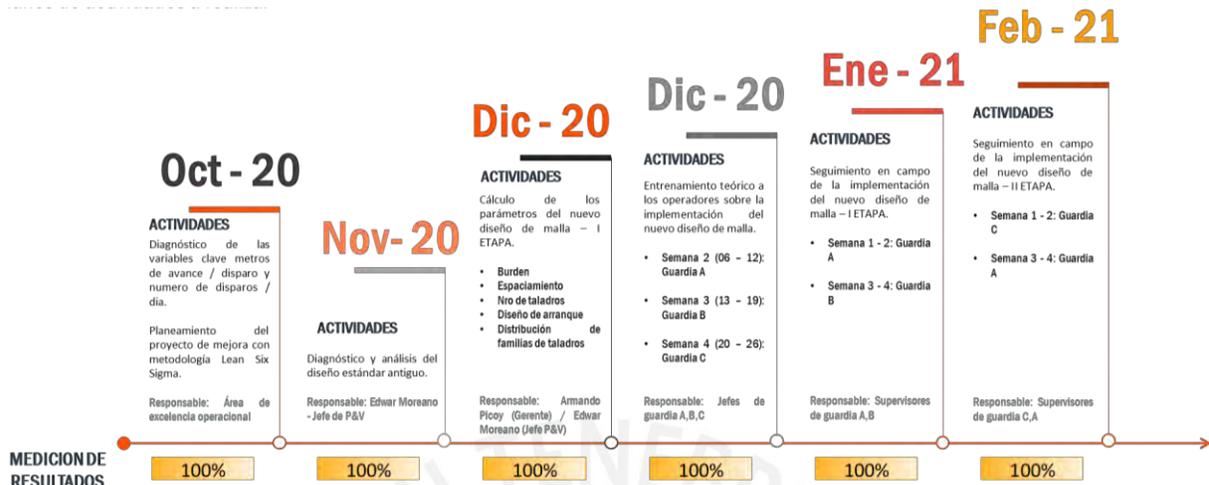


Gráfica N°50: Implementación Prueba Piloto

Como se puede observar en la parte izquierda hay una mala distribución de los taladros de perforación que al momento de ser simulados con el software jk-simblast se evidencia una mala distribución de la energía liberada por los explosivos cargados en cada taladro. Por otro lado, el diseño de malla propuesto tiene una mejora distribución de taladros, una óptima dimensión de Burden y la distribución de energía es más controlada.

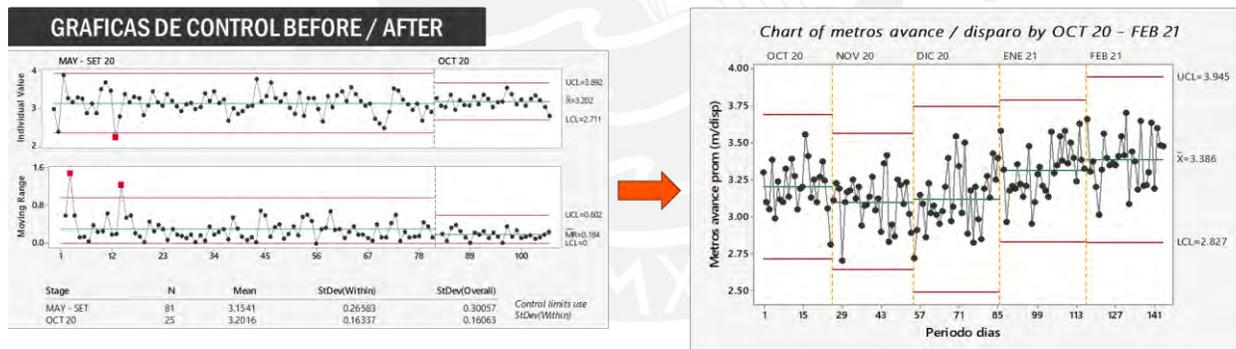
- **Resultados operativos – metros de avance por disparo**

Para que se pueda implementar lo mencionado se realizaron las siguientes actividades durante el periodo de octubre 2020 hasta febrero 2021:



Gráfica N°51: Planes de actividades a realizar

El diseño de malla presentado anteriormente se ha implementado como propuesta de mejora para las voladuras en el periodo de enero, febrero del 2021 y los resultados son los siguientes:

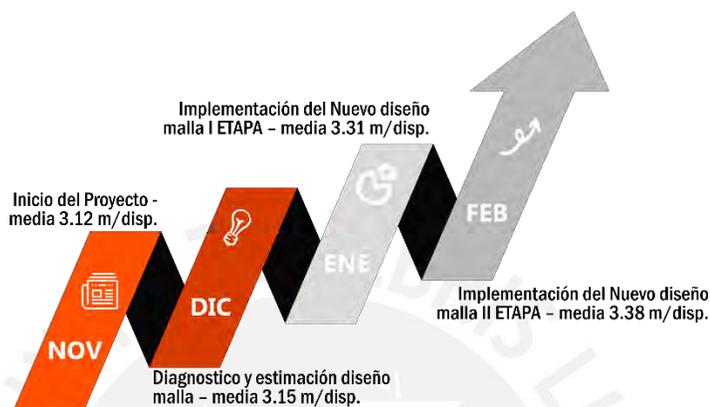


Gráfica N°52: Gráfica de control período Octubre - Febrero

Análisis:

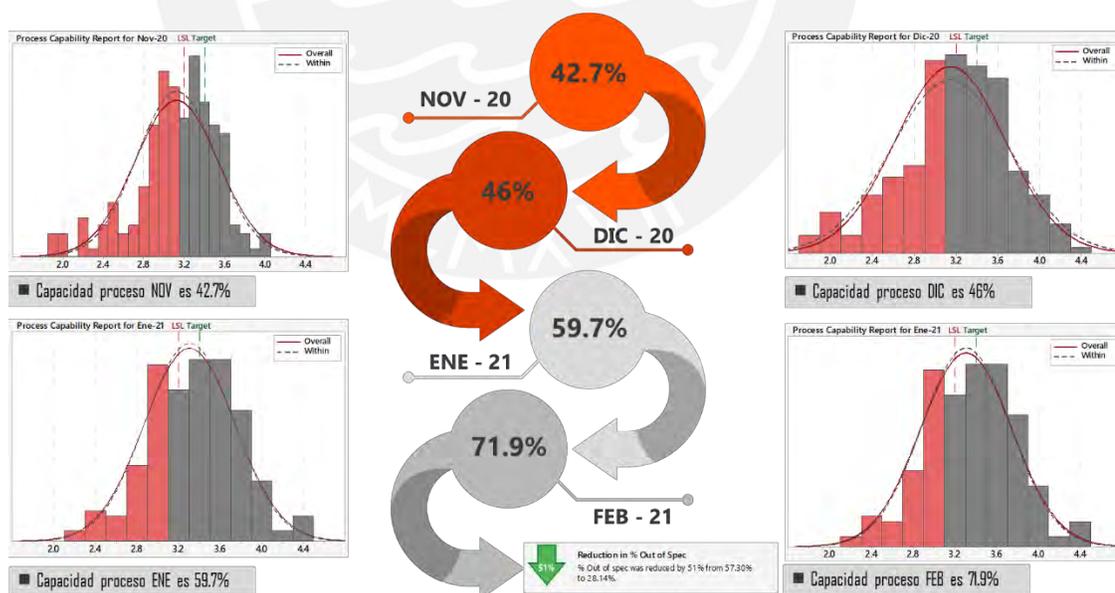
Como se puede observar el proceso está en control en los meses analizados. Los meses de noviembre y diciembre se nota una ligera variación negativa de la media debido a que recién estaba iniciando el proyecto y estaba en la etapa de estimación y cálculo de la prueba piloto que es el nuevo diseño de malla.

La media del proceso sigue siendo menor al TARGET (3.40 m avance / disp.); sin embargo, en la gráfica de control se puede observar un crecimiento de la media debido a la mejora, este cambio se nota más en el periodo de enero y febrero que fueron los meses iniciales de la prueba piloto al implementar el nuevo diseño de malla.



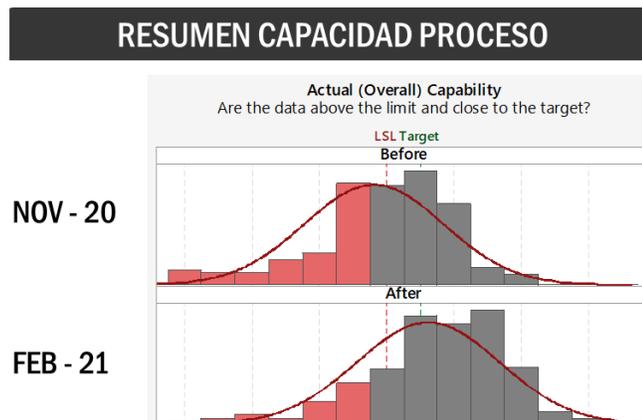
Gráfica N°53: Resumen de media de metros de avance por disparo

- Resultados capacidad de proceso - % fuera de especificación



Gráfica N°54: Porcentaje fuera de especificación

Existe una clara reducción del % fuera de especificación en 51% del 57.30% a 28.14%



Gráfica N°55: Resumen Capacidad del Proceso

¿La media del proceso cambio?

El cambio de la media del proceso fue de 3.12 m/disp a 3.44 m/disp con un incremento del 10.25%. El objetivo de la empresa es obtener avances iguales o mayores a 3.4 m/disp. Aun faltaría establecer controles para que esta mejora sea sostenible en el tiempo.

Principales efectos

Positivos

- Incremento en los metros de avance por disparo
- Disminuyo el % fuera de especificación en 51%
- El cliente ha observado las mejoras de eficacia

Negativos

- Al inicio hubo resistencia al cambio por parte de algunos supervisores y operadores.
- Realizar una re-ingeniería al diseño de malla en los frentes de avance tomo un periodo de 23 días.

3.5. Etapa Controlar

Luego de observar los resultados del diseño de experimentos (DOE) se decidió, en una reunión con gerencia, implementar el nuevo de diseño de malla con un Burden de 25 cm y 44 taladros perforados de manera estándar para todos los frentes de avance para todas las secciones de 4m x 4.5m. Es aquí donde ya se inicia la etapa de control para que se puede tener la certeza de que toda la supervisión y los operadores estén alineados bajo un mismo diseño y sea sostenible en el tiempo el nuevo diseño de malla implementado.

3.5.1. Sostenimiento de mejora

Realizar una re-ingeniería al diseño de malla en los frentes de avance trajo consigo variable claves a controlar los cuales son:

- Perforación de frente por operador
- Dimensión de la ejecución del Burden entre taladros de arranque
- Dimensión de ejecución del espaciamiento entre familia de taladros
- Numero de taladros perforados por frente de avance

Para que la empresa tenga un control detallado se generó en Power BI un dashboard, como se puede observar en la siguiente gráfica, con la información mencionada anteriormente.



