

# Determinación de Niveles de Inventario para Componentes Mayores Reparados, incorporando Indicadores de Confiabilidad

**César Arróspide M.** <sup>(1)</sup>

*Barrick - Compañía Minera Zaldivar, Chile*

**Rubén Ruiz Rebolledo** <sup>(2)</sup>

*Barrick - Compañía Minera Zaldivar, Chile, Alumno Memorista Universidad de Antofagasta*

## RESUMEN

En industrias como la minería que se caracterizan por una fuerte utilización de sus equipos y maquinarias, el stock adecuado de los repuestos y componentes críticos es esencial. Inventarios insuficientes afectan el rendimiento general de los activos físicos, y la falta de repuestos puede dar lugar a sanciones, menor disponibilidad o aumento de los riesgos operacionales. Por otra parte, inventarios de gran tamaño conducen a un uso ineficiente de los gastos de capital y pueden implicar graves consecuencias financieras a las compañías.

El presente trabajo entrega una metodología para determinar las cantidades óptimas de inventario de componentes mayores reparados a partir del análisis e indicadores de confiabilidad de los equipos críticos de la compañía, quien tiene a su cargo las áreas de Abastecimiento y Mantenimiento. El trabajo se concentra sólo en componentes críticos del área de equipos móviles mina, de alto costo, que están sujetos a fallas con consecuencias operacionales, donde se requiere la cobertura a fallas impredecibles, regularmente de costos significativos y asociadas a quiebres de inventarios (stock-out).

La determinación de las cantidades óptimas de inventarios se realiza a través de una variación del modelo de revisión periódica (modelo  $R, S$ ) con criterio de nivel de servicio. El modelo propuesto indica que no se realizan pedidos de componentes al pasar el periodo  $R$ , para llegar a su cantidad meta  $S$ , debido a que cada componente retirado del equipo vuelve al inventario después de un tiempo logístico  $T_{at}$ ; de reparación, de devolución por garantía, o de compra en reemplazo de los componentes dados de baja en el proceso, con esto se logra que el inventario no llegue a un stock-out, lo cual se ratifica con la construcción de un modelo de simulación.

Adicionalmente se determinan indicadores de interés para el área de mantenimiento y abastecimiento, como también la optimización de los tiempos logísticos  $T_{at}$  y sus consecuencias en la determinación de la cantidad óptima de componentes en stock, obteniendo una disminución de los activos reparables en bodega hasta en un 50%.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)

(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

## 1. INTRODUCCIÓN

Los inventarios representan aproximadamente un tercio de todos los activos en una empresa típica ([13] Díaz and Fu, 1997). De éstas, las piezas de repuestos y componentes son de particular importancia para las industrias que se caracterizan por tener equipos relativamente costosos y fuertemente utilizados en su proceso productivo. El presente trabajo pretende generar una metodología de inventario que determine las cantidades óptimas de inventario de componente mayores reparados a partir del análisis e indicadores de confiabilidad de los equipos críticos. Esta metodología difiere de las técnicas tradicionales de control de inventario principalmente en el sentido de que se supone que no hay poblaciones infinitas, por tanto, la tasa de demanda de partes depende del número de unidades actualmente en funcionamiento en la operación.

En la mayoría de las industrias, piezas costosas o de difícil acceso necesitan estar stockeadas para proteger la operación de stock-out, y se ha observado que el valor del inventario se concentra en estos repuestos de bajo consumo y con alto precio unitario. Este tipo de repuesto se mantiene como un seguro contra los costos de falla en que se incurriría por su indisponibilidad en el caso eventual de ser requeridos. La regla “lost sales” que es común en problemas de inventario de productos finales, no es aplicable en este caso, porque si no se dispone de partes los tiempos perdidos de los equipos por inactividad son demasiado costosos.

Existen varios problemas al momento de decidir cuántos de estos repuestos disponer. Uno de ellos es la de estimar la tasa de demanda y su distribución asociada: se requieren largos intervalos de tiempo para estimarla. Esto contrasta con los repuestos de alta rotación en donde bastan los registros de intervalos de tiempos cortos. Otra dificultad en la gestión de repuestos de baja rotación es su inflexibilidad. Por ejemplo, el sobre-stockeo de repuestos con rotación rápida se puede remediar rápidamente por el consumo natural, lo que no es el caso con los repuestos de baja rotación. Los excesos en compras al iniciar la operación (o posteriores a la puesta en marcha) solo se pueden remediar lentamente, en particular si el repuesto es único, lo que imposibilita el venderlo a otras empresas. Otra diferencia aparece con la variación de los tiempos logísticos de entrega o de reparación. Los stocks de repuestos de alta rotación pueden ser ajustados rápidamente al cambiar estas demoras. En caso de repuestos de baja rotación, al ajustar los niveles por variaciones transcientes en los tiempos logísticos, se puede llegar fácilmente al sobre-stockeo cuando se llega a condiciones estacionarias en los tiempos logísticos.

Al igual que para repuestos de alta rotación, en algunos casos actúan restricciones de espacio o, con más frecuencia, restricciones de presupuesto. Ello conlleva en general la suboptimización en la toma de decisiones. En caso de organizaciones orientadas al lucro (como la minería, gas – petróleo, etc.), la estrategia para repuestos de baja rotación debe tomar el *costo de falla como parámetro*, que en general su estimación puede tornarse difícil.

Los repuestos de baja rotación pueden clasificarse de acuerdo al grado de planificación de su consumo ([1] Pascual, R. (2008)):

- *Repuestos con uso Planificado*: estos ítems son adquiridos para uso en una fecha específica, por ejemplo, un overhaul mayor de planta. En tanto el proveedor sea advertido con suficiente antelación, no hay razón para disponer de estos repuestos más allá del tiempo que tome inspeccionarlos antes de su uso.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)

(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

- *Repuestos con Advertencia Adecuada*: tienen defectos que pueden ser admitidos por un intervalo de tiempo mayor que el tiempo logístico de provisión. Deben ser adquiridos según necesidad.
- *Repuestos de Respaldo*: este tipo de repuesto no da advertencia antes de fallar, o muy poca frente al lead time. Se estima que es mejor tenerlos por el alto costo de falla en que se puede incurrir en caso de su indisponibilidad. Una subclasificación que se puede realizar, considera si las fallas son aleatorias (tasa de fallas constante) o por vejez (tasa de fallas creciente).

