

Holistic Approach in the Prioritization of Critical Repairable Components

Mylena K. Vílchez, MBA. Ingeniería Industrial¹, Jimmy F. Oblitas, Mgs. Ingeniería Agroindustrial², Yvan L. Pelaez, Ingeniería Industrial³, Marina C. Villar, Ingeniería Industrial⁴, Sara R. Rojas, Ingeniería Industrial⁵

¹⁻²Universidad Privada del Norte, Perú, mylena.vilchez@upn.edu.pe, jimmy.oblitas@upn.edu.pe

³ Consultoría en gestión de mantenimiento, Perú, yvanl28@hotmail.com

³⁻⁴ Estudiantes Universidad Privada del Norte, Perú, N00037625@upn.pe, N00032376@upn.pe

Abstract – EX5500 Hydraulic Shovel Excavators are critical equipment in open pit mining projects and significantly contribute to meet production goals. The availability of these equipments depends on many factors, among them, the management of the stock of fixable components necessary to deal with maintenance procedures. The study analyses the convenience to prioritize these components through the cost scatter diagram. This diagram, shown as a tool of prioritization of failure modes according to the global cost, gives information by adding maintenance indicators. This perspective is improved in the study and receives a holistic approach, adding the opportunity cost of production loss in terms of loss of earnings.

Keywords– hydraulic shovel, critical component, cost scatter diagram, prioritization, productivity.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.123>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Enfoque Holístico en la Priorización de Componentes Críticos Reparables

Mylena K. Vilchez, MBA. Ingeniería Industrial¹, Jimmy F. Oblitas, Mgs. Ingeniería Agroindustrial², Yvan L. Pelaez, Ingeniería Industrial³, Marina C. Villar, Ingeniería Industrial⁴, Sara R. Rojas, Ingeniería Industrial⁵

¹⁻²Universidad Privada del Norte, Perú, mylena.vilchez@upn.edu.pe, jimmy.oblitas@upn.edu.pe

³Consultoría en gestión de mantenimiento, Perú, yvanl28@hotmail.com

³⁻⁴Estudiantes Universidad Privada del Norte, Perú, N00037625@upn.pe, N00032376@upn.pe

Resumen – Las palas hidráulicas EX5500 son equipos críticos en los proyectos mineros a tajo abierto, y contribuyen significativamente a alcanzar las metas de producción. La disponibilidad de estos equipos depende de varios factores, dentro de ellos está la gestión del stock de componentes reparables, necesarios para atender las intervenciones de mantenimiento. El estudio analiza la conveniencia de priorizar estos componentes mediante el diagrama de dispersión de costos (DDC). Este diagrama, presentado como una herramienta de priorización de modos de fallo en función del costo global, brinda información incorporando indicadores de mantenimiento. Esta perspectiva se mejora en el estudio, y se le da un enfoque holístico incorporando el costo de oportunidad por pérdidas en producción, en términos de lucro cesante.

Palabras clave – pala hidráulica, componente crítico, priorización, diagrama de dispersión de costos, productividad.

Abstract – EX5500 Hydraulic Shovel Excavators are critical equipment in open pit mining projects and significantly contribute to meet production goals. The availability of these equipments depends on many factors, among them, the management of the stock of fixable components necessary to deal with maintenance procedures. The study analyses the convenience to prioritize these components through the cost scatter diagram. This diagram, shown as a tool of prioritization of failure modes according to the global cost, gives information by adding maintenance indicators. This perspective is improved in the study and receives a holistic approach, adding the opportunity cost of production loss in terms of loss of earnings.

Key Words – hydraulic shovel, critical component, prioritization, cost scatter diagram, productivity.