Gráfica N°56: Dashboard de control de los metros de avance en Power BI

El control del KPI metros de avance por disparo se empezó a ejecutar con una frecuencia por guardia con supervisión en campo. Por otro lado, de manera semanal a través de gráficos de control de control. Todo ello con la finalidad de analizar los resultados semanales en reuniones de calidad.



Gráfica N°57: Flujo de control de los metros de avance por disparo



Gráfico N°58: Reunión de calidad de los resultados metros avance por disparo con el gerente de operaciones, jefe de perforación voladura y residente de obra

3.5.2. Formato plan de control

Se ha realizado en plan de control para la variable número de taladros por frente de la siguiente manera:

Todo inicia en el proceso perforación de taladros, el ítem de control está enfocado a calidad y el objetivo es obtener la información de número de taladros. Las mediciones se realizarán rellenando la cantidad de taladros perforados en cada frente en un formato de reporte que todos los operadores poseen, luego estos formatos son digitados y actualizados en la base de datos del área de productividad. Como medida de control la cantidad de número de taladros debe de estar en el rango de 43 a 45 taladros perforados por frente y será representado en un gráfico de control diario. Las personas responsables de facilitar y procesar la información son los operadores de jumbos y los analistas de productividad ya que tiene que verificar que toda la información solicitada este correctamente llenada.

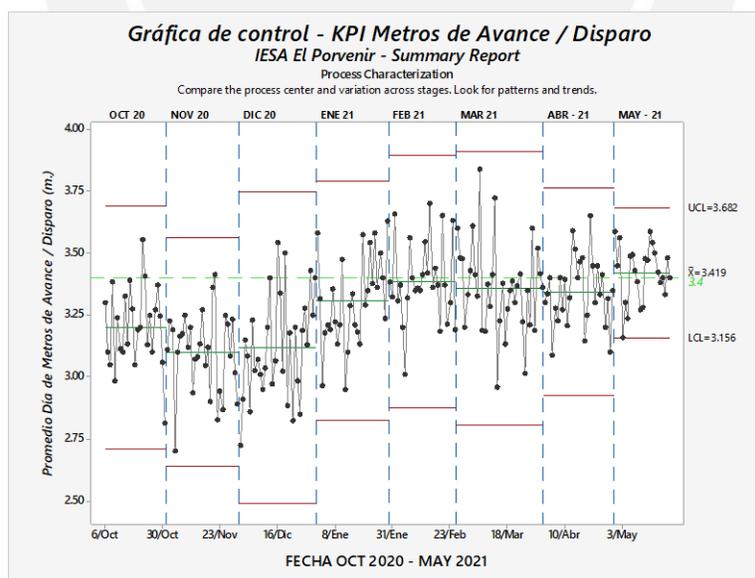
Respecto al control del indicador metros de avance por disparo el control inicia en el proceso pos-voladura, el ítem de control está enfocado a calidad y costo cuyo objetivo es obtener y mostrar los resultados de metros de avance por disparo dentro del valor 3.40 m con una desviación estándar de +/- 20 centímetros. Para ello se planteó realizar un seguimiento por guardia para que posteriormente en las reuniones de calidad se pueda presentar un reporte semanal. Las mediciones se van a realizar en campo a cargo del área de topografía para que luego toda esa información sea alimentada y analizada por el área de perforación y voladura. Por otro lado, se ha implementado un dashboard de ranking de operadores en el cual, en una reunión con gerencia, se llegó a un acuerdo de incentivar con un bono de 200 soles a los 3 mejores operadores de las guardias A, B y C.

Tabla N°21: Plan de control para número de taladros perforados por disparo y metros avance por disparo

PROCESO PERFORACIÓN Y VOLADURA							Fecha: 02/05/2021	Rev: 01
Pasos proceso	Items control			Mediciones			Metodos Control	
	Descripción	Q,C,D	Frecuencia de muestreo	¿Cómo?	Target	Gráfico / Reporte	¿Quién?	¿Cómo?
1. Perforación taladros	Obtener la información de Nro. Taladros	Q	Por frente perforado	Rellenar la cantidad de taladros perforados en el reporte operativo Digitar y actualizar todos los reportes de los operadores Jumbo	44 tal. +/- 1 tal.	Cada operador tiene una hoja donde rellena las actividades que realiza Gráfico de control a fin del día	Operadores de jumbos Analista productividad	Termina de perforar el frente completa el nro de taladros Verificar toda la información de nro. taladros en la base de datos
	Obtener resultados metros avance / disparos	Q	Cada guardia (Día / Noche)	Medir campo disparos ejecutados	3.40 m +/- 0.2m	Presentar reporte día metros de avance por disparo a la compañía minera	Jefe de topografía Jefe de planeamiento	Actualizar la base de datos en el nuevo formato Actualizar la presentación de la ruta crítica para la reunión diaria
2. Pos-voladura	Mostrar los resultados de metros avance / disparo	Q	Semanal	Modificar, actualizar la base de datos y llevar un control semanal a partir del 2021		Gráfico de control a fin del día	Jefe de perforación y voladura	Realizar reuniones de calidad semanales mostrando los resultados del KPI m. avance / disp.
		C	Semanal	Mostrar el ranking de los mejores 3 operadores jumbo		Dashboard diseñado por productividad	Gerente de operaciones	Motivar al personal e incentivar económicamente evidenciando los mejores operadores de la contrata

3.5.3. Resultado antes y después de la mejora

Se puede observar en la gráfica de control de metros de avance por disparo del proceso de perforación y voladura que se ha generado una mejora significativa con respecto a las medias y a los límites de especificación durante el periodo octubre 2020 hasta mayo 2020.



Gráfica N°59: Gráfica de control de KPI metros de avance por disparo desde octubre 20 hasta mayo 21 con límites de especificación de la data mensual

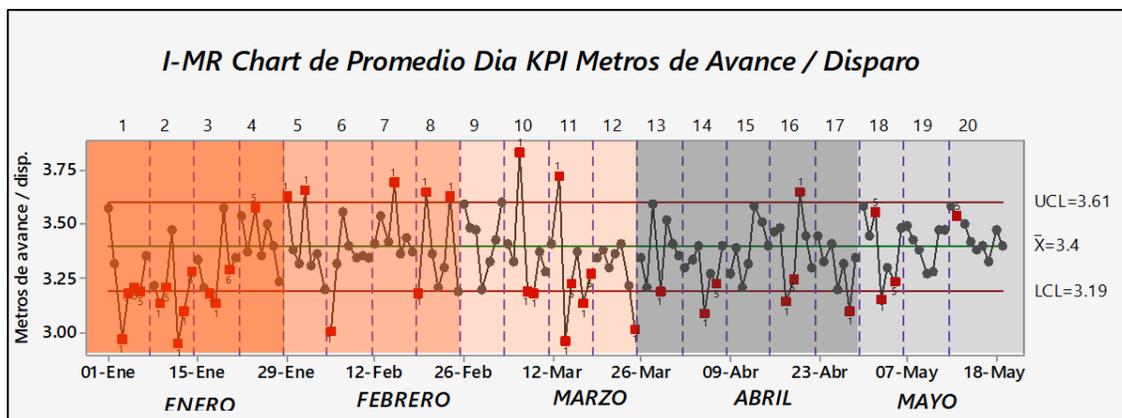
El análisis que se realizó de la gráfica anterior fue lo siguiente:

- Octubre inicio del proyecto – media 3.202 m. avance / disp.
- Noviembre y diciembre se estuvo ejecutando el diagnóstico y análisis del diseño de malla antiguo – medias 3.12 m, y 3.141 m. respectivamente.
- Enero se realizó la prueba piloto e implemento el nuevo diseño de malla. Las medias de enero y febrero incrementaron a 3.312 m. y 3.386 m.
- Marzo hubo mejoras, sin embargo, la guardia B aún se resistía al cambio de migrar a un diseño de malla estándar con especificaciones definidas de Burden 25 cm y 44 taladros perforados. Media del mes 3.359 m.
- Abril se continuó con el proceso de estandarizar el nuevo diseño de malla hubo mejora respecto al mes de marzo respecto a desviación estándar fue menor. Media del mes 3.344 m.
- Mayo ya se puede notar que el proceso está entrando en control la media mejora con un resultado de 3.419 m y la desviación estándar disminuye.

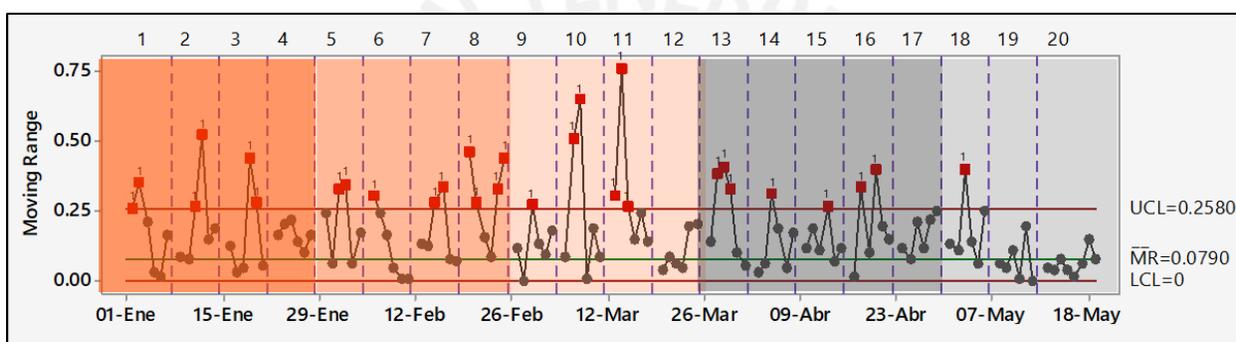
Por otro lado, se hizo la misma corrida de gráfica de control con la diferencia de los periodos que fueron semanales y los límites de especificación fueron según la voz del cliente:

- Límite de especificación inferior (LCL) 3.20 m
- Límite de especificación superior (UCL) 3.60 m
- Media metros de avance por disparo 3.40 m

Se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica N°60: Gráfica de control de KPI metros de avance por disparo desde enero 21 hasta mayo 21 con límites de especificación según la voz del cliente



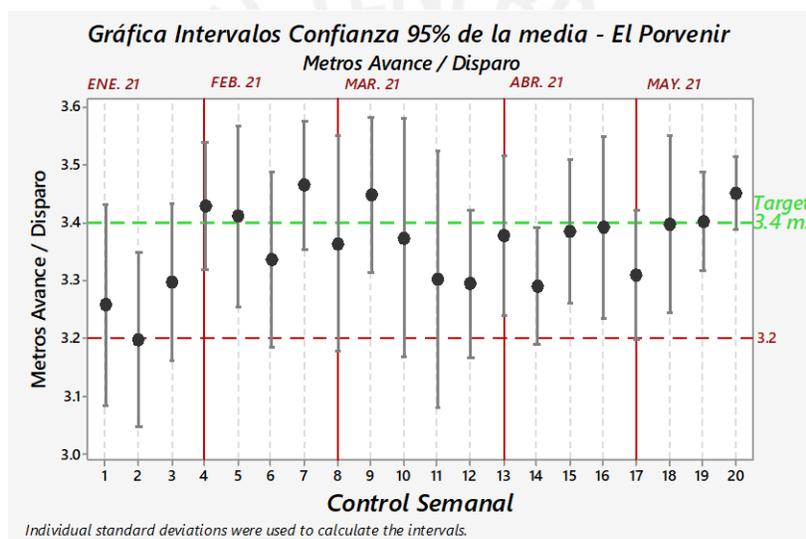
Gráfica N°61: Gráfica de rango móvil de KPI metros de avance por disparo desde enero 21 hasta mayo 21

Análisis de las gráficas anteriores:

- En las semanas 1, 2, 3 y 11 se evidencia mayor incidencia de voladuras fuera de las especificaciones dadas por la compañía (3.2 m. avance / disp.).
- En el mes de abril y mayo se puede observar que el KPI metros de avance por disparo del proceso perforación y voladura ya está entrando en control debido a que hay menor cantidad de puntos rojos en la gráfica de control para el periodo mencionado.