## 2. DEFINICIÓN DE TERMINOS

En la determinación del número de componentes necesarios para proteger la operación productiva de costosos eventos de desabastecimiento, primero es necesario definir bajo qué criterio el nivel de stock es "óptimo". Por supuesto, el criterio no será el mismo para cada aplicación, aunque en la práctica industrial la minimización de costos es típicamente preferida. Esto impone la necesidad de generar estimaciones fiables para los costos asociados con el funcionamiento de los repuestos. Esto último no siempre es una tarea fácil, ya que la escasez de repuestos podría implicar consecuencias complejas que rara vez son cuantificables en términos monetarios. Cuando los costos de escasez son desconocidos, el criterio de optimización es usualmente desplazado hacia una medida de rendimiento del inventario, tales como la probabilidad de tener un repuesto a la mano cuando se genera una demanda. El usuario podría estar también interesado en la maximización de la disponibilidad de los equipos soportado por el inventario ([3] Louit et al, 2005).

Louit ([3] 2005), hace una clasificación de los objetivos de la gestión de repuestos de acuerdo a:

- *Nivel de Servicio Instantáneo*: que corresponde a la probabilidad de que un repuesto esté disponible en cualquier instante. Este es equivalente a la fracción de demandas que pueden ser satisfechas inmediatamente con el stock disponible (Stock On Hand).
- *Nivel de Servicio en un Intervalo (o misión)*: que corresponde a la probabilidad de no quedarse sin stock en ningún momento sobre un intervalo específico de tiempo. Este criterio es más exigente que la disponibilidad instantánea de stock.
- *Costo Global*: es el criterio más utilizado. Incluye:
  - *Costos de Adquisición*, vale decir, el costo de cursar las órdenes de compra.
  - *Costos de Intervención Repuestos*, proporcional al número de ítems, aunque puede ser influenciado por programas de descuento ofrecidos por los proveedores.
  - *Costos de Propiedad*, o de almacenamiento: intereses no devengados, seguros, etc.
  - *Costos de falla*, por no disponibilidad y su efecto en la producción.
- *Disponibilidad del Sistema Soportado*: es la fracción del tiempo en que un sistema o equipo está en servicio producto de la disponibilidad de repuestos.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)

(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

### 3. METODOLOGÍA

A continuación se muestran los principales pasos ejecutados en el desarrollo del presente trabajo:

#### 3.1 Proceso Reparación de Componentes Mayores

En la actualidad se realiza la reparación de los componentes mayores de acuerdo a las necesidades presentadas, generadas por las mantenciones programadas (Plan de Cambio de Componentes) y/o fallas. Una vez retirado el componente, personal técnico de mantenimiento verifica si pertenece al grupo de componentes serializados o no de la compañía. Esto debido a que los componentes serializados mantienen un registro por parte de los proveedores que tienen a su cargo la reparación.

El componente ya retirado, verificada su serialización y puesto en pale, se observa en los registros del Plan de Cambio de Componentes si la falla del componente fue prematura, de ser así, se envía por garantía al proveedor. Una vez recibo por él proveedor, se realiza la evaluación técnica (e informe de falla) y la cotización de reparación, en la cual se informa si entra en garantía la reparación del componente. En caso negativo, es evaluado por la administración si el componente se repara o no, de acuerdo a criterios económicos establecidos por la compañía, de no ser aprobada la reparación, el componente se da de baja y se inicia el proceso de compra de un componente nuevo para su reemplazo.

Ya aprobada la reparación se genera la orden de compra para que se proceda con el trabajo. Una vez reparado el componente es enviado a la compañía e ingresado a bodega como repuesto en stock (reparado) para solventar los planes de mantenimiento y las fallas a futuro de un equipo determinado. Un resumen del proceso de gestión de reparación de componentes se muestra en la Figura 1.

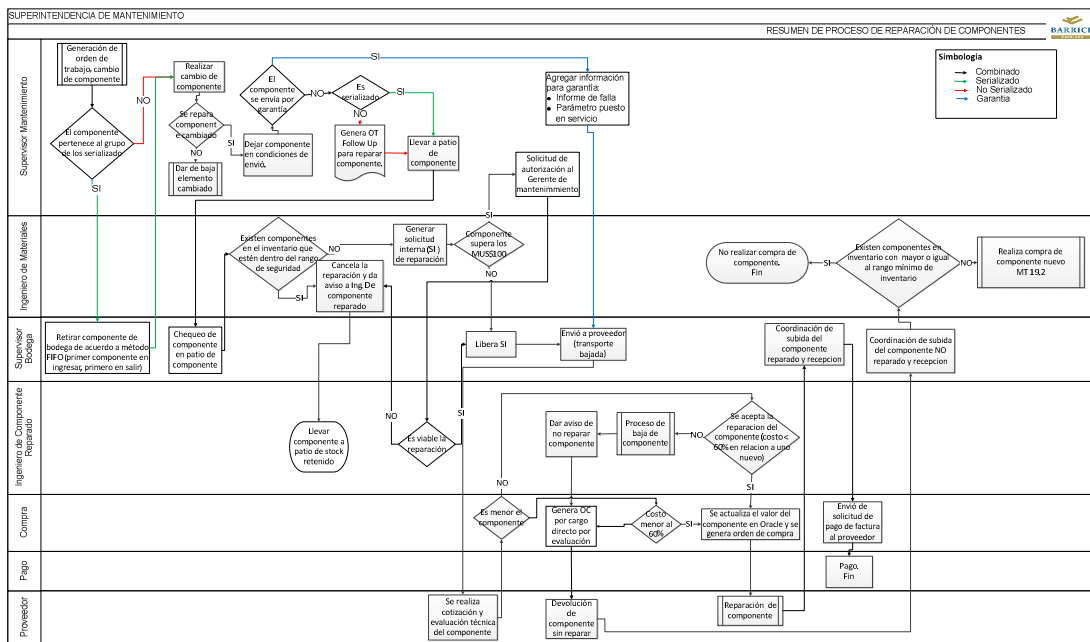


Figura1: Diagrama de flujo de la gestión de componentes reparados.

- (1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)
- (2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

## 3.2 Modelo

### 3.2.1 Modelo de Inventario

De acuerdo al comportamiento observado por los componentes reparados de los equipos mina, se utilizará una variación del modelo de revisión periódica (Modelo  $R, S$ ) con criterio de nivel de servicio, suponiendo una distribución Gaussiana, Poisson o Exponencial (dependiendo del comportamiento histórico de los repuestos) de sus parámetros de tasa de falla y desviación estándar del componente seleccionado ([1] Pascual, R. (2008), [11] Meruane, V., [4] Espinoza, F). El modelo propuesto indica que no se realizará un pedido de componentes cada cierto periodo de tiempo  $R$ , con el fin de mantener la cantidad meta  $S$ , debido a que en la práctica actual ingresan componentes al inventario con una cierto tiempo de reparación o plazo de entrega  $T_{at}$  (tiempo logístico, Turnaround Time), distinto en cada componente de acuerdo a cuando fue retirado del equipo y su envío a reparación. Por lo que el inventario se reabastece de componentes una vez pasado el tiempo logístico  $T_{at}$  de cada componente.