I. INTRODUCCIÓN

El proceso productivo minero, está soportado por maquinaria de gran envergadura, y su gestión requiere cada vez más de enfoques holísticos que faciliten la toma de decisiones en este sector. Existe una diversidad de modelos y herramientas de gestión, pero los que se expresan en términos de indicadores de desempeño (KPI's), resultan más convenientes por la utilidad que tienen al momento de desarrollar mediciones[1]. Por excelencia, los principales KPI's en mantenimiento son: la disponibilidad, la confiabilidad, la mantenibilidad, la eficiencia global de los equipos (OEE), el costo global, y en procesos es la productividad, entre otros. De estos indicadores, la disponibilidad sigue siendo el indicador por excelencia, que permite al área de mantenimiento enfocar sus esfuerzos en mantener los equipos en operación la mayor parte del tiempo posible, y para el área de operaciones, la disponibilidad de los equipos contribuye significativamente en alcanzar las metas de producción [2], [3] y [4], pero, mantener control sobre el total de variables que determinan la disponibilidad de los equipos en minería a gran escala es complejo, por tanto la

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.123>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

rtkqk cekp"gu"hwpf co gpwn"7_0Gp"gr'eco r q"fg"rc"i guk»p" fg" activos, se ha desarrollado una serie de técnicas de priorización, que buscan fundamentalmente clasificar y disminuir inventarios por los elevados costos de tenencia que significan [6], [4], [7] y [8], hoy incluso se cuenta con sistemas de clasificación integrados a sistemas computarizados de gestión de mantenimiento [9], y en otros casos se está usando tecnología 3D en actos de priorización [10]. En esta línea, Pascual et al. [1] analizaron una serie de herramientas de priorización en el contexto de la ingeniería en general, así como en la gestión de activos físicos, generando una novedosa técnica llamada diagrama de dispersión de costos (DDC). Este diagrama es de fácil diseño y ha demostrado aportar mayor información que el diagrama de Pareto en estudios de priorización de modos de fallos [6], [11], [12] y [13]. El diagrama prioriza en base a la indisponibilidad (que afecta directamente la disponibilidad), y al costo global específico. Como se puede apreciar, ambos son KPI's críticos para el área de mantenimiento, que debe trabajar asegurando alta disponibilidad bajo restricción de presupuesto[14]. Debido las características de este diagrama, en el estudio, se busca profundizar en el análisis de su utilidad, usándolo en un acto de priorización que permita optimizar el listado de componentes reparables que se comportan como críticos, para la operación de una flota de 6 palas hidráulicas modelo EX5500, en lugar de usar la lista de componentes críticos facilitada por el fabricante. Este tema es altamente sensible, debido a que estas palas son a su vez equipo crítico para los trabajos de remoción de tierra [15], como es el caso de las actividades de carguío y acarreo en los emplazamientos mineros a tajo abierto, y es preciso contar con un adecuado nivel de stock de componentes críticos reparables para atender oportunamente los reemplazos en las actividades de mantenimiento. Adicionalmente, se da al diagrama un enfoque más holístico, incorporando en los costos, al lucro cesante por pérdidas en producción por parada de máquina, desarrollando de este modo, interpretaciones de interés tanto para el gestor de operaciones como para el gestor de mantenimiento.

II. DESARROLLO DE LAS METODOLOGÍAS

Para una mejor comprensión de la metodología seguida en el estudio, se separó en tres acápite. En A se explica los cálculos que permiten diseñar el DDC y las interpretaciones que se podrían hacer a partir de éste. En B se expone la obtención del costo global específico, que es uno de los insumos para generar el DDC, dándole un enfoque holístico al incorporar al lucro cesante por parada de máquina. Finalmente, en C se presenta la metodología usada para determinar la productividad, a partir de la cual se puede estimar el lucro cesante.

A. Diagrama DDC

Es un diagrama de dispersión logarítmico que a diferencia de un diagrama de Pareto, permite hacer análisis de tendencias. Diseñado a partir del diagrama de Jack Knife (JKD) [11] y [16], solo que en este caso la priorización se da en función del costo global o general (C_g) en una unidad de tiempo (1), para ello en el eje "X" se ubica al costo global específico (C_{gj}) y en el eje "Y" a la indisponibilidad (D_j) [1], [11] y [12]:

$$\text{Log}(C_g) = \text{Log}(C_{gj}) + \text{Log}(D_j) \quad (1)$$

Donde:

- C_g : costo global o general \$/año.
- C_{gj} : costo global específico del código j \$/h.
- D_j : indisponibilidad del código j (%).

D_j está dado por (2), que es una forma mejorada de producir el diagrama de la indisponibilidad ($D_j = n_j * MTTR_j$), permitiendo dibujar líneas de iso-indisponibilidad más fáciles de interpretar:

$$\text{Log}(D_j) = \text{Log}(n_j) + \text{Log}(MTTR_j). \quad (2)$$

Donde:

- n_j : frecuencia de intervenciones en un marco de tiempo determinado.
- MTTR : tiempo medio para reparar (h).