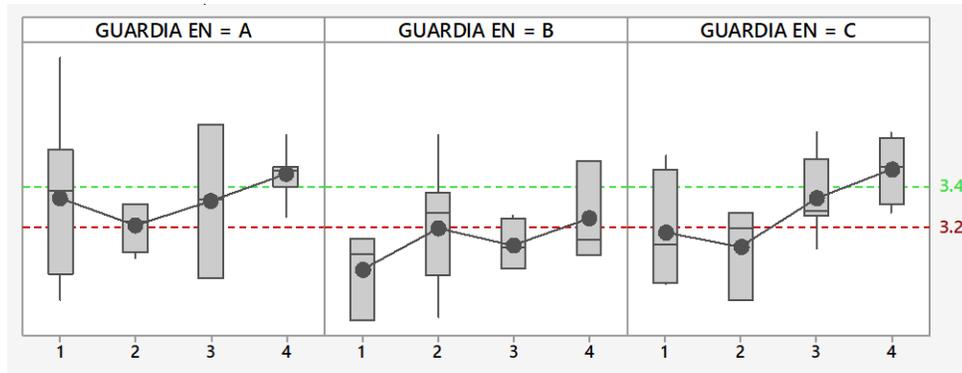
En el mes de mayo se puede observar que la desviación estándar del KPI metros de avance por disparo del proceso perforación y voladura es menor ya que el rango móvil no es tan variable. Esto quiere decir que está entrando en control.

A continuación, se va a presentar un análisis más detallado y justificado de lo mencionado anteriormente para ello se ha elaborado boxplots por guardias A, B y C de cada mes y una gráfica de intervalos de confianza de las medias al 95% en la cual se puede observar el comportamiento semanal de la mejora y control del proyecto:



Gráfica N°62: Gráfica de intervalo de confianza 95% de la media en periodos semanales

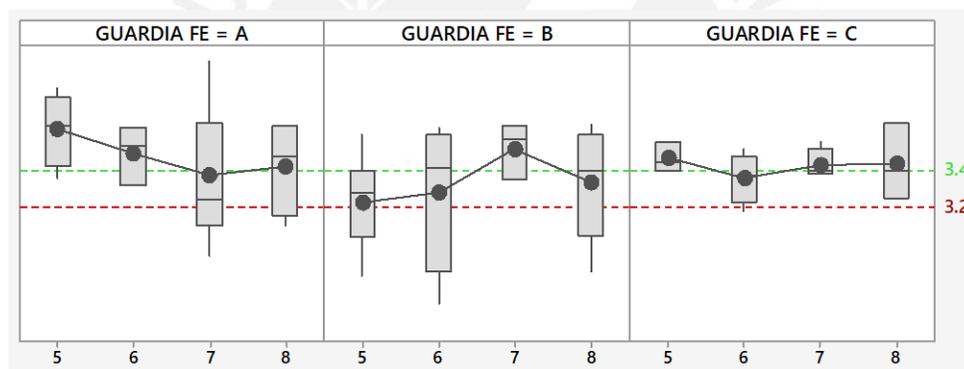
Análisis enero 2021:



Gráfica N°63: Boxplots semanal del mes de enero por guardias A,B,C

- La semana 2 se tuvieron disparos menores a 3.2 metros.
- Semana 3 y 4 hubo mejora en los metros de avance con unas medias de 3.296 y 3.428 respectivamente.
- Como recién se estaba implementando la mejora en enero los disparos ejecutados en la semana 1 y 2 están por debajo de los límites de especificación inferior.
- La guardia B es la guardia que tiene más bajo rendimiento respecto a las otras dos razones por la cual los intervalos de confianza semanales tienen un rango muy amplio y por debajo de los 3.20 metros de avance.

Análisis febrero 2021:

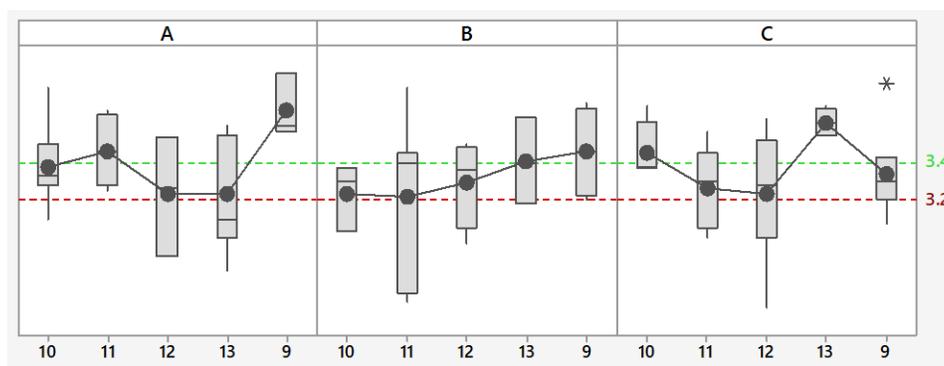


Gráfica N°64: Boxplots semanal del mes de febrero por guardias A,B,C

- Los rangos de los intervalos de confianza de las semanas 5 y 7 están por encima del límite de especificación inferior (3.20 metros avance / disparo).
- Las semanas 6 y 8 las medias estaban por encima de los 3.2 sin embargo el rango inferior del IC aún estaba debajo de los 3.20 m.
- En las semanas 6 y 8 la guardia B a ejecutado disparos por debajo de los límites de especificación razón por la cual en los resultados estadísticos de IC los rangos son más amplios para las semanas mencionadas.

- La guardia C tiene el mejor performance respecto a las otras guardias en todas las semanas de operación ejecutaron disparos por encima de los 3.2 metros de avance y con medias por encima del target 3.4 m.

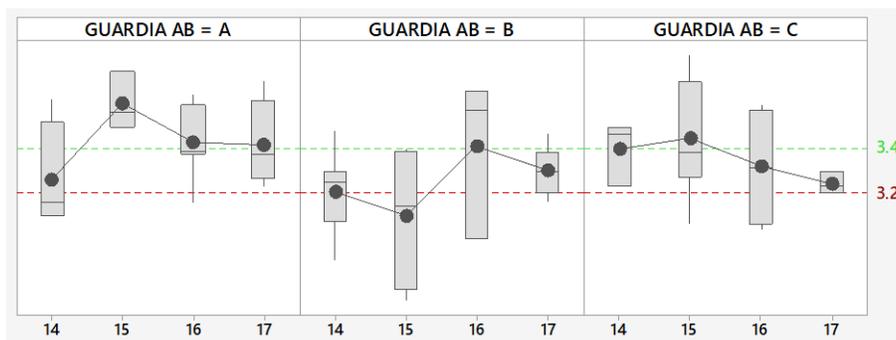
Análisis marzo 2021:



Gráfica N°65: Boxplots semanal del mes de marzo por guardias A,B,C

- Los rangos de los intervalos de confianza de las semanas 9 y 13 están por encima del límite de especificación inferior (3.20 metros avance / disparo).
- Las semanas 10, 11 y 12 las medias estaban por encima de los 3.2 sin embargo el rango inferior del IC aún estaba debajo de los 3.20 m.
- La guardia B la semana 11 tuvo disparos muy por debajo de los 3.2 metros. Además, las guardias A, B y C la semana 12 tuvieron resultados deficientes.
- En el mes de marzo existieron disparos por debajo de los 3.20 metros debido a que entraron operadores nuevos para la guardia B y hubo cambio de supervisión de la guardia C en la semana 12.

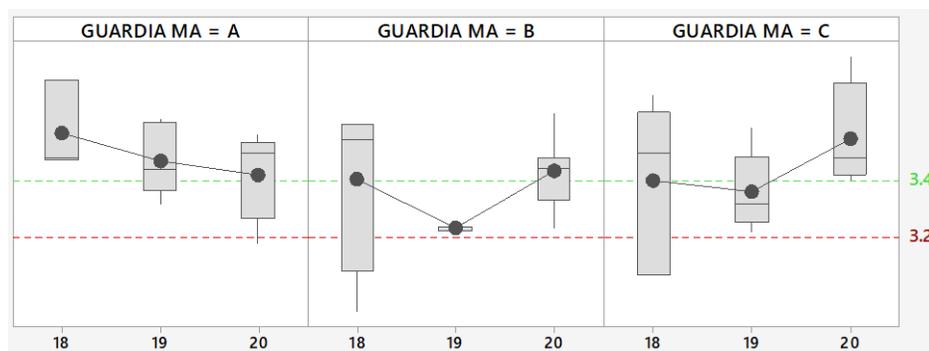
Análisis abril 2021:



Gráfica N°66: Boxplots semanal del mes de abril por guardias A,B,C

- Los rangos de los intervalos de confianza de las semanas 15 y 16 están por encima del límite de especificación inferior (3.20 metros avance / disparo).
 - Las semanas 14 y 16 las medias estaban por encima de los 3.2 sin embargo el rango inferior del IC aún estaba debajo o igual de los 3.20 m.
 - La guardia B las semanas 15 y 16 se tuvieron disparos muy por debajo de los 3.2 metros.
- La guardia A y C muestran mejoras en sus resultados.
- En el mes de abril existieron disparos por debajo de los 3.20 metros debido a que existe una resistencia al cambio para algunos operadores de la guardia B.