Para esto proponemos la siguiente formulación:

$$Q^* = E(T)T_{at} + \beta\sigma\sqrt{T_{at}} \quad (1)$$

Dónde:

- $Q^*$  : Cantidad optima de repuesto a tener en inventario [unidades].
- $E(t)$  : Tiempo medio de demanda (eventos de mantención programada y fallas) de componentes [unidades/por unidad tiempo].
- $T_{at}$  : Tiempo logístico de reparación [unidad tiempo].
- $\beta$  : Factor de seguridad basado en el nivel de servicio del componente.
- $\sigma$  : Desviación estándar de la demanda (eventos de mantención programada y fallas) de acuerdo a la distribución de probabilidad [unidades/por unidad tiempo].

**Observación 1:** Se utiliza  $\sqrt{T_{at}}$  para tener en cuenta que la desviación estándar está dada para una unidad de tiempo y no  $T_{at}$  unidades de tiempo.

El modelo propuesto (1) tiene seguridad de no quedarse sin inventarios de acuerdo al nivel de servicio definido para los componentes, y donde la cantidad óptima debe ser corregida en caso de presentarse variaciones significativas en los tiempos logísticos de reparación  $T_{at}$ . Para lo cual, se aconseja realizar una revisión cada  $T^* = \frac{Q^*}{d}$  unidades de tiempo, donde  $d$  es la demanda promedio durante el período de tiempo para la gestión.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

### 3.2.2 Modelo Repuestos Reparables

Supondremos que las fallas son independientes, y que no se aplica la canibalización de los componentes y repuestos en el área de mantenimiento de la compañía. Consideramos que el sistema requiere  $I$  tipos de repuestos reparables y que pertenece a una flota de equipos. La reparación de estos componentes se realiza en un(os) taller(es) y toma un cierto tiempo logístico de reparación o plazo de entrega (Turnaround Time,  $T_{at}$  (ut)).

En cualquier instante, un repuesto reparable puede estar disponible (Stock On Hand,  $OH_t$ ), siendo demandado por mantenencias programadas o fallas ( $D_t$ ), siendo reparado (Due In,  $DI_t$ ), o siendo comprado ( $C_t$ ), en reposición a los componentes que se dan de baja ( $CB_t$ ) o por el aumento de stock definidos por la administración o por el presente modelo, y por último en proceso de Garantía ( $G_t$ ) de acuerdo a los contratos de compra de componentes con los fabricantes.

De acuerdo a lo anterior el modelo de balance de masas queda como:

$$I_t = OH_t - D_t + DI_t + G_t + C_t - CB_t \quad (2)$$

Notemos que cuando  $OH_t - D_t = BO_t < 0$ , el repuesto reparable se encuentra siendo solicitado pero indisponible (lo que se conoce como; backorder,  $BO_t$ ). Lo cual puede ser satisfecho por los componentes que están en el proceso de garantía (y siendo reparados por este concepto), o por los componentes que están siendo comprados en compensación a los que se dan de baja  $C_t - CB_t > 0$ , o por los componentes que están en el proceso normal de reparación, o por el aumento de stock definidos por la administración para satisfacer estas solicitudes, cualquiera de estas alternativas sea la primera en llegar a stock, como se muestra en la Figura 2.

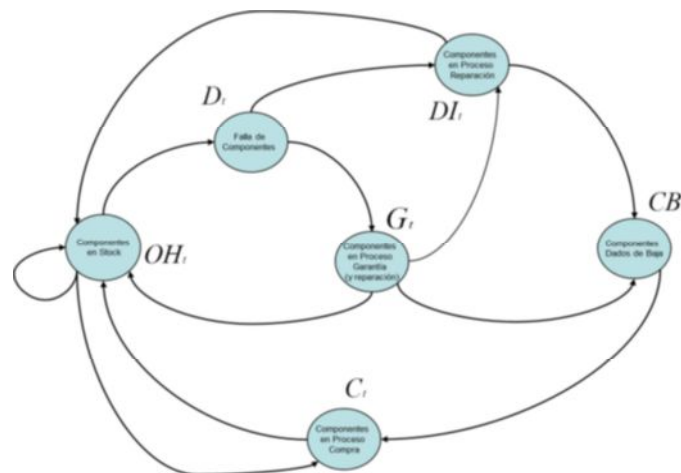


Figura 2: Modelo comportamiento de los componente reparables

- (1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
 (2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

Las variables del modelo (2) son aleatorias, es decir, cualquier cambio en una de ellas, afecta a las demás. En general, se considera  $I_i = I$ , constante para la gestión de un componente reparable de un tipo de flota de equipos en un periodo de tiempo determinado. Por ejemplo, para la flota de camiones con motores Cummins QSK (15 unidades), la administración de la compañía, basado en la experiencia, ha definido que el stock de motores reparables sean 3 unidades.

Si la demanda sigue una distribución de Poisson con parámetro  $\lambda$  (1/ut) y tiempo logístico de reparación  $T_{at}$  (ut), el nivel de servicio  $\alpha$  (o disponibilidad de repuesto), que corresponde a la probabilidad de satisfacer un pedido inmediatamente, dado que hay  $s$  repuestos para atender las fallas, será determinado por la expresión:

$$\alpha(s) = \sum_{j=0}^{s-1} \frac{(\lambda T_{at})^j e^{-\lambda T_{at}}}{j!} \quad (3)$$

Y el número esperado de pedidos pendientes:

$$EBO(s) = \sum_{j=s+1}^{\infty} (j-s) \frac{(\lambda T_{at})^j e^{-\lambda T_{at}}}{j!} \quad (4)$$

Ahora, si  $N$  es el tamaño de la flota y  $z_i$  es la multiplicidad del repuesto en cada equipo, existen  $Nz_i$  componentes  $i$  en toda la flota. La probabilidad de que alguna de las  $Nz_i$  posiciones no tenga un repuesto operativo instalado será:

$$D_i = \frac{EBO_i(I_i)}{Nz_i} \quad (5)$$

lo que corresponde a la indisponibilidad esperada de cada componente de la flota.