La línea paralela al eje "X" representa a la indisponibilidad, la paralela al eje "Y" al costo específico y la diagonal al costo global o general, formando cuatro cuadrantes que clasifican los fallos en: agudos (cuadrante superior izquierdo) son los que contribuyen más a la indisponibilidad, los crónicos (cuadrante inferior derecho) que representan a los fallos que impactan más al negocio, los agudos y crónicos (cuadrante superior derecho), suman a ambos problemas, y una zona inerte (cuadrante inferior izquierdo) para los no significativos [1], [16] y [12]. Si los costos de oportunidad de la producción perdida superan a los de mantenimiento, el foco de interés será disminuir la indisponibilidad, pero, si la disponibilidad no es crítica, o el retorno del proceso es bajo, el foco de atención será el costo específico, Fig. 1:

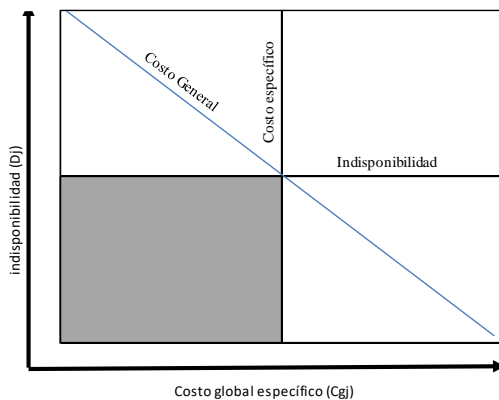


Fig. 1 Esquema del diagrama de dispersión de costos (DDC).

Los fallos críticos serán los ubicados sobre la diagonal del C_g . Si el interés es reducir costos la priorización seguirá el siguiente orden: agudos y crónicos, crónicos, agudos, y los demás. Si el interés es mayor disponibilidad, el orden de priorización será: agudos y crónicos, agudos, crónicos, y los demás [12] y [13].

B. Costo global específico

En la literatura, existen varias alternativas para determinar el costo específico (3), en el estudio se lo considera como la suma de [16] y [1]:

$$C_{gj} = \sum_{j=1}^n C_{ij} + C_{aj} + C_{sij} + C_{fj} \quad (3)$$

Donde:

- C_{ij} : costo de la intervención (\$/hora de intervención).
- C_{aj} : costo de inventarios (\$/hora de tenencia debido a repuestos y amortizaciones).
- C_{sij} : inversiones en fiabilidad (\$/hora relativo a inversiones en fiabilidad).
- C_{fj} : costos por fallos (\$/hora de parada).

Teóricamente C_{fj} debiera incluir a todos los costos asociados a la parada de los equipos, sin embargo, en la práctica se suele considerar únicamente a los costos asociados al área de mantenimiento, dejando de lado otros costos que son de interés para el área de operaciones, quienes ven afectadas sus metas de producción por parada de máquina. Una forma de expresar la magnitud de las pérdidas en producción, es en términos de lucro cesante (C_{lcj}), por tanto, para generar un enfoque holístico [17], se incorpora este costo al C_{gj} (4). Es importante aclarar, que el lucro cesante está presente en toda detención, sea planificada o no, por tanto, siempre es parte del C_{ij} y del C_{fj} , y ocasionalmente de los otros, pero en el estudio, se sugiere manejarlo de manera separada para un mejor entendimiento de los gestores de cada área:

$$C_{gj} = \sum_{j=1}^n (C_{ij} + C_{aj} + C_{sij} + C_{fj}) + C_{lcj} \quad (4)$$

Donde:

- C_{lcj} : lucro cesante (\$/hora de parada de máquina).

Es importante aclarar que en el estudio C_{aj} (5) resulta del capital detenido en repuestos (C_{Rj}), en relación al tiempo fuera de servicio (TTR_j) por intervención [16]:

$$C_{aj} = \frac{C_{Rj}}{TTR_j} \text{ USD/h} \quad (5)$$

Finalmente, de todo este análisis C_{gj} (6), sería igual a:

$$C_{gj} = \sum_{j=1}^n (C_{mj} + C_{lcj}) \text{ USD/h.} \quad (6)$$

Donde:

- C_{mj} : costos de mantenimiento ($C_{ij} + C_{aj} + C_{sij} + C_{fj}$).