Análisis mayo 2021:



Gráfica N°67: Boxplots semanal del mes de mayo por guardias A,B,C

- Los rangos de los IC de las semanas 18, 19 y 20 están por encima del límite de especificación inferior (3.20 metros avance / disparo).
- Se nota que ya hay mejora con respecto a las gráficas de IC a un 95% respecto a la media y los disparos ejecutados ya empiezan a estar en control.
- La semana 18 la guardia B aún estaba en proceso de mejor; por otro lado, la guardia A tiene medias por encima del target 3.4 metros avance.
- En el mes de mayo existieron disparos por debajo de los 3.20 metros de la guardia B y C, Las medias de todas las semanas, así como su IC están dentro de las especificaciones por la empresa empleadora.

3.5.4. Estandarizar los cambios

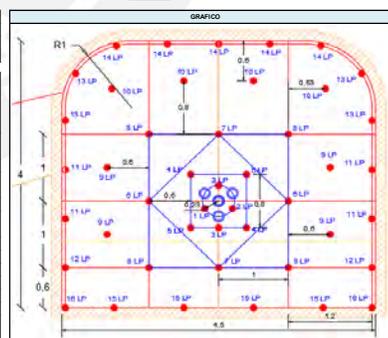
Se ha implementado el estándar corporativo de diseño de malla de la empresa contratista para la unidad minera.

	FORMATO	CODIGO: F-COR-0PE-40
	DISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN	VERSION: 01
		PAGINA: 01 de 02

SEDE / PROYECTO: UM. EL PORVENIR

REVISION: 2

DESCRIPCION	N° Tal	CANTIDADES POR TALADRO						ACCESORIOS		OBSERVACION	
		E 100 1.14" x 12"		E 80 1.14" x 12"		E 60 1.14" x 12"		ESAMON - P	Retardo FaseIt		
		Car/Tal	Total	Car/Tal	Total	Car/Tal	Total				Kg/Tal
Atado (Retroado)	4									Factor de Avance (kg/m)	
Antorpe	4	1	4	0	0	0	6.2	16.8	LP 1, LP 2, LP 3, LP 3	4	42.37
Trasa Ayuda	4	1	4	0	0	0	4.2	16.8	LP 4, LP 5	4	
Cap Ayuda	4	1	4	0	0	0	4.2	16.8	LP 6, LP 7	4	Factor de Carga (kg/m ³)
Subayuda	4	1	4	0	0	0	4.1	16.4	LP 8	4	2.4
Ayuda de Adital	4	1	4	0	0	0	3.3	13.1	LP 9	4	Factor de Potencia (kg/m)
Ayuda de corona	4	1	4	0	0	0	3.3	13.1	LP 10	4	
	0						0.0	0.0		0	0.72
Adital I	4	1	4	0	0	0	20	80	LP 11	4	Eficiencia de Avance
Adital II	2	1	2	0	0	0	3.5	7.0	LP 12	2	60%
Corona	5	1	5	0	0	0	45	0.0	LP 13, LP 14	9	Sobres rotura
Arriata	6	11	66	0	0	0	0.0	0.0	LP 15, LP 16	6	<= 10%
TALADROS PERFORADOS	49	Total car	105	Total car	0	Total car	65	Total car	100.005		Factor Perforación
KILOGRAMOS DE EXPLOSIVO	146.10	29.17	0.00	KG	16.93	KG	100.00	KG	Total	45	49.18



CONTROL DE CAMBIOS			
Se incrementa la cantidad de cordón detonante a 75 m para labores de 4.5 x 4.0 m para el uso en la preparación de cañas, siendo este cordón Detonante de SP			
Se labora con presencia de lluvia y desmenuzamiento, el cargado del amonaje se realizará con malla nueva. Además se implementará uso de tacón de acrílico			
Se incrementa labidos cargados en el contorno reduciendo la cantidad de kilogramos de explosivo por taladro			
Se modifica el diseño del amonaje			

DATOS			
EQUIPO:		JUNBO	
PERSONAL:		RUESTO	CANTID.
		Operador Junbo / Ayudante	2
		Cargador Ayudante	2

Gráfica N°68: Estándar Corporativo de diseño de malla

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se ha realizado una evaluación técnica – económica del proyecto de mejora con un comparativo sin piloto y con piloto. Además, el proyecto contiene un CAPEX total de \$ 27,000.00 dólares y un wacc de 6%. La empresa contratista cobra \$ 574.64 por metro de avance a la empresa empleadora y su costo operativo por metro de avance es \$ 485 por metro de avance. Con los datos mencionados se ha calculado el valor en ingresos

Ingresos

Con los datos mencionados se ha calculado el valor agregado en ingresos resultado de la diferencia de la corrida con piloto y sin piloto. Los resultados se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla N°22: Evaluación Económica ingresos

MES	NRO DISP / MES	METROS AVANCE / DISP.		VALORIZACION (INGRESOS) USD\$		
		PILOTO	SIN PILOTO	PILOTO	SIN PILOTO	BENEFICIO
Oct-20	240	3.21	3.12	\$ 442,708.20	\$ 430,295.82	\$ 12,412.38
Nov-20	280	3.12	3.12	\$ 502,011.79	\$ 502,011.79	\$ -
Dic-20	275	3.15	3.12	\$ 497,788.14	\$ 493,047.30	\$ 4,740.84
Ene-21	345	3.31	3.12	\$ 656,218.37	\$ 618,550.25	\$ 37,668.12
Feb-21	336	3.39	3.12	\$ 653,773.82	\$ 602,414.15	\$ 51,359.67
Mar-21	356	3.36	3.12	\$ 687,369.99	\$ 638,272.14	\$ 49,097.86
Abr-21	363	3.34	3.12	\$ 697,548.15	\$ 650,822.43	\$ 46,725.71
May-21	375	3.42	3.12	\$ 736,769.54	\$ 672,337.22	\$ 64,432.32
Jun-21	384	3.46	3.12	\$ 762,616.60	\$ 688,473.32	\$ 74,143.28
Jul-21	390	3.40	3.12	\$ 761,982.19	\$ 699,230.71	\$ 62,751.47
Ago-21	390	3.40	3.12	\$ 761,982.19	\$ 699,230.71	\$ 62,751.47
Set-21	390	3.40	3.12	\$ 761,982.19	\$ 699,230.71	\$ 62,751.47
Oct-21	390	3.40	3.12	\$ 761,982.19	\$ 699,230.71	\$ 62,751.47
Nov-21	390	3.40	3.12	\$ 761,982.19	\$ 699,230.71	\$ 62,751.47
Dic-21	390	3.40	3.12	\$ 761,982.19	\$ 699,230.71	\$ 62,751.47
P.U \$/M	574.65			\$ 9,765,989.52	\$ 9,491,608.70	\$ 717,089.02

En la tabla N°17 se puede observar cómo ha ido mejorando la media respecto al periodo de octubre y noviembre. Desde el mes de julio se está proyectando hasta fin de año una media de 3.40 metros de avance por disparo debido a que el proceso ya entró en control. Se está haciendo un análisis comparativo de KPI metros de avance por disparo con mejora y sin

mejora. El resultado del valor agregado que le genera el proyecto en ingresos es \$ 717,089.02 dólares.

Costos

En la siguiente tabla se puede observar el valor de los costos por metro lineal que se dividen en materiales \$ 94.51/metro de avance, mano de obra \$ 104.55/metro avance y equipos \$ 273/metro avance dando un total en costo de \$ 485/metro avance.

Tabla N°23: Detalle de costos directos de un metro de avance por disparo

LABOR AVANCE (SECCIÓN: 4.5x4.0) (T.ROCA: IIBB) (UND: m)					JORNADA: 10.3 H-H/GUARDIA		
					RENDIMIENTO 6.05 m/GUARDIA		
CODIGO	DESCRIPCION	Cuadrilla Equipo	Unidad	CANTIDAD	UNITARIO US\$	PARCIAL US\$	TOTAL US\$
000008	BROCA 45 MM		UND	0.1834	85	15.59	
000029	BROCA RIMADORA 4 PULG.		UND	0.0217	400	8.68	
0001202	BARRA DE JUMBO DE 14PIES		UND	0.0275	500	13.75	
0001901	PUNTA SCALER		UND	0.001	360	0.36	
0003001	ACOPLE		UND	0.0275	75	2.06	
0005001	SHANK		UND	0.0275	256	7.04	
0011010	BARRA CÓNICA DE 4'		UND	0.0025	97	0.24	
0011024	BROCA DESCARTABLE 41 MM		UND	0.009	26	0.23	
0101010	ACEITE PERFORACION		GAL	0.2593	7.85	2.04	
1210110	ARTEFACTO ILUMINACION LED		UND	0.2	35	7	
1910001	CABLE DE ILUMINACIÓN		ML	1.03	6	6.18	
2405001	OJOS DE GATO		UND	0.35	1.32	0.46	
2502100	TUBERIA POLIETILENO 2"		ML	1.05	2.8	2.94	
2502101	TUBERIA POLIETILENO 4"		ML	1.05	8.44	8.86	
3000201	CANCAMO TIPO J		UND	1	4	4	
3000202	CANCAMO TIPO 3J		UND	0.3333	6	2	
3001360	MANGUERA DE 1"		ML	0.1	3.2	0.32	
3001370	MANGUERA DE 1/2"		ML	0.1	1.6	0.16	
7221250	TUBO DE PVC 1.1/8"X3M PRECORTE		UND	6	1	6	
8001009	MANGA VENTILACION DE Ø 30"		ML	1.1	6	6.6	94.51
4701010	CAPATAZ		0.5 H-H	0.8512	9.56	8.14	
4702060	OPERARIO CARGADOR		1 H-H	1.7025	5.91	10.06	
4702062	OPERARIO SERVICIOS		1 H-H	1.7025	5.91	10.06	
4702099	BODEGUERO		0.5 H-H	0.8512	5.5	4.68	
4702110	MECANICO		0.5 H-H	0.8512	8.74	7.44	
4702111	ELECTRICISTA		0.5 H-H	0.8512	8.74	7.44	
4702310	OPERARIO DE EQUIPO PESADO		0.25 H-H	0.4256	8.34	3.55	
4703012	OFICIAL SERVICIOS		0.5 H-H	0.8512	5.5	4.68	
4703104	AYUDANTE SERVICIOS		1 H-H	1.7025	5.5	9.36	
4704104	AYUDANTE JUMBO		1 H-H	1.7025	5.91	10.06	
4710013	OPERADOR SCOOP		1 H-H	1.7025	8.34	14.2	
4710015	OPERADOR EQUIPO DESATADO		0.5 HH	0.8512	8.74	7.44	
4710020	OPERADOR JUMBO		0.5 H-H	0.8512	8.74	7.44	104.55
4900120	EQUIPO DESATADO ROCAS		0.3 HM	0.5107	80	40.86	
4910501	CARGADOR DE ANFO		0.3 H-M	0.5107	60	30.64	
4955040	MANIPULADOR TELESCOPICO (SIN OPERADOR)		0.15 H-M	0.2554	20	5.11	
4960205	BOMBA GRINDEX MAJOR H		1 H-M	1.7025	2.5	4.26	
4990009	SCOOPTRAM 6.0 YD3 (SIN OPERADOR)		0.6 H-M	1.0215	98	100.11	
4990018	JUMBO HIDRAULICO 1 BRAZO (SIN OPERADOR)		0.4 H-M	0.681	98	66.74	
4990050	AFILADORA DE BROCAS		0.2 H-M	0.3405	4	1.36	
4990069	VENTILADOR DE 75 HP		1 H-M	1.7025	6	10.22	
8120040	PERFORACION POR PIE		PIE	4	0.15	0.6	
3701980	IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD		(%) MO	8	104.55	8.36	
3701990	HERRAMIENTAS		(%) MO	5	104.55	5.23	273.49
5000510 A	EXCAVACION DE CUNETA 0.40X0.40		ML	1	12.95	12.95	12.95
					TOTAL \$/ml	485.5	

