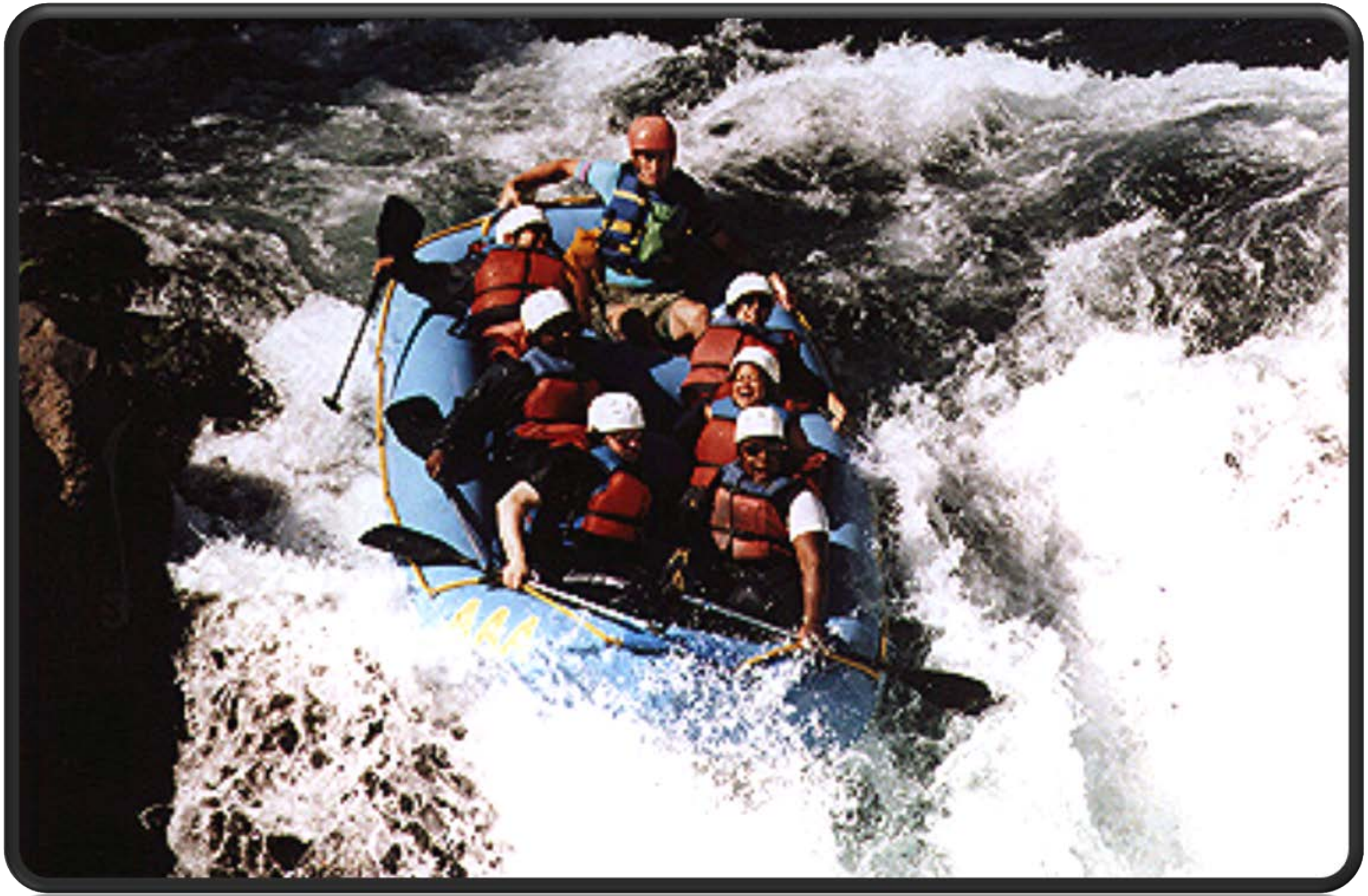
Gestión de Repuestos Reparables: Determinación de una Política Óptima de Compra y Reparación

César Arróspide M.

Contexto de la Industria

EL MERCADO



Tiempos Difíciles

2008

Proveedores de minería extienden plazos de entrega

Publicado el *15 De Enero Del 2008*

Además, las compañías deberán anticiparse para obtener cupos en la línea de producción de los proveedores.