C. Productividad y Lucro Cesante

En minería existen varias metodologías para estimar la productividad-hora (conocida también como producción), pero constantemente se cuestiona la capacidad que tienen para capturar las condiciones de trabajo, y las características

de la diversidad geológica donde se encuentran los depósitos de minerales a tajo abierto. Su cálculo requiere de pasos y bases de datos de coeficientes de eficiencia que no están unificados, sin embargo, los principios subyacentes que se usan son los mismos. En todo caso las metodologías más aceptadas son las que se encuentran en los manuales de uso de los equipos. Para la investigación, se toma como referencia las estimaciones de la producción de las palas hidráulicas, obtenidas a partir de estudios e instructivos desarrollados por los fabricantes [18], [19], [20]. Respecto a la producción (7), en el contexto del trabajo de las palas, se entiende como la cantidad de material que cada máquina es capaz de remover en una unidad de tiempo [15]:

$$Q = (q) * \frac{3600}{C_m} * (E) \quad (7)$$

Donde:

- Q : Producción por hora (m³/h ó eyd³/h).
- q : Producción por ciclo (m³; yd³).
- K : Factor de llenado de cucharón.
- C_m : Tiempo del ciclo (en segundos).
- E : Eficiencia de trabajo.

La eficiencia (Tabla I) sincera la proyección de “Q” en función de varios factores como las condiciones topográficas, habilidad del operador, asignación del equipo, etcétera:

TABLA I
EFICIENCIA DE TRABAJO

Condiciones de Operación	Eficiencia
Buena	0.83
Promedio	0.75
Bastante pobre	0.67
Pobre	0.58

La producción por ciclo es calculada por (8):

$$q = (q^1) * (K) \quad (8)$$

Donde:

- q : Producción por ciclo (m³; yd³).
- q¹ : Capacidad de cucharón (m³; yd³).
- K : Factor de llenado de cucharón.

El factor de llenado corrige el valor proyectado de “q”, dependiendo de las condiciones generales de excavación (Tabla II)

TABLA II
FACTOR DE LLENADO DE CUCHARÓN

Condiciones de Excavación		Factor
Buena	Suelo arcilloso, arcilla o suelo blando	1.0 ~ 1.1
Promedio	Suelo suelto con grava de pequeño diámetro	0.95 ~ 1.0
Bastante pobre	Roca bien volada	0.90 ~ 0.95
Pobre	Roca mal volada	0.85 ~ 0.90

El ciclo (9) es la métrica básica de desempeño y el más complicado de calcular [19]. Usualmente se entiende como el tiempo que le toma al equipo en realizar una acción repetitiva retornando a su posición inicial [15]:

$$C_m = C * t_c \quad (9)$$

Donde:

- C : Tiempo del ciclo estándar (en segundos).
- t_c : Factor de conversión.

Los fabricantes proponen valores predeterminados para “C” en función del ángulo de oscilación. En la investigación, se desarrolla un estudio de tiempos a partir del análisis de un video de monitoreo de campo de la principal actividad de la pala que es carga y descarga. Se usó el cronometraje acumulativo para determinar el ciclo de cada elemento de la actividad, siendo el ciclo total, la suma de los promedios de tiempos de cada uno de ellos (C= tiempo de excavación + tiempo de giro cargado + tiempo de vertido + tiempo de giro vacío + tiempo de posicionamiento). Para determinar el número de observaciones (10) se usó el método estadístico:

$$n = \left(\frac{40\sqrt{n'\sum x^2 - \sum(x)^2}}{\sum x} \right)^2 \quad (10)$$

Donde:

- n : Número de observaciones.
- n' : Número de observaciones del estudio preliminar (6 observaciones preliminares del ciclo total).
- x : Valor de las observaciones (en segundos).
- 40 : Constante para un nivel de confianza de 94.45%.