Con los datos mencionados se ha calculado los costos generados resultado de la diferencia de la corrida con piloto y sin piloto. Los resultados se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla N°24: Evaluación Económica costos

MES	NRO DISP / MES	METROS AVANCE / DISP.		COSTOS USD\$		
		PILOTO	SIN PILOTO	PILOTO	SIN PILOTO	BENEFICIO
Oct-20	240	3.21	3.12	\$ 373,644.00	\$ 363,168.00	\$ 10,476.00
Nov-20	280	3.12	3.12	\$ 423,696.00	\$ 423,696.00	\$ -
Dic-20	275	3.15	3.12	\$ 420,131.25	\$ 416,130.00	\$ 4,001.25
Ene-21	345	3.31	3.12	\$ 553,845.75	\$ 522,054.00	\$ 31,791.75
Feb-21	336	3.39	3.12	\$ 551,782.56	\$ 508,435.20	\$ 43,347.36
Mar-21	356	3.36	3.12	\$ 580,137.60	\$ 538,699.20	\$ 41,438.40
Abr-21	363	3.34	3.12	\$ 588,727.92	\$ 549,291.60	\$ 39,436.32
May-21	375	3.42	3.12	\$ 621,830.63	\$ 567,450.00	\$ 54,380.63
Jun-21	384	3.46	3.12	\$ 643,645.44	\$ 581,068.80	\$ 62,576.64
Jul-21	390	3.40	3.12	\$ 643,110.00	\$ 590,148.00	\$ 52,962.00
Ago-21	390	3.40	3.12	\$ 643,110.00	\$ 590,148.00	\$ 52,962.00
Set-21	390	3.40	3.12	\$ 643,110.00	\$ 590,148.00	\$ 52,962.00
Oct-21	390	3.40	3.12	\$ 643,110.00	\$ 590,148.00	\$ 52,962.00
Nov-21	390	3.40	3.12	\$ 643,110.00	\$ 590,148.00	\$ 52,962.00
Dic-21	390	3.40	3.12	\$ 643,110.00	\$ 590,148.00	\$ 52,962.00
COSTO \$/M	485			\$ 6,686,771.15	\$ 6,240,436.80	\$ 605,220.35

El resultado de costos que le genera el proyecto al realizar el comparativo con piloto vs sin piloto es un acumulado de \$ 605,220.35 dólares.

Flujo de Caja

Se realizó una evaluación económica de costo-beneficio del proyecto sin piloto y con piloto con un wacc del 6% y una proyección a diciembre del 2021, cuyo resultado fue que al corte del mes de julio el proyecto tiene un valor actual neto (VAN) de \$ 71,571.21. Este resultado muestra la rentabilidad adicional o el valor agregado que le da ejecutar el proyecto aplicando un capex inicial de \$24000 por salarios y materiales de oficina y un capex de \$3000 dólares en enero como inversión en la ejecución del diseño de experimentos (DOE). Se adjunta el flujo de caja en la siguiente tabla:

Tabla N°25: Evaluación Económica valor actual neto del proyecto

FLUJO DE CAJA		Oct-20	Nov-20	Dic-20	Ene-21	Feb-21	Mar-21	Abr-21	May-21	Jun-21
INGRESO	USD \$ / mes	\$ 12,412.38	\$ -	\$ 4,740.84	\$ 37,668.12	\$ 51,359.67	\$ 49,097.86	\$ 46,725.71	\$ 64,432.32	\$ 74,143.28
COSTOS (-)	USD \$ / mes	\$ 10,476.00	\$ -	\$ 4,001.25	\$ 31,791.75	\$ 43,347.36	\$ 41,438.40	\$ 39,436.32	\$ 54,380.63	\$ 62,576.64
CAPEX (-)	USD \$ / mes	\$ 24,000.00			\$ 3,000.00					
MARGEN	USD \$ / mes	\$ -22,063.62	\$ -	\$ 739.59	\$ 2,876.37	\$ 8,012.31	\$ 7,659.46	\$ 7,289.39	\$ 10,051.69	\$ 11,566.64
VALOR ACTUAL NETO AL CORTE DE JULIO		\$ 12,160.50								

Jul-21	Ago-21	Set-21	Oct-21	Nov-21	Dic-21
\$ 62,751.47	\$ 62,751.47	\$ 62,751.47	\$ 62,751.47	\$ 62,751.47	\$ 62,751.47
\$ 52,962.00	\$ 52,962.00	\$ 52,962.00	\$ 52,962.00	\$ 52,962.00	\$ 52,962.00
\$ 9,789.47	\$ 9,789.47	\$ 9,789.47	\$ 9,789.47	\$ 9,789.47	\$ 9,789.47
\$ 20,544.91 VPN (OCT- JUN)					
\$ 51,026.30 VAN (JUL-DIC)					
\$ 71,571.21 VAN (PROYECTO MEJORA)					

El resultado del proyecto de mejora fue un VAN de \$ 71,571.21 al corte de julio del 2021 a un periodo proyectado de 5 meses con un wacc del 6%.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Con el KPI metros de avance por disparo obtenido desde el mes de mayo del 2021 (3.4), se concluye que se redujo la variabilidad y se mejoró la eficacia en el cumplimiento de avance diario.
- Según el análisis de capacidad de los procesos, al implementar en el período de enero y febrero la prueba piloto del nuevo diseño de malla se logró una reducción del porcentaje fuera de especificación en 51%.

- La aplicación del proyecto de mejora continua permitió obtener una media del proceso desde 3.12 m/disp a 3.44 m/disp., que representa un incremento del 10.25%. Por lo que se logró el objetivo de los metros de avance por disparo programado que solicitaba la empresa empleadora.
- Con una evaluación económica del costo-beneficio del proyecto sin piloto y con piloto y una proyección al mes de julio de 2021 se logró un saldo neto positivo de \$ 71,571.21 al aplicar el proyecto de mejora continua considerando los ingresos, costos y capex incurridos durante el período de octubre 2020 a diciembre de 2021.
- Se obtuvo una tasa interna de retorno (TIR) del 22% para el periodo de octubre, lo cual nos indica que el proyecto es rentable.
- El proyecto fue catalogado crítico para el costo (CTC) ya que se tiene un saldo neto positivo para la empresa y crítico para la entrega (CTD) ya que el cliente está conforme con la calidad de labores entregadas después de implementar el proyecto.

5.2. Recomendaciones

- Se debe continuar con el procedimiento de control para que esta mejora sea sostenible en el tiempo.
- Como próximo proyecto de mejora se debe realizar el análisis del KPI número de disparos por guardia para incrementar los ingresos, mejorar la eficacia en el cumplimiento de avance diario y lograr una gestión mejor consolidada de la operación de perforación y voladura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, L., & Morales, N. (2020). Optimización de planificación de desarrollo y preparación de corto plazo en minería subterránea. *Journal of Mining Engineering and Research*, 2(2), 80-86. Disponible en: <https://j-miner.cl/index.php/jm/article/view/23>.
2. Ortega, M., & Aparicio, V. (2019). Influencia de la optimización de los estándares en la operación minera subterránea. Disponible en: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/PE_dee6c42a093e460ea01043affb0a1aba.
3. Anchiraco Giraldo, A. L., & Rojas Oré, K. R. (2020). Optimización del sistema de acarreo y transporte en labores de preparación de las zonas de profundización mediante la metodología Six Sigma operada por la ECM Zicsa en la Unidad Minera Inmaculada. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655408>.
4. Infantas Barrionuevo, D. E. (2021). Gestión para la optimización del proceso de perforación y voladura para incrementar el avance por disparo en las labores de la unidad minera Carahuacra -Volcan Compañía Minera SAA, a través de la aplicación del método de mejora continua PDCA. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/657035>.
5. Cruz Ccahuana, J. (2019). Optimización del proceso de perforación primaria con el método Lean Six Sigma en la Unidad Minera Antapaccay. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3279887>.
6. Chuquín Orihuela, R., Farro Yamaguchi, A., & Valdivia Díaz, F. (2017). Diagnóstico operativo de la empresa ABC. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10004>.

7. Quiroz Alegría, R. A. (2016). Implementación de metodología Lean en minería subterránea-estudio de caso Esmeralda. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140554>.
8. Ramírez, R. I., Lay, N. D., & Sukier, H. B. (2020). Gerencia Estratégica para la Gestión de Personas del sector minero de Venezuela, Colombia y Chile. Información tecnológica, 31(1), 133-140. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642020000100133&script=sci_arttext.
9. Bastidas Clemente, I. (2020). Mejoramiento del ciclo de minado para incrementar productividad en la Unidad Operativa Untuca-Empresa Cori Puno SAC-2020. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6400>.
10. Chinchay Jácome, J. C. (2020). Diseño de malla de perforación basado en los modelos geomecánicos para optimizar la voladura en minería subterránea-2018. Disponible en: <http://www.repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4073>.
11. Quispe, C., & Eder, J. (2018). Evaluación de riesgos disergonómicos durante trabajos de perforación en Minería Subterránea. Disponible en: <http://190.119.145.154/handle/UNSA/7788>.
12. Huamaní Ríos, C. F. (2008). Validación del diseño y de la fabricación de un bastidor para equipo de perforación de taladros largos en la minería subterránea. Disponible en: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/PE_50116d19d173ac90904f959fb09a9a3d.
13. DE LINAN, C. A. C. (1994). Manual de perforación y voladura de rocas. IGME. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=TrwIMcDiuQUC&oi=fnd&pg=PA2&dq=equipos+de+perforaci%C3%B3n+en+miner%C3%ADa+subterranea&ots=q_ngAvlqwm&

sig=23wpECAjnjGI1bOqwqfweMjxK0#v=onepage&q=equipos%20de%20perforaci%C3%B3n%20en%20miner%C3%ADa%20subterranea&f=false.