Compartir: Compartir 0 | Twittear | G+1 0 | Compartir

Enviar por email | Imprimir | Notas al editor | Suscribirse a newsletter

Durante los próximos tres años, las empresas mineras deberán programarse adecuadamente respecto de la necesidad de maquinarias o equipos para desarrollar sus proyectos, debido a la ampliación en los tiempos de entrega a los que están enfrentados los proveedores de la gran minería como consecuencia de la alta demanda a nivel mundial, adelantó Pedro Lasota, gerente general de Aprimin.

2011

Boom de desarrollos mineros genera escasez y alza de costos en maquinarias y equipos

Demanda por neumáticos y camiones ha crecido 30% a 40% el último año. Alza de costos llega a 15%.

por Jessica Marticorena

Compartir

Un hecho es evidente hoy en la industria minera: las compañías están acelerando sus planes de desarrollo y expansión para aprovechar el auge de las materias primas. Junto con eso, otro hecho es claro en el último tiempo: el boom de proyectos podría convertirse en una amenaza para la industria. La elevada demanda por equipos y maquinaria clave en el sector está generando escasez de estos insumos en todo el mundo. Las empresas ya perciben un aumento de los costos por ese efecto y advierten que el escenario podría desacelerar el crecimiento del negocio.

2010

Caterpillar adquiere Bucyrus por US$8.600 millones

Publicado el *15 De Noviembre Del 2010*

Equipos Bucyrus serán ahora Caterpillar

Publicado el *1 De Agosto Del 2011*

Asimismo, todos los productos serán vendidos por distribuidores CAT. En ese sentido, la compañía especificó que planea vender el negocio de distribución de Bucyrus a los distribuidores Caterpillar.

2014

Ante paralización de proyectos

Proveedores de la Gran Minería Revelan Su Dura Realidad

Fuertes bajas en sus ventas, renegociación de contratos sacrificando la utilidad y masivas reducciones de personal, son algunos de los problemas que están enfrentando estas empresas, ya sean grandes o medianas.