El factor de conversión depende de las condiciones de excavación (profundidad de excavación de la pala/la profundidad máxima especificada), y las condiciones de descarga (Tabla III):

TABLA III
FACTOR DE CONVERSIÓN

Condiciones de excavación	Condiciones de descarga			
	Fácil	Normal	Bastante difícil	Difficil
< 40%	0.7	0.9	1.1	1.4
40 ~ 75%	0.8	1	1.3	1.6
> 75%	0.9	1.1	1.5	1.8

Luego, para determinar el lucro cesante por parada de máquina, es necesario convertir el volumen/hora de producción, en masa/hora a fin de determinar la ley de recuperación de material en onzas troy la hora (oz-T/h) y luego multiplicarlo por el precio del oro en dólares americanos por onza troy (USD/oz-T).

Para la conversión se usó (11):

$$\partial = \frac{m}{v} \quad (11)$$

Donde:

- v : Q en m³/h
- m : producción en masa hora (Tn, kg, g/h).
- ∂ : densidad

La densidad para un banco suelto de material correspondiente a 25% roca - 75% tierra, es de 1 570 kg/m³.

III. ESTUDIO DE CASO

El estudio se desarrolló tomando en cuenta la información de 5 años de operación de 6 palas hidráulicas EX5500, programadas para operar 20 horas al día, 365 días

al año, en un emplazamiento minero a tajo abierto, ubicado sobre los 3500 metros de altura sobre el nivel del mar, haciendo un total de 7 300 horas al año/pala (h/a). La gestión de mantenimiento de estos equipos implica contar con un stock de componentes en almacén, a un nivel de servicio determinado por la misma empresa, que asegure la disponibilidad de cada uno de ellos durante las actividades de mantenimiento preventivo, correctivo, o por condición. Del total de componentes, existe una lista particular que agrupa a los denominados componentes críticos reparables, que, según información de fábrica, son 25. La decisión del nivel de stock, por cada uno de estos componentes, tiene como desventaja el elevado costo de capital en inventario, sin embargo, por un tema de seguridad, la empresa usa el total de la lista como mecanismo para mitigar el riesgo de ruptura de stock.

La lista de estos componentes y los datos asociados se presentan en la Tabla IV:

LISTA DE COMPONENTES PARA 6 PALAS EX5500

N°	Componente (j)	D _j (%)	C _{g_j} (\$/h)	C _g (\$/año)
1	Motor de combustión diésel	0.20	131	959 877
2	Radiador	0.08	45	331 627
3	Transmisión de bomba	0.16	94	689 548
4	Transmisión de giro	0.15	94	689 695
5	Transmisión de propulsión	0.10	62	451 288
6	Bombas principales 7y8, 1y2, 3y4	0.07	41	299 927
7	Bombas principales 5y6, 11y12	0.07	40	291 572
8	Bombas auxiliares	0.02	15	112 903
9	Motores de giro	0.03	16	117 782
10	Motores de propulsión	0.01	9	63 765
11	Motor de enfriadores hidráulicos	0.01	7	48 898
12	Junta	0.15	81	593 540
13	Enfriadores hidráulicos	0.02	9	67 602
14	Bloques de válvulas principal	0.07	37	271 191
15	Cilindro de pluma	0.12	75	550 929
16	Cilindro de brazo	0.14	82	598 223
17	Cilindro de nivel	0.10	57	419 578
18	Cilindro de cucharón	0.15	87	633 878
19	Cilindro de apertura	0.10	63	461 048
20	Cilindro de abastecimiento	0.01	3	23 148
21	Tumblers	0.18	97	707 970
22	Eje Tumbler	0.18	98	719 018
23	Ruedas guías	0.15	84	616 197
24	Cilindro de tensor de oruga	0.15	82	601 560
25	Corona de giro	0.60	329	2 398 655

Los valores que se muestran para C_g, incluyen tanto los costos del área de mantenimiento como al lucro cesante por parada de máquina. A continuación, se presenta los cálculos que permitieron determinar el valor de C_{l_{cj}}. En la Tabla V se muestra el promedio de ciclo de carga y descarga, obtenido a partir de 320 observaciones:

TIEMPO PROMEDIO DE CICLO

Elemento de la actividad	Media (seg)	Desviación estándar
Tiempo medio de Excavación	15	0.23
Tiempo medio de giro con carga	5	0.19
Tiempo medio de descarga	3.3	0.24
Tiempo medio de retorno sin carga	8	0.23
Tiempo medio de posicionamiento	5	0.22
Total	36.3	