La disponibilidad esperada del sistema (cada camión, pala, perforadora, etc.)  $A_s$ , o sea, la fracción de tiempo en que los equipos pueden operar debido a que hay repuestos disponibles es:

$$A_s = \prod_{i=1}^I A_i = \prod_{i=1}^I \left( 1 - \frac{EBO_i(I_i)}{Nz_i} \right)^{z_i} \quad (6)$$

Lo cual puede ser también considerada como la fracción de tiempo que cualquier sistema está disponible por repuestos.

Cuando  $D_i = \frac{EBO_i(I_i)}{Nz_i} < 0,1$ , es decir, tenemos una indisponibilidad de un 10%, entonces,

$A_s \approx e^{-\frac{1}{N} \sum_{i=1}^I EBO_i(I_i)}$ . Como el máximo de una función coincide con el de su logaritmo, nuestro objetivo es minimizar la suma de los  $EBO_i$ .

- (1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

### 3.3 Test de Rachas

El Test Rachas se implementa con la finalidad de determinar si los datos que constituyen la muestra de observación se pueden considerar una muestra aleatoria simple, hipótesis que necesitan casi todos los test en su desarrollo y que en la mayoría de los casos viene dada por cómo se recogen los datos. Dado que al realizar un muestreo, puede llegar a influir el orden temporal o espacial en que las muestras han sido elegidas, con lo cual no estamos en condiciones de un muestreo aleatorio simple, ya que la ley de probabilidades varía de una observación a otra. También es conocido este test como "Test de Independencia de las Observaciones de una Muestra". Inicialmente está desarrollado para variables dicotómicas y se basa en concepto de racha (run). Esta prueba fue realizada por el programa "STATGRAPHICS Centurion" ([10] Ross, S.M.(2008), [6] Curiel, M. (2009)).

### 3.4 Distribución Estadística

Con la finalidad de determinar si los datos de la muestra provienen de una distribución estadística específica, utilizaremos el programa "Easy Fit", de acuerdo a la base datos obtenida de las demandas de componentes reparados de la compañía. Con la ayuda de este sistema se realizará un análisis de distribuciones quedándose con la que mejor se adapte a los datos, siendo esto determinado por la prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado, Kolmogorov - Smirnov, o Anderson - Darling ([6] Curiel, M (2009)).

Se privilegiará la prueba de Anderson-Darling, puesto que es una prueba no paramétrica sobre si los datos de una muestra provienen de una distribución específica. La fórmula para el estadístico determina si los datos (observar que los datos se deben ordenar) vienen de una distribución con función acumulativa  $F$ . Esto es:

$$A_n^2 = -n - S \quad (7)$$

donde, el estadístico de prueba para la prueba Anderson-Darling es:

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)[1 - F(x)]} f(x) dx \quad (8)$$
$$A_n^2 = -\sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))] - n$$

Dónde:

$n$  : Número de datos

$f(x)$  : Función de distribución de probabilidad teórica

$F(x)$  : Función de distribución empírica



### 3.5 Simulación

Para el estudio del comportamiento del proceso de componentes reparados de la compañía, determinados por la Cadena de Markov de la Figura 2, se utilizará una herramienta de simulación con apoyo del software ARENA ([9] Rockwell Automation, [12] Basogain, X and Olabe, M.A.). El modelo construido en esta aplicación está ilustrado en la Figura 3. El objetivo en esta etapa del estudio, es determinar un modelo de simulación que represente el comportamiento real del proceso, en relación a los elementos incluidos en él, el nivel de detalle, las restricciones y los elementos de entrada y salida.

Para la construcción del modelo de simulación consideraremos las siguientes condiciones ([1] Pascual, R. (2008)):

- Los intervalos medios entre fallas siguen una distribución de probabilidades, que es necesario ajustar para el análisis del modelo.
- Los componentes son considerados reparables.
- Los componentes no fallan ni se dan de baja cuando están en bodega.
- El periodo de simulación  $T$  corresponde al menos a un ciclo de vida de los componentes considerados para el estudio, con la finalidad de que el modelo entre en régimen.
- Los tiempos logísticos  $T_{at}$  de reparación normal de componentes son los mismos que los de reparación por garantía.

Considerando estas condiciones, se construye el modelo de simulación que esquematiza el comportamiento de los componentes reparados. Con este modelo procedemos de la siguiente forma:

- Obtenemos el comportamiento del tiempo entre demandas del componente en estudio, ordenando cronológicamente las fallas o eventos programados.
- Ajustamos una distribución de probabilidades a los tiempos entre eventos de demanda.
- Posteriormente, ingresamos a la casilla de Stock del modelo (ver Figura 3), la distribución determinada en el paso anterior.
- Ingresamos al modelo las variables de entrada:
  - Cantidad de componentes en funcionamiento actual en los equipos existentes
  - Cantidad de componentes en inventario (determinados por la ecuación (1))
- Ingresamos la probabilidad de que el componente falle prematuramente (componente enviado al proceso de garantía)
- Ingresamos la probabilidad de que el componente sea aceptado por concepto de garantía.
- Ingresamos la probabilidad de que el componente sea dado de baja en el proceso de garantía o en la reparación normal.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)

(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

La construcción de este modelo de simulación logra obtener el comportamiento de las demandas que se producirán a futuro en los componentes, como también predecir si las reparaciones realizadas son por fallas prematuras (proceso garantía) o por falla normal (proceso reparación). También es posible observar la cantidad de componentes enviados a reparar que son dados de baja impulsando el proceso de compra para su reposición ([5] Kelton, Sadowski & Sturrock). Adicionalmente es posible observar en el modelo de simulación si de la cantidad óptima sugerida de acuerdo a la expresión (1) tiene un buen comportamiento ante las demandas producidas para el componente evitando el Stock-out en el inventario.