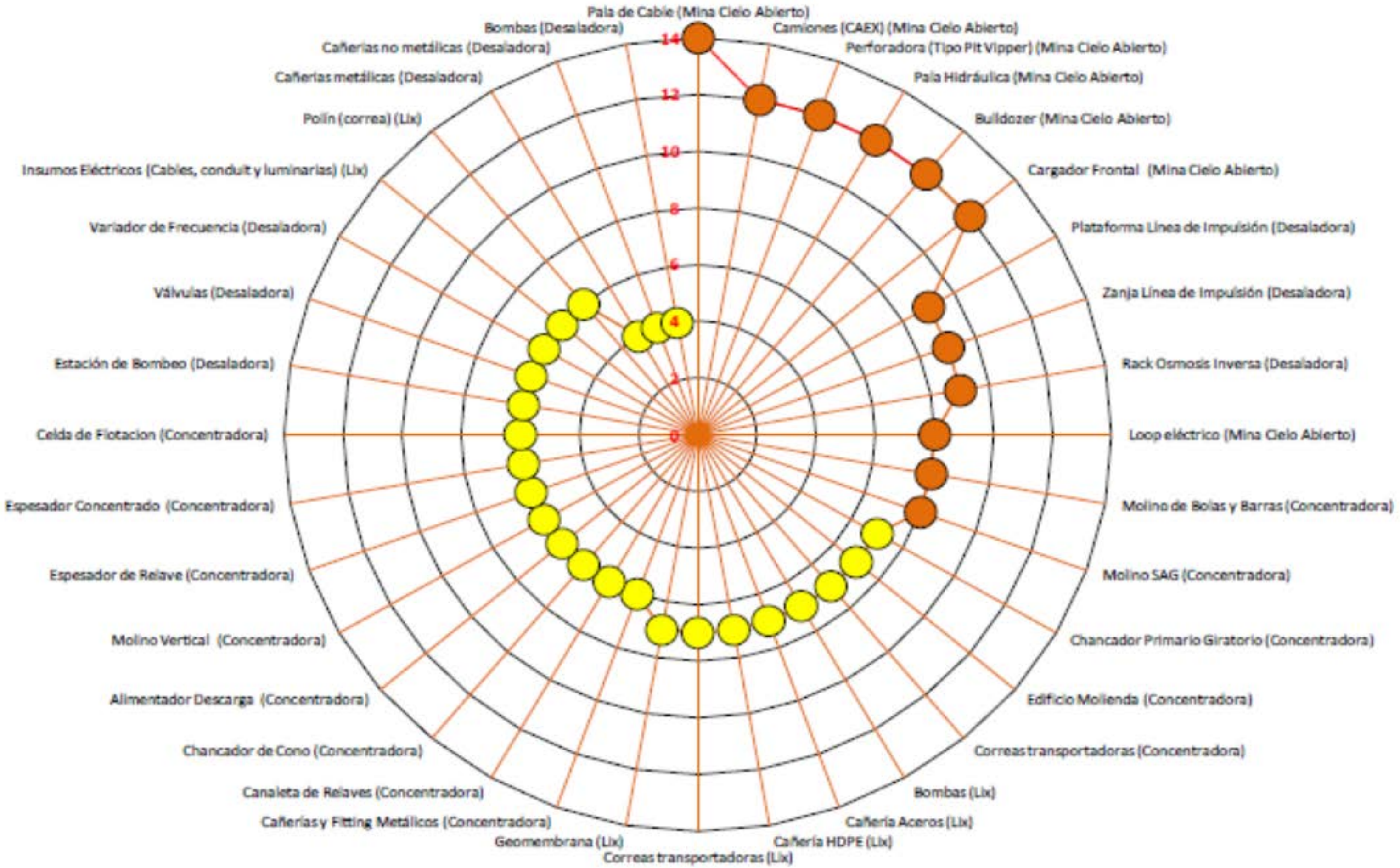
2016

Komatsu acuerda comprar Joy Global por US$2.900 millones

Publicado el *21 De Julio Del 2016* — Minería Chilena