La profundidad de excavación de la pala está en 5m, y la profundidad máxima especificada es de 6m, dando una condición de excavación de 0.83, que, junto a las condiciones de descarga en la escala bastante difícil, dio un factor de conversión de 1.5, por tanto, considerando (9) C_m es igual a :

$$C_m = 54.45 \text{ seg}$$

La capacidad de cucharón de estas palas es de 35.5 yr³. Las actividades de voladura preparan el terreno dejando la roca bien volada, por lo que se consideró un factor de llenado de cucharón de 0.9, por tanto, a partir de (8) se obtuvo:

$$q = 31.95 \text{ yr}^3$$

Las condiciones de operación de las palas se consideraron en una escala promedio equivalente a un "E" de 0.75, con esta información se calculó "Q" (7):

$$Q = 1584 \text{ yd}^3/\text{h}$$

Equivalente a:

$$Q = 1212 \text{ m}^3/\text{h}$$

Luego a partir de (11):

$$1\ 570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{m}{1\ 212 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$m = 1\ 902\ 821 \text{ kg/h}$$

Al momento del estudio la recuperación del mineral en promedio presentaba una ley de 0.7 gramos por tonelada, y el oro se cotizaba en 1 269 USD/oz-T. Por tanto, el costo por parada de máquina sería de:

$$C_{l_{cj}} = 54\ 350 \text{ USD/h}$$

Con esta información se procedió a diagramar el DDC, que se muestra en la Fig. 3:

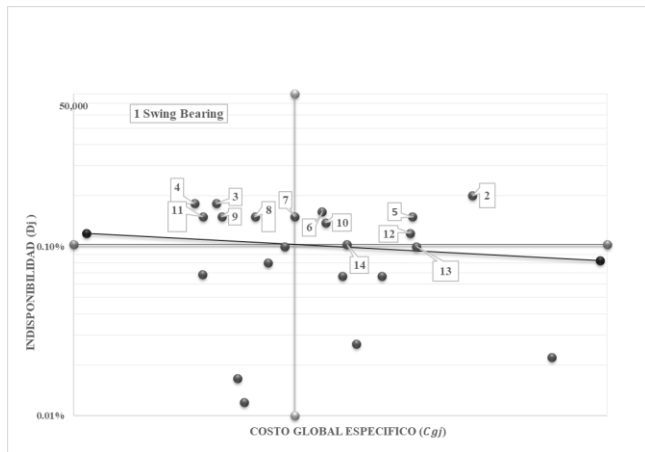


Fig. 1 DDC de priorización de componentes críticos reparables de palas hidráulicas EX5500.

Los números sobre la diagonal representan el orden de priorización de los componentes. El detalle se muestra en la Tabla VI:

TABLA VI
PRIORIZACIÓN DE COMPONENTES

Orden de Prioridad	Nº en la lista original	Componente
1	25	Corona de giro
2	1	Motor de combustión diésel
3	22	Eje Tumbler
4	21	Tumblers
5	4	Transmisión de giro
6	3	Transmisión de bomba
7	18	Cilindro de cucharón
8	23	Ruedas guías
9	24	Cilindro de tensor de oruga
10	16	Cilindro de brazo
11	12	Junta
12	15	Cilindro de pluma
13	19	Cilindro de apertura
14	5	Transmisión de propulsión

Como se puede apreciar, a través del uso del DDC se logró priorizar la lista de componentes críticos proporcionada por el proveedor de las palas, pasando de 25 (tabla IV) a 14 tipos de componentes (tabla VI), consideramos que esto constituye una importante contribución del DDC, al permitir demostrar que no todos los componentes valorados como críticos por el proveedor, se comportan como tal en la práctica, esto principalmente por las diferentes condiciones de operación que existen entre emplazamientos, e incluso dentro del mismo emplazamiento minero, por tanto, lo más razonable debiera ser personalizar las listas de componentes críticos reparables a cada circunstancia, y así impactar de manera positiva en los costos por tenencia de inventario sin afectar las metas de producción [7] y [21].