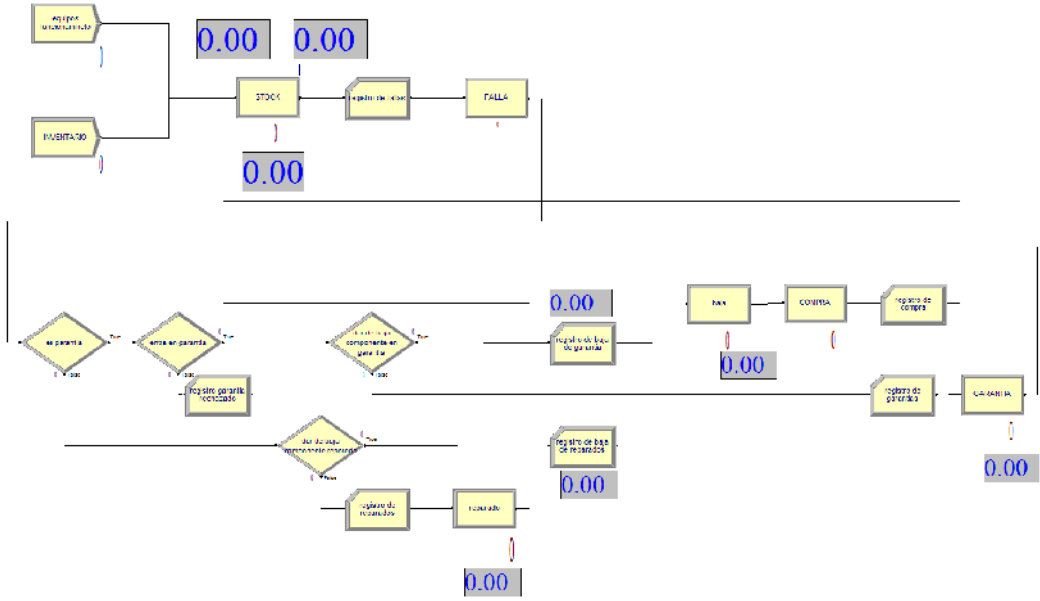


Figura 3: Modelo de simulación en software ARENA

Paralelamente es posible observar variaciones en el comportamiento de los componentes en el modelo de simulación, modificando las variables del modelo. Por ejemplo:

- Modificar la distribución de probabilidades de demanda, de acuerdo al ranking entregado por el sistema Easy Fit. Esta modificación muestra la variación en el comportamiento de la demanda, produciendo stock-out o excedentes en el inventario.
- Variar la cantidad óptima de inventario ( $Q^*$ ), con esto es posible ver el comportamiento de los valores sugeridos actualmente por la compañía basados en la experiencia.
- Modificar el tiempo logístico  $T_{at}$ , esta modificación muestra el impacto que tiene en la cantidad de óptima de inventario.
- Modificar las probabilidades en los eventos de la Cadena de Markov (Figura 2), esto es, para el proceso de reparación, de garantía o de baja componentes. Esta modificación varía las cantidades que pasan por los eventos de la cadena, obteniendo del modelo simulación que la única acción que puede llegar a modificar la cantidad del inventario es la acción de dar de baja componentes, siempre y cuando el tiempo de compra sea menor que el tiempo logístico y la cantidad de componentes dados de baja sean mayores que la de reparados.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)

(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

## 4 RESULTADO Y DISCUSIÓN

A modo de ejemplo, para ilustrar la metodología, consideremos el componente mayor con código Oracle 1092096R correspondiente a un motor QSK60 marca CUMMINS de la flota de camiones Komatsu 830 E y 830 AC, de un total de 15 motores instalados en la flota, y con un stock de componentes para cambio y reparación de 3 unidades, determinados principalmente por la experiencia. El siguiente cuadro muestra el comportamiento de demanda que ha experimentado este componente desde Enero del año 2012 a Diciembre de 2013.

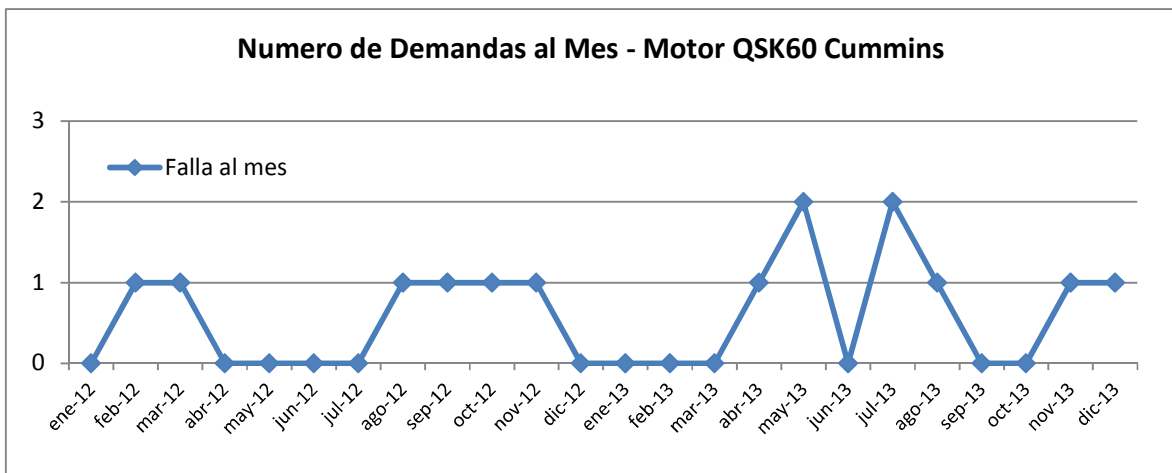


Figura 4: Cantidad de demandas del componente Motor QSK60 Cummins, entre el año 2012 y 2013

Exponential [n=9]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	24				
Estadística	0,5				
Valor P	4,5036E-6				
Rango	27				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	0,21205	0,24242	0,26931	0,30104	0,32286
Rechazar?	Si	Si	Si	Si	Si
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	24				
Estadística	-6,1213				
Rango	4				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
Chi-cuadrado					
Grados de libertad	1				
Estadística	14,445				
Valor P	1,4429E-4				
Rango	33				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	1,6424	2,7055	3,8415	5,4119	6,6349
Rechazar?	Si	Si	Si	Si	Si

Figura 5: Prueba de bondad de ajuste

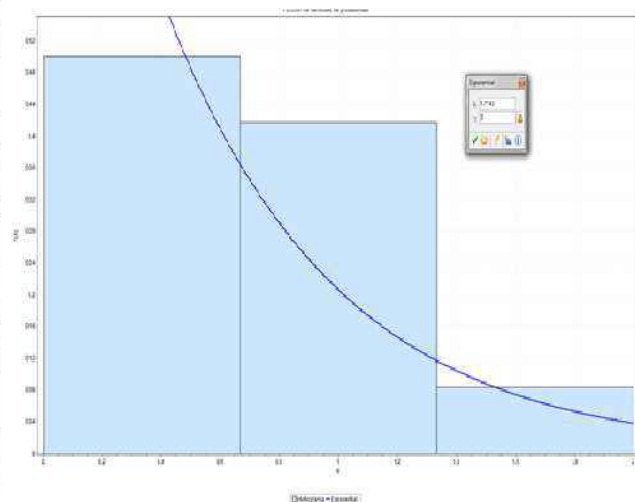


Figura 6: Histograma de la muestra

Posteriormente, a través del software Statgraphics se analizan los datos históricos de la Figura 4, para chequear que correspondan a una muestra aleatoria simple, con la finalidad de descartar que exista una causa particular asociada a las demandas de este componente. De acuerdo al análisis