14. Mestas, R. W. O. (2007). Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia. Estudio realizado utilizando el software y expuesto en la mina de Ananea, Mina Bateas.-Perú. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56854062/disenomallasperforacion-y-voladura-subterraneawithcoverpagev2.pdf?Expires=1662261869&Signature=FnUK59DWDDeiGyPI1B4wtLijmlT2CnQZTGjGYpfqUkAfrl6BKgZqtQPIP5pjxlGcGaAu4iiNxE1OrAvjzPIbmkO7VecQRciahI4Xsu5WFRFXktgyp78S3FoakIvHjJWwBP2y1wA5b3OqvisgFpTz6kvqeVApWvlEmIbm59KtzOiFUL98fmx152q68pKLNGrD~28arc9NREU08EwbdSwZvC4aMGd~AOtFO4QyWZ0ab4mT2TBqRSIIIHC4fpG6D~tqevi2Fvebz36QLaE6ref5IicUBnckipzKRQGahRswfc9f3HNamX5fI5cBDolGj9I0YA86AF98~5NXmlhg_&KeyPairId=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA.
15. Ramírez Malca, W. S., & Sandoval Rivera, J. R. (2020). Evaluación técnica de perforación y voladura para reducir costos operativos de una mina subterránea en Cajamarca–2020. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24115>.
16. Sánchez Villarreal, Y. V. (2012). Optimización en los procesos de perforación y voladura en el avance de la rampa en la mina Bethzabeth. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/217>.
17. Lilia, C. F. A. (2015). Población y muestra. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/oca/view/20.500.11799/35134/1/secme-21544.pdf>.
18. Moore, D. S. (2005). Estadística aplicada básica. Antoni Bosch editor. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=oqOCiEyEjYcC&oi=fnd&pg=PA1&dq=hi>

[stograma+estad%C3%ADstica&ots=EqQg47RJJl&sig=MV5gTltGAQn8xc6Pn6FhuIKy k2Y#v=onepage&q=R2%20estad%C3%ADstica&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=jvLhBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=R2+estad%C3%ADstica&ots=EqQg47RJJl&sig=MV5gTltGAQn8xc6Pn6FhuIKy k2Y#v=onepage&q=R2%20estad%C3%ADstica&f=false).

19. Pértegas Díaz, S., & Pita Fernández, S. (2001). La distribución normal. *Cad Aten Primaria*, 8, 268-274. Disponible en: https://4ee1b426-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/resistenciautb/apuntes-de-clase/probabilidaddefallaydistribuciongaussiana/distr_normal2.pdf?attachauth=ANoY7coUPOEeQoGpQNanEWpO5hnJTuDpzGcqrCGwcArmmp8LNnX1xWw1OAS9OZZj0KP21bEFR8MAdKUEzkdCTLNizhudRxXhhhPZe4geDOOXSkGagQIe_cn4H3g1K9nwf8c cd69kD_TXGaBYiQauzkMPh_9pKAyq2GDMlc1ywDC918aeyXUm197cRdaTcM4KdUrb13KinswjDzi899gdmUPVBfktduxicDoHtvdvSagth_amR141RLV36byX2bXN2NoHknYnhTTKiWaa-b4Xp5uQDa9RlwsOOldslZ-uvj92Q8mfE4%3D&attredirects=0.
20. Uribe Cecenarro, D. V. (2019). Aplicación de la Metodología Six Sigma para reducir las no conformidades en el proyecto de mejora tecnológica de la Mina Cuajone, licitado por la empresa minera Southern Perú Copper Corporation y ejecutado por la constructora Skex. Disponible en: <http://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/1242>.
21. Urias, H. Q., & Salvador, B. R. P. (2014). *Estadística para ingeniería y ciencias*. Grupo Editorial Patria. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=jvLhBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=R2+estad%C3%ADstica&ots=ZVKJ5DypSR&sig=elfs1GNjxSx4PXyMSREC0xdGRAk#v=onepage&q=R2%20estad%C3%ADstica&f=false>.
22. Domenech, R. J. (2018). La incertidumbre de la “significación” estadística. *Rev méd Chile*, 146(10), 1184-9. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/757e/0551bcc8f8807e6912483fe8b2fd0264b0dd.pdf>.

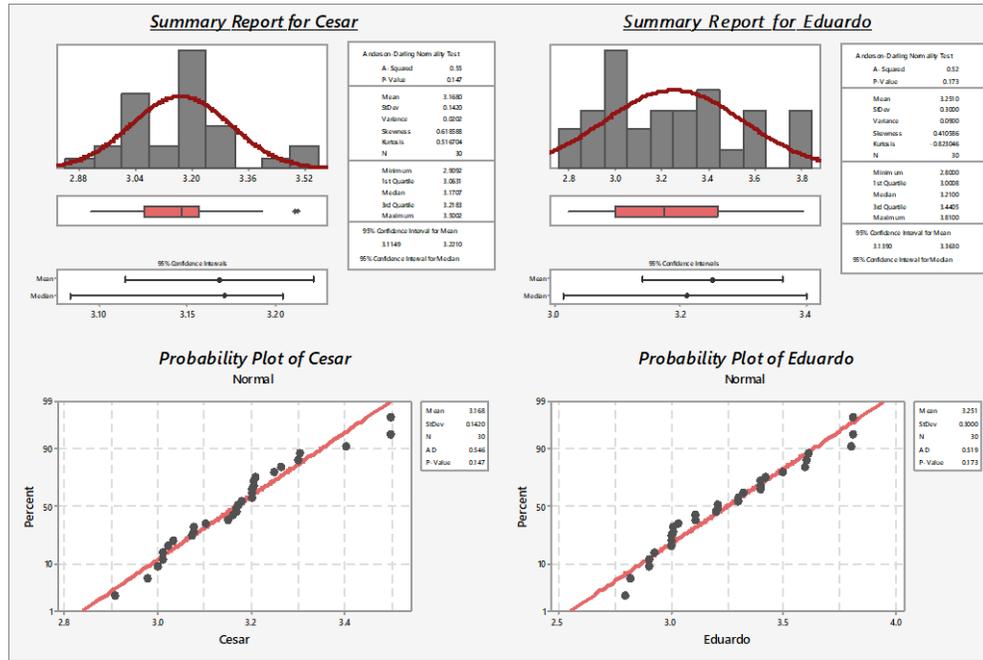
23. Carro, R., & González Gómez, D. A. (2012). Control estadístico de procesos. Disponible en: <http://nulan.mdp.edu.ar/1617/>.
24. Fernández, A. (2001). El Balanced Scorecard. Revista de antiguos alumnos del IESE, 81, 83. Disponible en:
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38599279/EL_BALANCED_SCORECARD_-_AYUDANDO_A_IMPLANTAR_LA ESTRATEGIA-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1662263590&Signature=Olz9HB3VGfTIm~mi64815siXDDzFSMq3qgA4O2NC6Ow014nWWc~Z8gZ7Nkz3y~O8gExHGHV897i9XvJvuIepu~3HB6goQdMXtfacL1Pjb6KTmpD0eV~Z2Eows4wqzyioXW0D4~YVCQONcMbgAcA54kPK4sII6mi3VfpOQ0HpdbCBqaQzAG1~ecCaEULXu6h4fFCRBH5y3RiFnCPKKdCa2F2jo6iBF5FXO6R1PZ0HMDnuFu0L3H9VMwDVvbmFksUYNE~~WoH3Bq67Z8sGR50A58lzw6d7GdpbOhnHZ1d8H2WmL7VyWo8Klw~cC14fPAws~QnhZUp4P6C06tnTLg_&KeyPair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA.
25. Benlloch Osuna, M. T., & Álvarez Villanueva, C. (2014). KPI de creación de valor a largo plazo y marca corporativa para el ‘management’: reflexiones sobre la situación en España y propuesta de indicadores. Disponible en:
<http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/127785>.
26. Tovio, A. C., & Alfaro, A. C. (2016). Análisis del comportamiento de las variables que determinan el circuito económico en Colombia. Aglala, 7(1), 94-121. Disponible en:
<https://revistas.curn.edu.co/index.php/aglala/article/view/975>.
27. Dammert, A. (2021). Economía minera. Fondo Editorial de la PUCP. Disponible en:
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=C1ZDEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT146&>

[dq=costos+economia+minera&ots=Gbm4d6Ak_6&sig=xPV6_pX2pKnreP5--4Zzmg_40u4#v=onepage&q=costos%20economia%20minera&f=false.](https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/econo/article/view/11104)

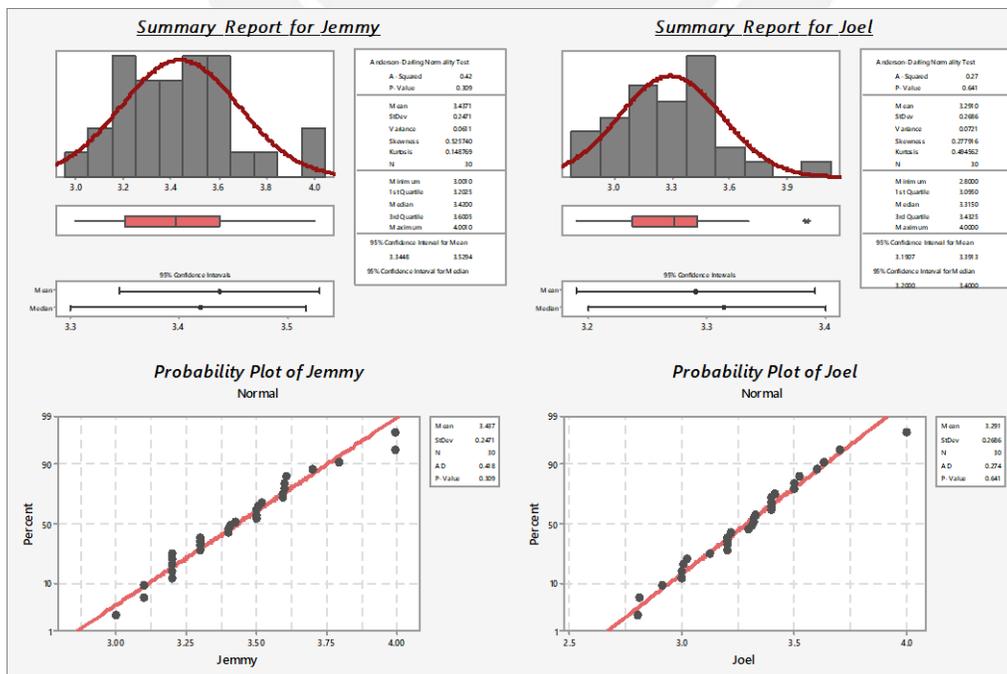
28. Bustamante, R. (2015). Métodos de valorización de empresas mineras: un análisis para el caso peruano 2008-2013. *Pensamiento Crítico*, 19(2), 065-092. Disponible en: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/econo/article/view/11104>.
29. Bacilio Cardozo, K. C. (2018). Propuesta de mejora utilizando la metodología DMAIC en el proceso de perforación en frentes para incrementar los ingresos en el área de minado de una empresa minera. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/14573>.
30. Cruz Ccahuana, J. (2019). Optimización del proceso de perforación primaria con el método Lean Six Sigma en la Unidad Minera Antapaccay [Tesis título profesional, Universidad Nacional del Antiplano]. In *Tesis*. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Antiplano <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12395>
31. Chuquín Orihuela, R., Farro Yamaguchi, A., & Valdivia Diaz, F. (2018). *Diagnóstico Operativo de la empresa ABC* [Tesis magister en administración estratégica de empresas, CENTRUM - Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional de CEMTRUM <http://hdl.handle.net/20.500.12404/10004>