El siguiente beneficio del DDC, es la interpretación que se pudo obtener a partir de la ubicación de los componentes

en cada cuadrante. Los componentes con orden de priorización 6, 7, 10, 12, 5, y 2, ubicados en el cuadrante agudo/crónicos (superior derecho), ocupan el primer grupo de interés que comparten tanto el área de operaciones como el área de mantenimiento, ya que son los que están ocasionando alta indisponibilidad, y altos costos en mantenimiento y lucro cesante. El segundo grupo de priorización dependerá del gestor que analice los resultados, es decir, para mantenimiento serán los ubicados en el orden 1, 4, 3, 11, 9 y 8, cuadrante de agudos (superior izquierdo), que están generando altos niveles de indisponibilidad, aunque no afectan significativamente las metas de operación, y para el gestor de operaciones serán los componentes 13 y 14, cuadrante de crónicos (inferior derecho), que aunque no generan alta indisponibilidad, afectan significativamente las metas de producción. Este es el aspecto más rescatable que se logró con el diagrama, su versatilidad para proporcionar información a dos áreas que debieran trabajar generando sinergias entre sí, porque operaciones contribuye a mejorar la disponibilidad vigilando la adecuada fragmentación del suelo, propiciando el mantenimiento autónomo, mejorando la pericia del operario, etcétera, y mantenimiento contribuye a alcanzar las metas de producción mediante procesos de reparación más cortos, eficaces, y adecuados niveles de servicio en inventario entre otros [3] y [15]. Este enfoque holístico pasaría a sumar otras ventajas del DDC ya reportadas por Pascual et al. [1].

El manejo del costo implicó cierto nivel de dificultad al momento de decidir qué costos incorporar, por la gran cantidad de información que existe, sin embargo, una opción fue seleccionar los de interés de acuerdo a los objetivos de priorización como se hizo en el estudio, sin generar complejas estructuras de costos que lejos de facilitar el trabajo, se conviertan en algo tedioso generando el rechazo de la metodología. Algo que es importante mencionar, es que en la literatura y en la práctica vemos que con frecuencia en el C_g se suele incorporar únicamente costos provenientes del actuar de la gestión de mantenimiento, aun cuando por definición no debiera ser así, esto puede deberse a que este indicador es gestado en el ámbito de la ingeniería de mantenimiento y confiabilidad. Por ejemplo, el C_{fj} se entiende como el costo por fallo correctivo, y se suele considerar como un monto adicional al que normalmente se usa en una intervención preventiva, sin embargo, implica una parada de máquina, por tanto, el lucro cesante suma a este costo. Del mismo modo el C_{sij} , se suele definir como el costo por confiabilidad, nuevamente el término induce a pensar en los esfuerzos desplegados por el área de mantenimiento, cuando desde operaciones también se pueden ejecutar costos destinados a este fin, por ejemplo, las inversiones en mejorar la pericia del operario repercuten en que el equipo ejecute adecuadamente el trabajo.

Otro aspecto que resultó retador fue la proyección de "Q", debido a la falta de unificación de criterios para determinar los coeficientes que intervienen en la proyección de la producción, en este sentido se sabe que ya se están desarrollando softwares independientes de los fabricantes de los equipos, que están buscando simplificar esta información para los modelos más comerciales [19].

IV. CONCLUSIONES

La gestión del stock de componentes críticos reparables, para atender los servicios de mantenimiento de maquinaria de gran envergadura es un tema de constante preocupación, por el efecto que ejercen sobre la disponibilidad de la maquinaria y el consecuente impacto en el logro de las metas de producción, y por el elevado costo que implican en capital en inventario. Pero referirse al stock no es sólo un tema de cuanto tener, si no qué tener. En este sentido en la investigación se buscó determinar los beneficios de usar el DDC en la priorización de componentes críticos reparables, que sirven para atender una flota de palas hidráulicas EX5500, en un emplazamiento minero. El diagrama permitió priorizar la lista de componentes críticos reparables reduciendo una lista de 25 componentes identificados por el proveedor de los equipos como críticos, a 14 componentes, generando simultáneamente lecturas de interés para el área de mantenimiento y para el área de operaciones. Visto desde este punto, un término más adecuado para el diagrama sería “diagrama de eficiencias”. A pesar de estos avances consideramos que aún hay más por explorar respecto a este diagrama, mejorando la incorporación de costos de interés común. Del mismo modo la proyección de la producción también debe seguir evolucionando a modelos dinámicos y estocásticos, que representen de mejor manera el comportamiento del ciclo tan variante en los procesos de explotación minera.