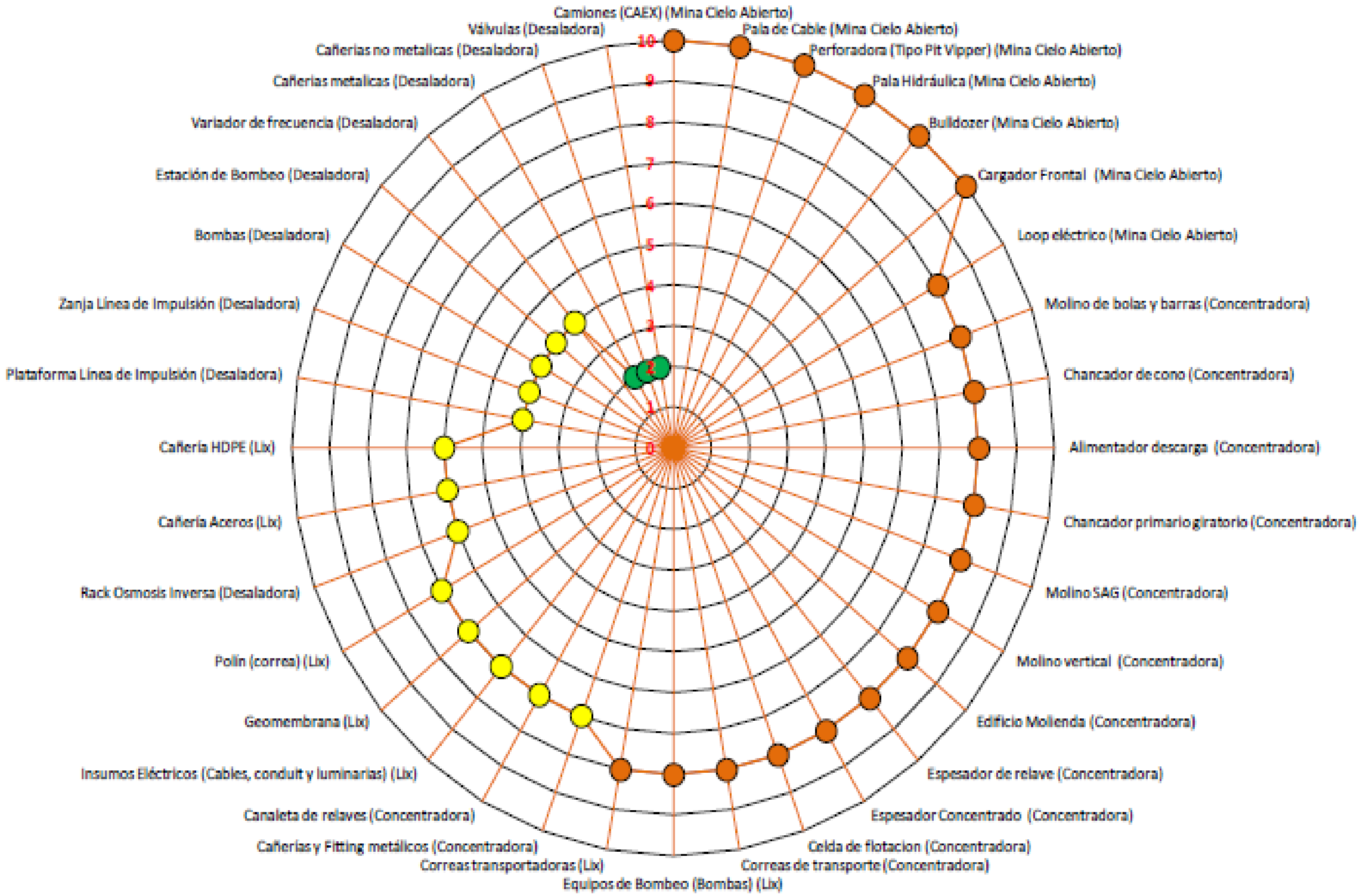
El acuerdo permitiría a la firma nipona duplicar su negocio de equipos para la industria minera y le daría acceso al segmento de minería subterránea.