ANEXOS

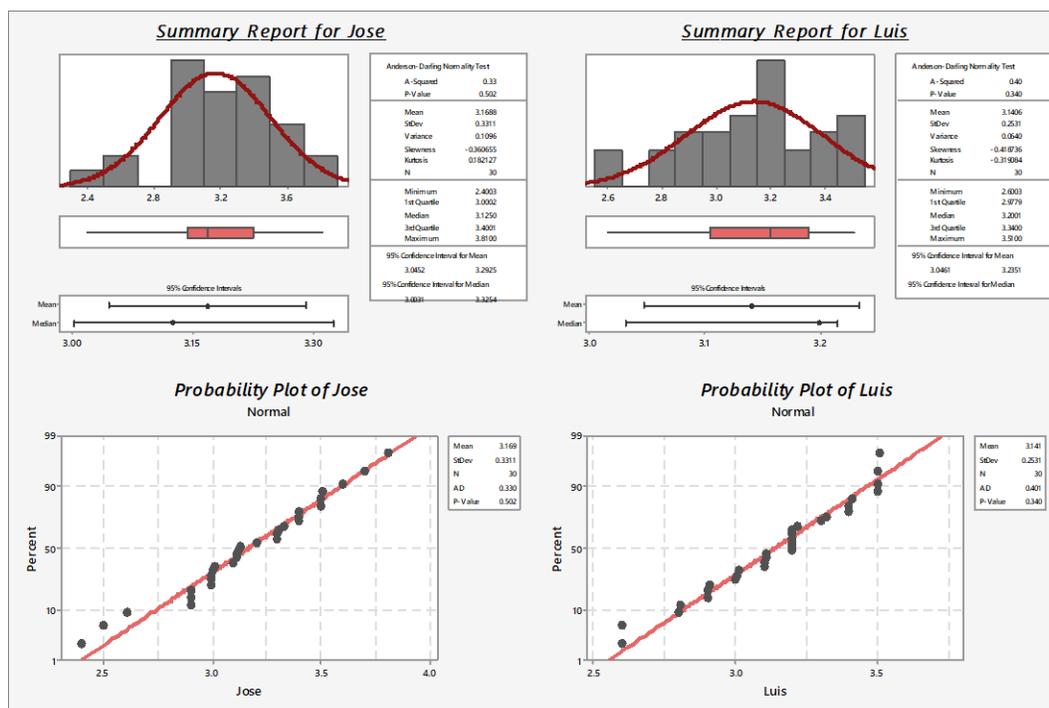
Anexo 1. Sustento del supuesto de normalidad de los operadores Cesar y Eduardo – etapa analizar



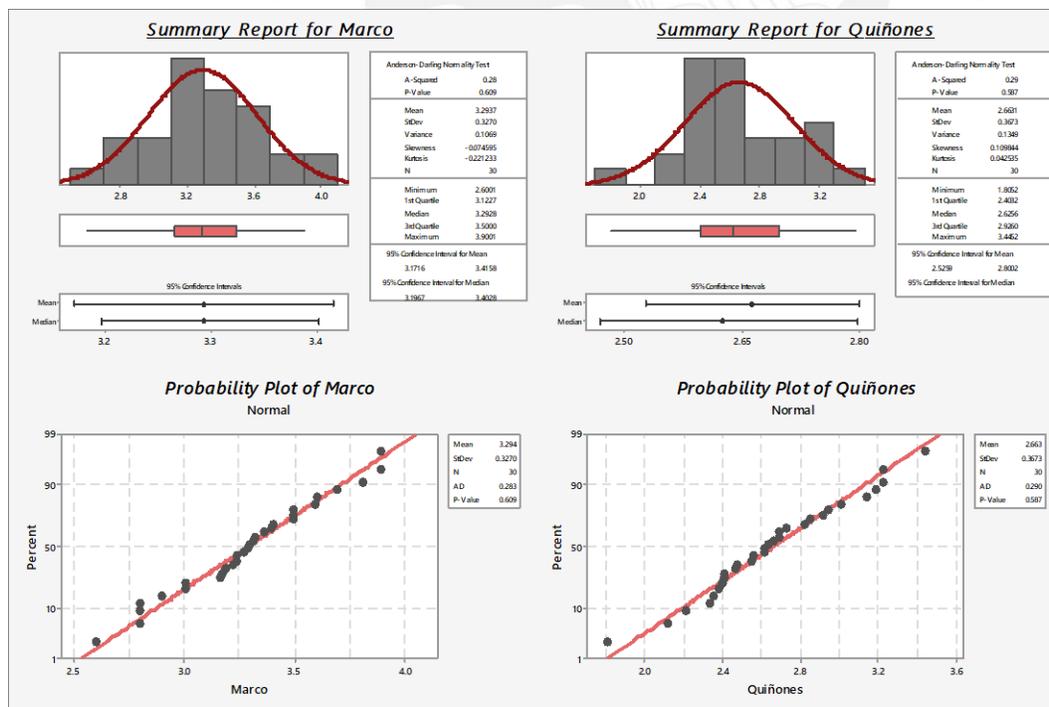
Anexo 2. Sustento del supuesto de normalidad de los operadores Jemmy y Joel – etapa analizar



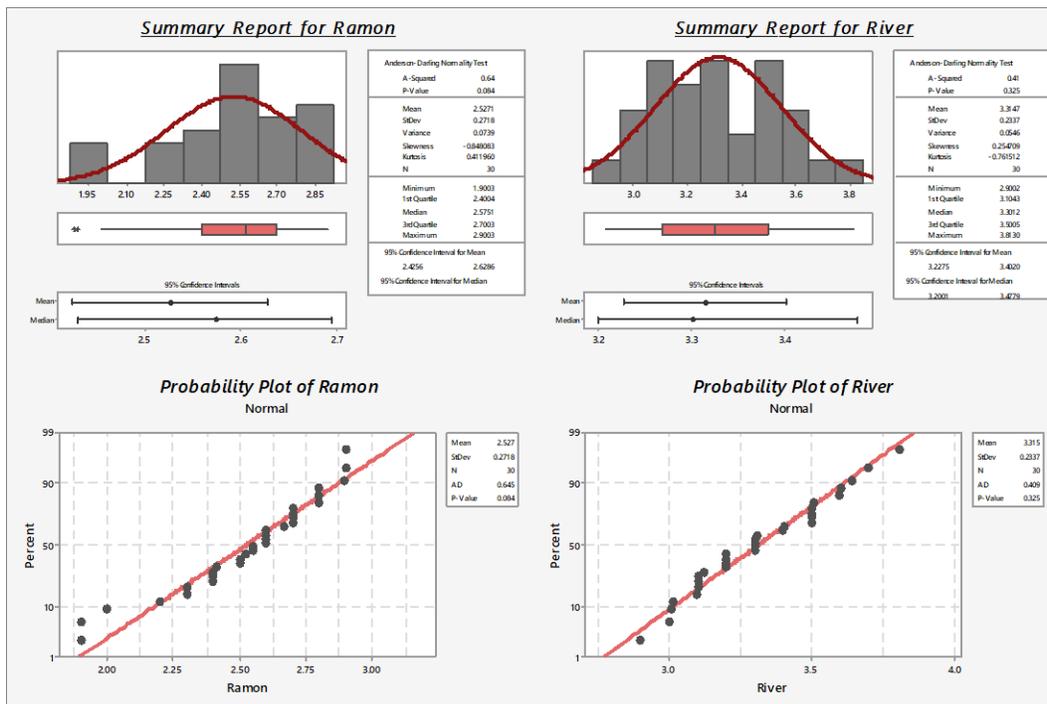
Anexo 3. Sustento del supuesto de normalidad de los operadores Jose y Luis – etapa analizar



Anexo 4. Sustento del supuesto de normalidad de los operadores Marco y Quiñones – etapa analizar



Anexo 5. Sustento del supuesto de normalidad de los operadores Ramon y River – etapa analizar



Anexo 6. Sustento estadístico de variable Burden (lineal)

AVANCE/DISP. versus BURDEN (LINEAL)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	0.4924	0.49241	2.38	0.126
Burden	1	0.4924	0.49241	2.38	0.126
Error	88	18.202	0.20684		
Lack-of-Fit	85	18.0418	0.21226	3.97	0.14
Pure Error	3	0.1602	0.0534		
Total	89	18.6944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.454797	2.63%	1.53%	0.00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3.454	0.276	12.52	0	
Burden	-0.0164	0.0106	-1.54	0.126	1

Regression Equation

$$\text{Avan/disp.} = 3.454 - 0.0164 \text{ Burden}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP.	Fit	Resid	Std	Resid
1	4.001	3.0433	0.9577		2.12 R
2	4.0004	3.0426	0.9578		2.12 R
76	2.5501	2.8506	-0.3004		-0.69 X
89	1.9003	2.8725	-0.9722		-2.21 R
90	1.9003	3.1183	-1.218		-2.71 R

R Large residual

X Unusual X

Anexo 7. Sustento estadístico de variable número de burden (cuadrático)

AVANCE/DISP. versus BURDEN (CUADRATICO)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	13.7048	6.8524	119.48	0
Burden	1	12.7446	12.7446	222.22	0
Burden*Burd	1	13.2124	13.2124	230.38	0
Error	87	4.9895	0.0574		
Lack-of-Fit	84	4.8293	0.0575	1.08	0.569
Pure Error	3	0.1602	0.0534		
Total	89	18.6944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.23948	73.31%	72.70%	70.48%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-11.544	0.999	-11.56	0	
Burden	1.0836	0.0727	14.91	0	168.17
Burden*Burd	-0.01947	0.00128	-15.18	0	168.17