REFERENCIAS

- [1] R. Pascual, G. Del Castillo, D. Louit, and P. Knights, ‘Business-oriented prioritization: A novel graphical technique’, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 94, no. 8, pp. 1308–1313, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.res.2009.01.013.
- [2] D. R. Godoy, R. Pascual, and P. Knights, ‘Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time’, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 119, pp. 199–206, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.res.2013.05.026.
- [3] R. Glawar, Z. Kemeny, T. Nemeth, K. Matyas, L. Monostori, and W. Sihn, ‘A Holistic Approach for Quality Oriented Maintenance Planning Supported by Data Mining Methods’, *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 259–264, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.045.
- [4] I. Roda, M. Macchi, L. Fumagalli, and P. Viveros, ‘On the classification of spare parts with a multi-criteria perspective’, *IFAC Proc. Vol.*, vol. 45, no. 31, pp. 19–24, 2012, doi: 10.3182/20121122-2-ES-4026.00020.
- [5] O. Bounou, A. El Barkany, and A. El Biyaali, ‘Inventory Models for Spare Parts Management: A Review’, *Int. J. Eng. Res. Afr.*, vol. 28, pp. 182–198, Jan. 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.28.182.
- [6] A. Sheikh-Zadeh and M. D. Rossetti, ‘Classification methods for problem size reduction in spare part provisioning’, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 219, pp. 99–114, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.05.011.
- [7] K. Antosz and R. M. C. Ratnayake, ‘Spare parts’ criticality assessment and prioritization for enhancing manufacturing systems’ availability and reliability’, *J. Manuf. Syst.*, vol. 50, pp. 212–225, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.01.003.
- [8] A. Molenaers, H. Baets, L. Pintelon, and G. Waeyenbergh, ‘Criticality classification of spare parts: A case study’, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 140, no. 2, pp. 570–578, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.08.013.
- [9] C. Teixeira, I. Lopes, and M. Figueiredo, ‘Multi-criteria Classification for Spare Parts Management: A Case Study’, *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 1560–1567, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.295.
- [10] E. Svensson and I. Tunborg, ‘Spare Parts Classification for 3D Printing Suitability’, p. 94.
- [11] P. Knights, ‘Downtime priorities, jack-knife diagrams, and the business cycle’, *MJ Maintenance Journal*, vol. 17, no. 2, 2004.
- [12] T. Seecharan, A. Labib, and A. Jardine, ‘Maintenance strategies: Decision Making Grid vs Jack-Knife Diagram’, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 61–78, Mar. 2018, doi: 10.1108/JQME-06-2016-0023.
- [13] A. K. S. Jardine and A. H. C. Tsang, *Maintenance, replacement, and reliability. Theory and Applications*, Segunda. Estados Unidos: CRP Press, 2013.
- [14] D. R. Godoy, R. Pascual, and P. Knights, ‘A decision-making framework to integrate maintenance contract conditions with critical spares management’, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 131, pp. 102–108, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.res.2014.06.022.
- [15] F. Ng, J. A. Harding, and J. Glass, ‘An eco-approach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator’, *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 3966–3976, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.110.
- [16] R. Pascual, ‘El arte de mantener’, p. 1340.
- [17] J. Oblitas, M. K. Vilchez Torres, and W. M. Castro Silupu, ‘El nivel de servicio de componentes críticos reparables de palas hidráulicas.’, *DYNA Ing. E Ind.*, vol. 94, no. 1, pp. 485–485, 2019, doi: 10.6036/9296.
- [18] Komatsu, *Specifications & Application Handbook*, 30th ed. Japón, 2009.
- [19] J.-P. Pantouvakis, ‘Data Analysis and Design of Construction Productivity Efficiency Multipliers’, in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2018, pp. 119–128.
- [20] Instituto tecnológico Geominero de España, ‘Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto’, p. 581.
- [21] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda, G. Gutiérrez-Jarpa, and O. Durán, ‘Supplier Selection for Spare Parts Supply Chain Networks’, *IFAC-Pap.*, vol. 52, no. 13, pp. 2237–2242, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.538.