- (1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)
- (2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

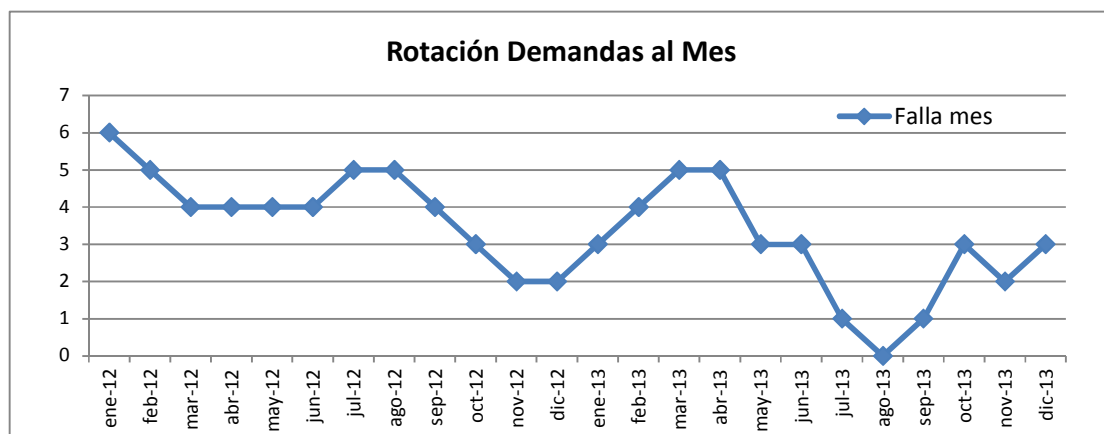
realizado, se comprueba que la muestra tiene un comportamiento aleatoria con un 95% de confianza. A continuación, mediante el software EasyFit se ajusta una distribución de probabilidades, como indica la Figura 6. Aplicando la prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling, la distribución se comporta de manera exponencial, siendo la que se adapta de mejor manera a los datos (ver Figura 5).

Obtenida la distribución de probabilidades y sus parámetros, podemos reemplazar en la ecuación (1) para obtener la cantidad óptima de componentes a tener en stock, resultando ser para este ejemplo de  $Q^* = 6$  unidades, con un nivel de servicio del 97%, estos es:  $\beta = F^{-1}(0,97)$ . Ordenado por ranking las distribuciones de probabilidades que entrega el sistema EasyFit, al ajuste de los datos, la Tabla 1 muestra las posibles cantidades de stock óptimo que podemos tener de acuerdo a su distribución y su nivel de servicio.

**Tabla 1:** Cantidades óptimas de acuerdo a nivel de servicio y distribución de probabilidad

Distribución	Tiempo Logístico (días)	Desviación Estándar (unid/mes)	85%		90%		97%	
			Factor de Seguridad	Q* Optimo (Unid)	Factor de Seguridad	Q* Optimo (Unid)	Factor de Seguridad	Q* Optimo (Unid)
Exponencial	154	0,58333	1,1067	5	1,3432	5	2,0455	6
Gamma	154	0,65386	1,1458	5	1,4202	6	2,2501	7
Weibull	154	0,56942	1,4106	5	1,6081	6	2,1377	6
Normal	154	0,65386	1,261	5	1,4213	6	1,8131	6
Uniforme	154	0,65386	1,3761	5	1,4894	6	1,6479	6

Con esta cantidad óptima de 6 unidades, se observa el comportamiento del inventario con el histórico de demandas existentes del componente en los años 2012 y 2013 (ver figura 7), y su comportamiento a futuro para los años 2014 al 2016 según el Plan de Cambio de Componentes proyectados para el Budget/LOM (ver figura 8).



**Figura 7:** Comportamiento del inventario de acuerdo a la cantidad óptima propuesta

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

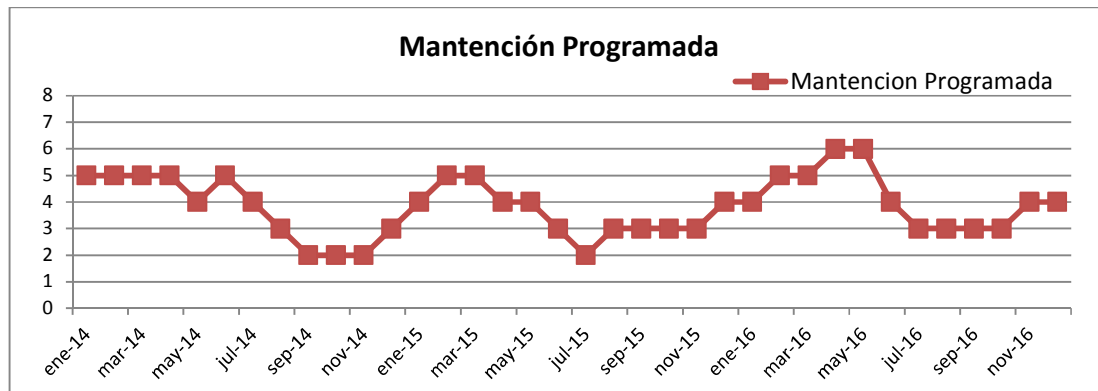


Figura 8: Comportamiento del inventario de acuerdo a la cantidad óptima propuesta a futuro