Regression Equation

$Avan/disp. = -11.544 + 1.0836 \text{ Burden} - 0.01947 \text{ Burden} * \text{Burden}$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP	Fit	Resid	Std	Resid
1	4.001	3.3791	0.6219		2.62 R
2	4.0004	3.3836	0.6168		2.6 R
50	3.01	2.4606	0.5494		2.39 R
53	3.0005	2.4326	0.5679		2.47 R
76	2.5501	1.9863	0.5638		2.53 R X
88	2.0013	2.5294	-0.5281		-2.29 R
89	1.9003	2.415	-0.5147		-2.24 R
90	1.9003	2.4711	-0.5708		-2.45 R

Anexo 8. Sustento estadístico de variable número de número de taladros (lineal)**AVANCE/DISP. versus NRO TAL. (LINEAL)****Analysis of Variance**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	1.76	1.75964	9.14	0.003
Nro Taladros	1	1.76	1.75964	9.14	0.003
Error	88	16.935	0.19244		
Lack-of-Fit	5	12.506	2.50127	46.88	0
Pure Error	83	4.428	0.05335		
Total	89	18.694			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.43868	9.41%	8.38%	4.84%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.15	0.625	1.84	0.069	
Nro Taladros	0.0433	0.0143	3.02	0.003	1

Regression Equation

Avan/disp. = 1.150 + 0.0433 Nro Taladros

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP	Fit	Resid	Std	Resid
6	2.30	3.23	-0.9305		-2.16 R
17	2.30	3.19	-0.8867		-2.05 R
49	4.00	3.06	0.9439		2.16 R
50	4.00	3.06	0.9433		2.16 R
89	1.90	2.80	-0.8967		-2.09 R
90	1.90	2.80	-0.8967		-2.09 R

R Large residual

Anexo 9. Sustento estadístico de variable número de número de taladros (cuadrático)**AVANCE/DISP. versus NRO TAL. (CUADRATICA)****Analysis of Variance**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	13.9438	6.9719	127.68	0
Nro Taladros	1	12.457	12.457	228.14	0
Nro Taladros	1	12.1842	12.1842	223.14	0
Error	87	4.7505	0.0546		
Lack-of-Fit	4	0.3222	0.0805	1.51	0.207
Pure Error	83	4.4284	0.0534		
Total	89	18.6944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.233674	74.59%	74.00%	72.52%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-77.63	5.28	-14.69	0	
Nro Taladros	3.778	0.25	15.1	0	1073.25
Nro Taladros	-0.04399	0.00294	-14.94	0	1073.25

Regression Equation

Avan/disp. = -77.63 + 3.778 Nro Taladros - 0.04399 Nro Taladros*Nro Taladros

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP	Fit	Resid	Std	Resid
17	2.30	2.78	-0.4832		-2.11 R
49	4.00	3.4569	0.5441		2.36 R
50	4.00	3.46	0.5435		2.36 R
89	1.9003	2.4281	-0.5278		-2.32 R
90	1.9003	2.4281	-0.5278		-2.32 R

Anexo 10. Sustento estadístico de variable número de diámetro de taladros (lineal)

AVANCE/DISP. versus DIAM. TAL. (LINEAL)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	7.92	7.9204	64.69	0
DIAM. TAL.	1	7.92	7.9204	64.69	0
Error	88	10.774	0.1224		
Total	89	18.694			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.349902	42.37%	41.71%	39.78%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-4.23	0.904	-4.68	0	
DIAM. TAL.	0.1643	0.0204	8.04	0	1

Regression Equation

AVANCE/DISP. = -4.230 + 0.1643 DIAM. TAL.

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP	Fit	Resid	Std Resid
18	4.00	3.27	0.7325	2.11 R
61	2.52	3.24	-0.7163	-2.06 R
62	2.40	3.22	-0.8243	-2.37 R
63	2.41	3.22	-0.8103	-2.33 R
65	2.40	3.18	-0.7834	-2.25 R
78	2.00	2.70	-0.6947	-2.01 R
81	1.90	2.63	-0.7293	-2.12 R
82	1.90	2.63	-0.7275	-2.11 R

**Anexo 11. Sustento estadístico de las variables Burden y número de taladros
AVANCE/DISP. versus BURDEN (CUADRATICO) ; NRO TAL. (CUADRATICA)**

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	15.0731	3.76827	88.45	0
Burden	1	1.1292	1.12921	26.51	0
Nro Taladros	1	1.2384	1.23836	29.07	0
Burden^2	1	1.1274	1.12736	26.46	0
Nro Taladros^2	1	1.2236	1.22357	28.72	0
Error	85	3.6213	0.0426		
Lack-of-Fit	84	3.6016	0.04288	2.18	0.5
Pure Error	1	0.0197	0.01966		
Total	89	18.6944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.206406	80.63%	79.72%	77.54%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-50.03	7.19	-6.96	0	
Burden	0.572	0.111	5.15	0	528.85
Nro Taladros	2.12	0.393	5.39	0	3399.63
Burden^2	-0.0102	0.00199	-5.14	0	544.54
Nro Taladros^2	-0.0247	0.0046	-5.36	0	3355.29

Regression Equation

$Avan/disp. = -50.03 + 0.572 \text{ Burden} + 2.120 \text{ Nro Taladros} - 0.01023 \text{ Burden}^2 - 0.02465 \text{ Nro Taladros}^2$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	ANCE/DI	Fit	Resid	Std	Resid
3	2.55	2.16	0.3902		2.13 R X
4	2.55	2.65	-0.1028		-0.55 X
49	4.00	3.45	0.5483		2.69 R
50	4.00	3.46	0.5453		2.67 R
74	3.00	2.61	0.3934		2.03 R
88	2.0013	2.4347	-0.4334		-2.2 R
89	1.9003	2.3755	-0.4752		-2.42 R
90	1.9003	2.3689	-0.4686		-2.38 R

Anexo 12. Sustento estadístico de las variables Burden y diámetro de taladros

AVANCE/DISP. versus BURDEN (CUADRATICA) ; DIAM. TAL. (LINEAL)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	14.3441	4.78135	94.52	0
Burden	1	5.5323	5.5323	109.37	0
Diam. Tal	1	0.6392	0.63922	12.64	0.001
Burden*Burc	1	5.7867	5.78669	114.4	0
Error	86	4.3503	0.05058		
Total	89	18.6944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.224911	76.73%	75.92%	73.85%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-11.605	0.938	-12.37	0	
Burden	0.8983	0.0859	10.46	0	266.23
Diam. Tal	0.0587	0.0165	3.55	0.001	1.58
Burden*Burc	-0.0162	0.00151	-10.7	0	265.96

Regression Equation

$Avan/disp. = -11.605 + 0.8983 \text{ Burden} + 0.0587 \text{ Diam. Tal} - 0.01620 \text{ Burden} * \text{Burden}$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP	Fit	Resid	Std	Resid
1	4.00	3.41	0.5943		2.67 R
2	4.00	3.44	0.5604		2.52 R
50	3.01	2.55	0.4643		2.16 R
53	3.00	2.52	0.4835		2.25 R
76	2.55	2.12	0.4332		2.11 R X
88	2.0013	2.4593	-0.458		-2.12 R
89	1.9003	2.3389	-0.4386		-2.04 R
90	1.9003	2.4382	-0.5379		-2.46 R

Anexo 13. Sustento estadístico de las variables número de taladros y diámetro de taladros

AVANCE/DISP. versus NRO TAL. (CUADRATICA) ; DIAM. TAL. (LINEAL)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	14.0877	4.6959	87.67	0
Nro Taladros	1	5.4755	5.47551	102.22	0
Diam. Tal	1	0.1439	0.14386	2.69	0.105
Nro Taladros	1	5.3845	5.38448	100.52	0
Error	86	4.6067	0.05357		
Total	89	18.6944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.231443	75.36%	74.50%	72.80%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-71.03	6.6	-10.76	0	
Nro Taladros	3.405	0.337	10.11	0	1982.54
Diam. Tal	0.0304	0.0185	1.64	0.105	1.88
Nro Taladros	-0.03962	0.00395	-10.03	0	1970.09

Regression Equation

Avan/disp. = -71.03 + 3.405 Nro Taladros + 0.0304 Diam. Tal
 - 0.03962 Nro Taladros*Nro Taladros

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP	Fit	Resid	Std	Resid
17	2.3004	2.7609	-0.4605		-2.03 R
49	4.001	3.459	0.542		2.37 R
50	4.0004	3.4743	0.5261		2.3 R
79	2.4006	2.8614	-0.4608		-2.04 R
80	2.4005	2.869	-0.4685		-2.08 R
89	1.9003	2.4048	-0.5045		-2.25 R
90	1.9003	2.4044	-0.5041		-2.24 R

Anexo 14. Sustento estadístico de las variables Burden, número de taladros y diámetro de taladros

AVANCE/DISP. versus BURDEN (CUADRATICA); NRO TAL. (CUADRATICA); DIAM. TAL. (LINEAL)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	15.1763	3.03525	72.47	0
Burden	1	1.0804	1.08042	25.8	0
Nro Taladros	1	0.7199	0.71995	17.19	0
Diam. Tal	1	0.1032	0.1032	2.46	0.12
Burden*Burc	1	1.0868	1.08676	25.95	0
Nro Taladros	1	0.7107	0.71066	16.97	0
Error	84	3.5181	0.04188		
Total	89	18.6944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.204651	81.18%	80.06%	77.83%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-44.44	7.97	-5.58	0	
Burden	0.561	0.11	5.08	0	531.11
Nro Taladros	1.811	0.437	4.15	0	4266.79
Diam. Tal	0.0265	0.0169	1.57	0.12	1.99
Burden*Burc	-0.01006	0.00198	-5.09	0	546.2
Nro Taladros	-0.02104	0.00511	-4.12	0	4208.68

Regression Equation

Avan/disp. = -44.44 + 0.561 Burden + 1.811 Nro Taladros + 0.0265 Diam. Tal
 - 0.01006 Burden*Burden - 0.02104 Nro Taladros*Nro Taladros

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	AVANCE/DISP	Fit	Resid	Std	Resid
3	2.5501	2.2043	0.3458		1.93 X
49	4.001	3.454	0.547		2.71 R
50	4.0004	3.4697	0.5307		2.63 R
74	3.0005	2.6164	0.3841		2 R
88	2.0013	2.412	-0.4107		-2.1 R
89	1.9003	2.3425	-0.4422		-2.28 R
90	1.9003	2.362	-0.4617		-2.36 R

Anexo 15. Imagen de mejora en el pintado de malla – frente



Anexo 16. Imagen de mejora en el pintado de malla – arranque



Anexo 17. Imagen de mejora en técnicas de perforación



Anexo 18. Imagen del resultado óptimo del diseño de experimento (DOE) – 12/01/21 SN 850_S



Anexo 19. Imagen del resultado óptimo del diseño de experimento (DOE) – 17/01/21 CX 934_W



Anexo 20. Imagen del resultado óptimo del diseño de experimento (DOE) – 24/01/21 SN 868_S