Fig. 30: Severidad del riesgo por aumento de precios Insumos CAPEX



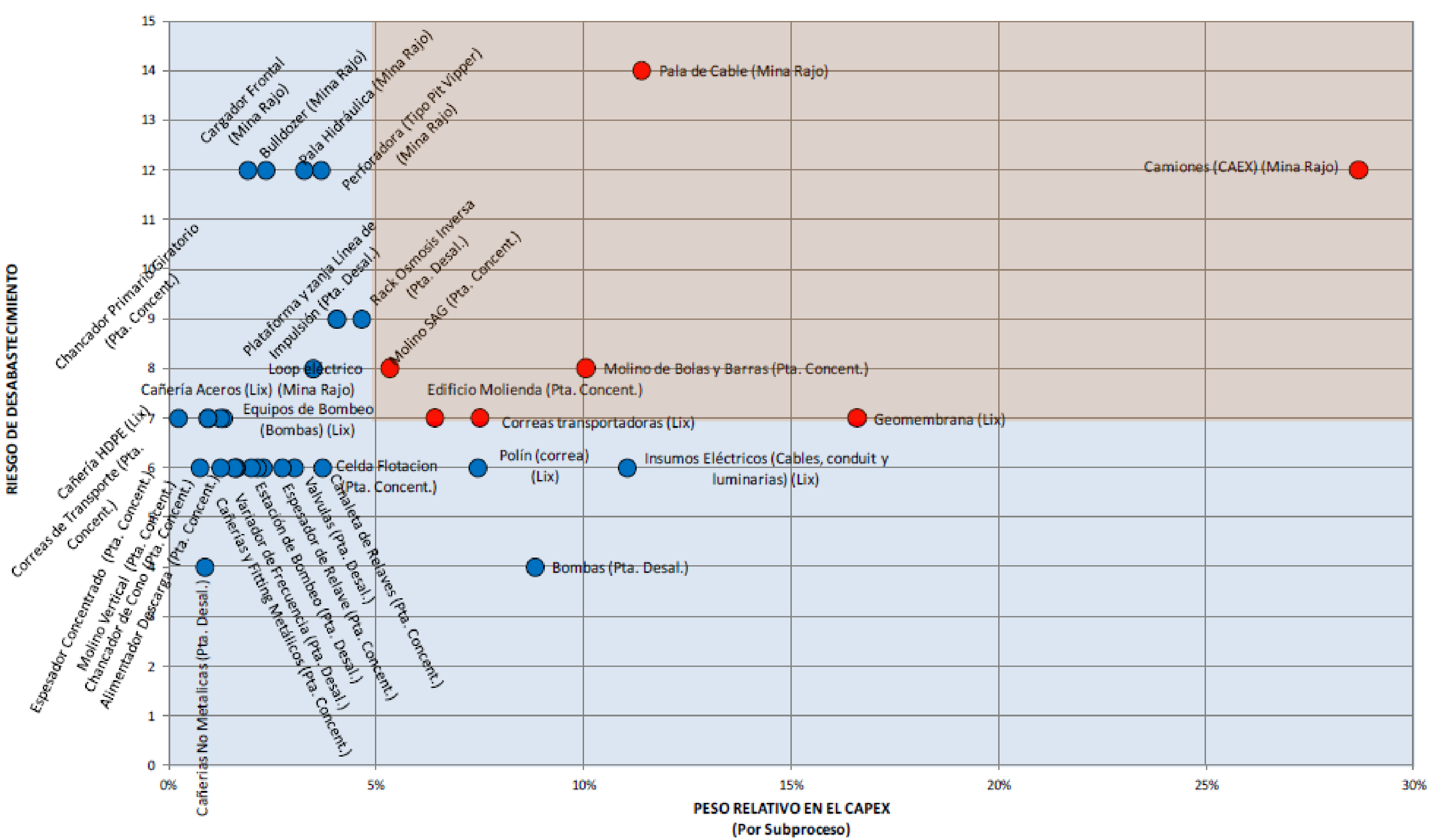
Fuente: Cochilco

Fig. 32: Severidad del riesgo por retrasos en la entrega de los insumos CAPEX

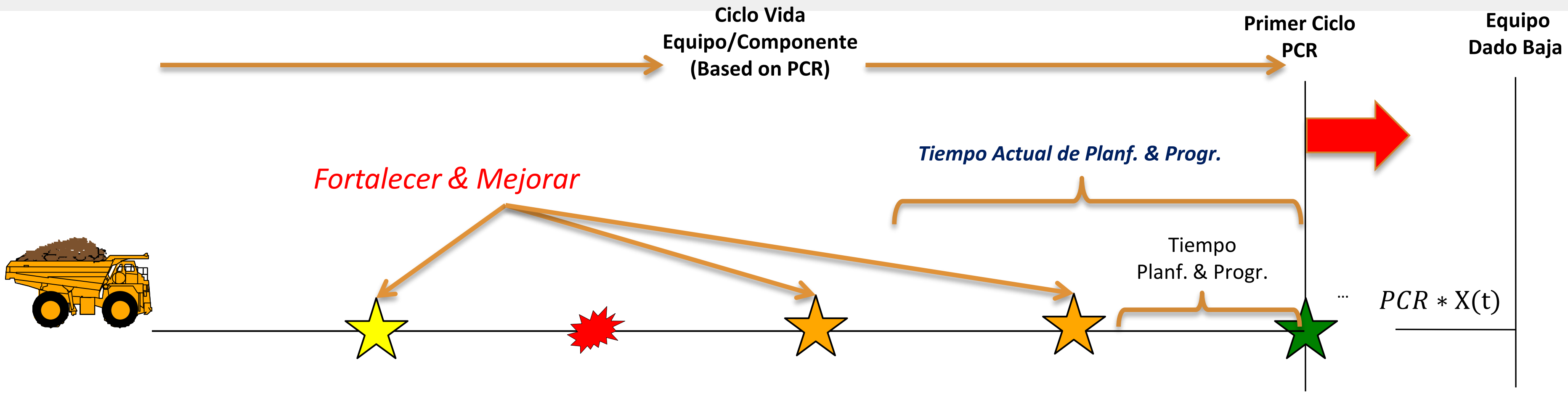


Fuente: Cochilco

Fig. 34: Insumos Críticos CAPEX



Mantenimiento & Reparación de Equipos



Razones Paradas	**Rutinas Inspección**	**Reparaciones No -Programadas**	**Servicios Períodicos (PM)**	**Prog. Reparaciones Mayores & Menores**	**PCR Planf. & Prog. Reemplazo Componentes**
Características Principales	• Minimizar Paradas No Programadas • Frecuencia en función del MTBF & MTBS •Pautas con tareas de medicion y control	• Quién tiene el control? • Deben reducirse al mínimo • Influencia negativa sobre MTBF, MTBS, MTTR & Disponibilidad • Revisión de Estrategias, Planes y Frecuencias de acuerdo a los Modos de Falla (RCM)	• Frecuencia Fija • Rutinas bien conocidas • Base de la Gestión Mantenimiento Eficiente / Efectivo	• Una ventana para planificar la mantención del equipo en un cierto estándar • Frecuencia determinada por el Área Ingeniería Mantenimiento	• Frecuencia Determinada por Objetivos de Vida • Utilizar ventana para restaurar el equipo al estándar • Punto de comienzo de un nuevo Ciclo de Vida Componente
Impacto	Construcción Plan Preventivo	MTBF, MTBS, MTTR, Disponibilidad & Plan Mantenimiento	Disponibilidad	Capacidad de Mantener el Plan de Mantenimiento	Costos (US $)

El Camino a seguir……

FASE 0: Entender el PROBLEMA (S) – Tipos de Inventarios

FASE 1: Re-Diseño de ESTRATEGIA

- Misión – Visión
- Objetivos Estratégicos
- Diseño de Proceso Inventarios Consumibles – Reparables
- Procedimientos
- Organigrama – ROL&RESPONSABILIDADES
- Métricas – KPI´s
- Otros…..