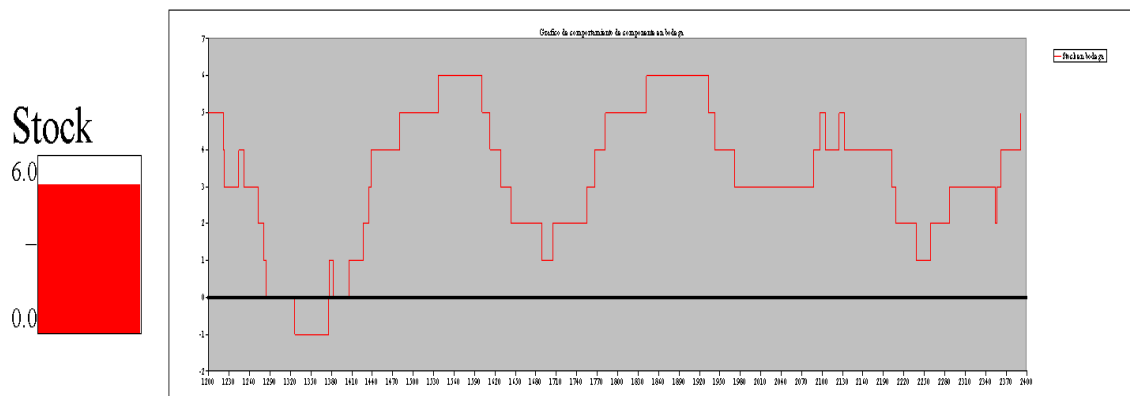
Ahora realizamos el proceso de simulación considerando la proyección de fallas de los componentes más las mantenciones programadas, para obtener un comportamiento más real a futuro. Los resultados obtenidos al variar la distribución de probabilidades son los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Comportamiento distribución de probabilidades de acuerdo a su tiempo medio entre demandas.

Distribución	Parámetros	Stock-Out		Exceso	
		si/no	veces	si/no	cantidad
Gamma	$\alpha=0,99138$ $\beta=48,099$	si	2	no	-
Exponencial	$\lambda=0,02097$	si	1	no	-
Weibull	$\alpha=1,0349$ $\beta=43,042$	no	-	si	1
Normal	$\sigma=47,892$ $\mu=47,685$	si	1	no	-
Triangular	$m=6,9163$ $a=6,9163$ $b=157,74$	no	-	no	-
Uniform	$a=-35,266$ $b=130,64$	si	1	no	-
Erlang	No hay ajuste	-	-	-	-

Seleccionada la distribución de probabilidad exponencial (a modo de ejemplo o prueba), se ingresa al modelo de simulación al igual que la cantidad de componentes en funcionamiento, más la cantidad óptima a tener en stock y los porcentajes de reparación por garantía y de componentes dados de baja. Con estos, es posible observar el comportamiento a futuro del inventario de componentes reparados, ver Figura 9.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059



**Figura 9:** Simulación del modelo estabilizado, durante tres años.

Como podemos ver de la Figura 9, se llega solamente a un Stock-out, en un periodo corto durante los tres años que se realizó la simulación. Por lo que es aceptable el valor de la cantidad óptima sugerida de acuerdo al nivel de servicio de un 97% del componente. Esto comprueba la eficiencia de la cantidad óptima propuesta a mantener en el inventario en la compañía.

## 5 CONCLUSIÓN

La ecuación (1) propuesta para la determinación de la cantidad óptima de inventario puede ser sensibilizada variando el nivel de servicio del área de Abastecimiento, lo cual se muestra en la Tabla 3. Como podemos ver a menor nivel de servicio mayor es la cantidad de días en stock-out que podemos tener.

**Tabla 3:** Modificación del nivel de servicio.

Tiempo Logístico (Días)	Nivel de Servicio %	Factor de Seguridad	Cantidad Optima		Cantidad de Días de Stock-Out
			Q* Obtenido (Unid)	Q* Redondeo (Unid)	
155	99	2,6863	6,5099	7	9
155	97	2,0453	5,6659	6	27
155	90	1,3432	4,7413	5	89
155	85	1,1067	4,4299	5	134

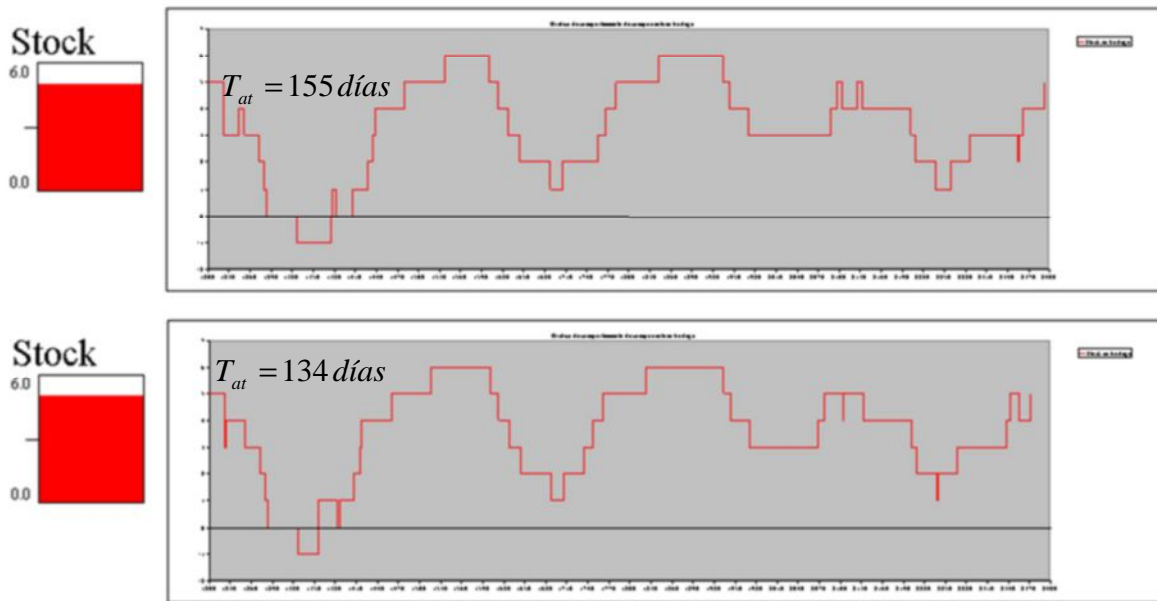
Vemos que es posible eliminar el Stock-out del inventario de acuerdo a la cantidad óptima, por medio de la reducción del tiempo logístico  $T_{at}$  (ver Tabla 4), y manteniendo las demás variables constantes. Además es posible no tener Stock-out, reduciendo el tiempo de gestión interna, principalmente en las áreas encargadas del embalaje de los componentes para ser enviados a reparación y el tiempo de generación de la orden de compra del área de Abastecimiento.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
 (2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

**Tabla 4:** Modificación del tiempo logístico manteniendo las demás variables constantes

Tiempo Logístico			Cantidad Óptima (Unid)	Reparados (Unid)	Garantía (Unid)	Componentes dados de Baja y/o Compra (Unid)	Estado		
Tiempo Gestión Interna (Días)	Tiempo Reparación (Días)	Tiempo Total (Días)					Stock-Out	Exceso	Cantidad
111	44	155	6	19	2	1	si	no	1
100	44	144	6	19	2	1	si	no	1
90	44	134	6	19	2	1	si	no	1
80	44	124	6	19	2	1	si	no	1
70	44	114	6	19	2	1	si	no	1
60	44	104	6	19	2	1	no	no	0
50	44	94	6	19	2	1	no	no	0
40	44	84	6	19	2	1	no	no	0
30	44	74	6	19	2	1	no	no	0
20	44	64	6	19	2	1	no	no	0
10	44	54	6	19	2	1	no	si	2