FASE 2: Revisión del Team – “Competencias Técnicas” - CAPACITACIÓN

FASE 3: CRITERIOS DECISIÓN - Políticas

FASE 4: DESARROLLO DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN (Single – echelon/Multi -echelon)

FASE 5: MODELOS SIMULACIÓN

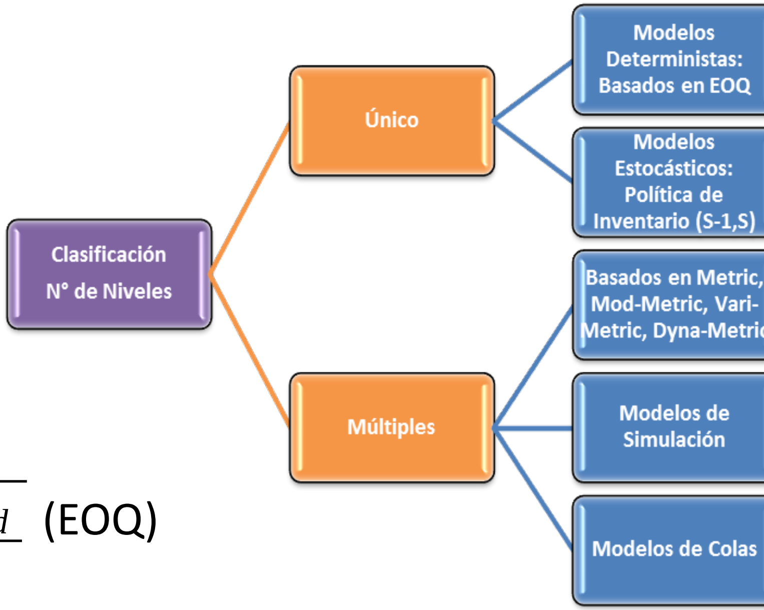
FASE 6: CONFIGURACIÓN SAP/Otros

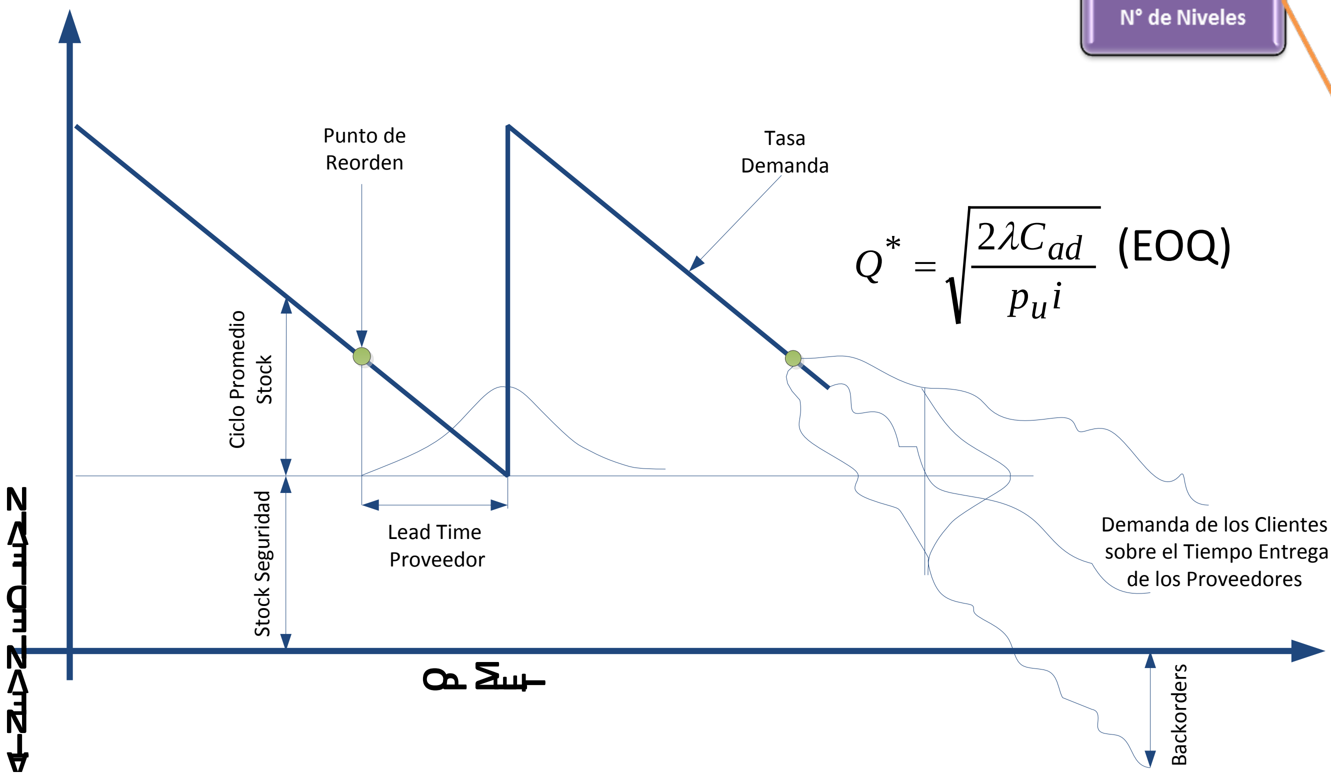
FASE 7: NEGOCIACIONES – Acuerdos con Proveedores/Fabrica