Como se observa de la Tabla 4, reduciendo el tiempo logístico  $T_{at}$  a 104 días es posible eliminar el Stock-out del inventario, y si disminuimos aún más el tiempo logístico a 54 días, se llega a un exceso de componentes en inventario, lo que permite disminuir en dos unidades el inventario propuesto. Por otra parte, reduciendo el tiempo logístico  $T_{at}$  en conjunto con la cantidad óptima a tener en inventario (ver Tabla 5) se obtienen las variaciones de acuerdo al nivel de servicio de un 97%. Algunas reducciones del tiempo logístico, obtienen la misma cantidad óptima, pero el tiempo en que se mantiene el inventario en stock-out es menor a medida que se disminuye el tiempo logístico (Ver Figura 10).



**Figura 10:** Comparación de la reducción de tiempos Stock-out.

- (1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
 (2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059

Otra variable posible sensibilizar es la probabilidad de que un componente sea dado de baja (ver Tabla 6). Observamos que al aumentar la probabilidad a un 30% de los componentes dados de baja, se elimina el stock-out del inventario. Ahora, si aumentamos a valores de probabilidad mayores o igual a un 35%, es posible tener un exceso de componentes lo que posibilita un ajuste a la cantidad óptima de inventario. En el caso de un 35%, es posible optimizar la cantidad óptima de componentes reparados de 6 unidades a 5 unidades. Este fenómeno se debe principalmente, ya que al dar de baja un componente se inicia el proceso compra de uno nuevo, en forma automáticamente, teniéndose que el tiempo de llegada del componente en reposición es menor que el tiempo logístico  $T_{at}$  de reparación.

**Tabla 5:** Modificación del tiempo logístico y la cantidad óptima, manteniendo las demás variables.

Tiempo LOGISTICO			Cantidad Optima Q* Redondeo (Unid/aprox)	Unidades en Proceso de Reparados	Unidades en Proceso de Garantía	Unidades en Proceso de Baja y/o Compra	Stock-Out	
tiempo Gestión Interna (Días)	Tiempo Reparación (Días)	Tiempo Total (Días)					Existe	Número de veces
111	44	155	6	19	2	1	si	1
90	44	134	6	19	2	1	si	1
80	44	124	5	19	2	1	si	1
70	44	114	5	19	2	1	si	1
60	44	104	5	19	2	1	si	1
50	44	94	4	19	2	1	si	3
40	44	84	4	19	2	1	si	2
30	44	74	4	19	2	1	si	1
20	44	64	3	19	2	1	si	3
10	44	54	3	19	2	1	si	4

**Tabla 6:** Modificación de las probabilidades de dar de baja un componente

Probabilidad de dar de Baja Componentes Provenientes de:		Cantidad Optima (Unid)	Tiempo logístico (Días)	Estado			Cantidad de Componentes Dados de Baja (Unid)
Proceso de Reparación Normal (%)	Proceso de Garantía (%)			Stock-out	Exceso	Cantidad	
12,5	16,6	6	155	si	no	1	1
20	20	6	155	si	no	1	2
25	25	6	155	si	no	1	2
30	30	6	155	no	no	0	5
35	35	6	155	no	si	1	7
45	45	6	155	no	si	1	12
55	55	6	155	no	si	1	13
65	65	6	155	no	si	1	15
75	75	6	155	no	si	1	16
85	85	6	155	no	si	1	18
95	95	6	155	no	si	1	21
100	100	6	155	no	si	1	22

- (1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)  
(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059



Este análisis de sensibilidad a las variables del modelo (ecuación (1) y (2)) propuesto en este trabajo, muestran que es posible minimizar los costos de bodega de la compañía por activos en inventario, ya que se logra disminuir la cantidad de componentes en lista o mejorar la respuesta del inventario (nivel de servicio). En el ejemplo desarrollado, se logra que de 6 componentes, sea posible bajar a 3 unidades, disminuyendo su tiempo logístico de reparación, y contribuyendo a una disminución de los activos en bodega hasta en un 50%, con un nivel de servicio de un 97%.

## 6 REFERENCIAS

- [1] Pascual, R., *El Arte de Mantener*, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2008.
- [2] Vidal, C., *Fundamentos de Gestión de Inventario*, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
- [3] Louit, D., Pascual, R., Banjevic, D., Jardine, A.K.S., *Optimization Models for Critical Spare Parts Inventories - A Reliability Approach*. Working paper, University of Toronto, 2005.
- [4] Espinosa, F., *Manejo del Inventario de Mantenimiento*. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca.
- [5] Kelton, Sadowski & Sturrock, *Simulación con Software Arena* (4ta edición).
- [6] Curiel, M., *Ajustando Distribuciones a los Datos*. Apuntes Curso Estadística, Departamento de Computación y Tecnologías de Información, Universidad Simón Bolívar. Venezuela, 2009.
- [7] Reyes, P., *Curso de Confiabilidad*. Iicm.com, 2006.
- [8] ReliaSoft - Life Data Analysis reference.
- [9] Rockwell Automation -User's guide Software Arena.
- [10] Ross, S.M., *Introducción a la estadística*, Editorial Reverté, España 2008.
- [11] Meruane, V., *Gestión de Activos Físicos*, Departamento de Ingeniería Mecánica, facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [12] Basogain, X., Olabe, M.A., *Modelamiento y Simulación de Sistemas de Eventos Discretos*, Departamento de Ingeniería de Sistema y Automática Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Bilbao, España.
- [13] Díaz, A. and Fu, M.C. *Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity*, European Journal of Operational Research, 97: 480-492, 1997.

(1) Ingeniero Senior Confiabilidad, [carrospide@barrick.com](mailto:carrospide@barrick.com) | Barrick Sudamérica | + 56 (55) 243-3237 | + 56 9 6 228-6487 ; [www.barricksudamerica.com](http://www.barricksudamerica.com)

(2) [r.ruiz.rebolledo@hotmail.com](mailto:r.ruiz.rebolledo@hotmail.com) | Alumno Memorista Universidad de Antofagasta | +56 9 9662 4059