Problema de Gestión de Inventarios Reparables

Componentes Reparables

Componentes que pueden ser retornados a un estado operacional deseado, "tan bueno como nuevo"…….

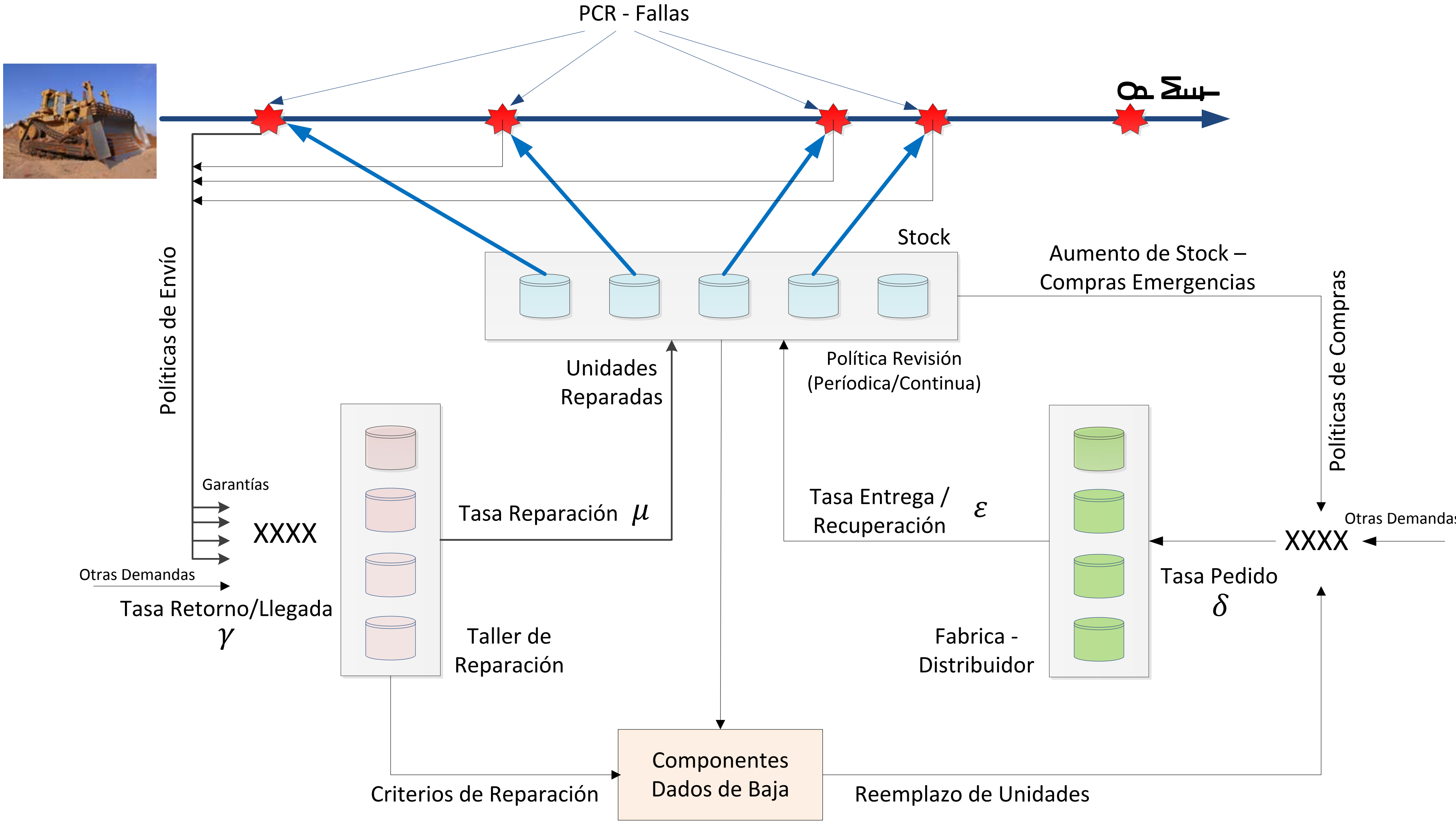




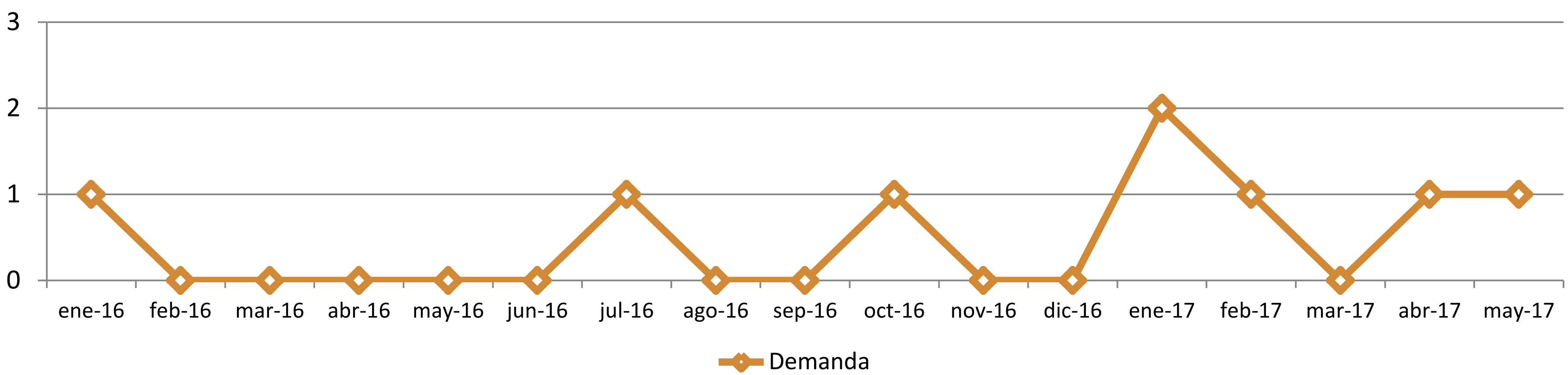
$$Q^* = \sqrt{\frac{2\lambda C_{ad}}{p_u i}} \quad \text{(EOQ)}$$

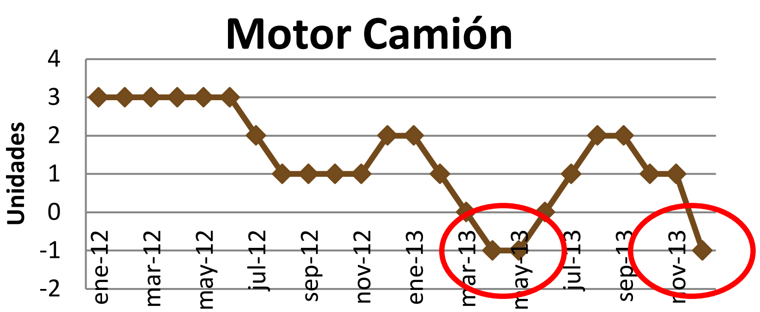
Años '70, los primeros trabajos en Gestión de Inventarios Reparables son gatillados por la Fuerza Aérea de la Armada de los Estados Unidos.

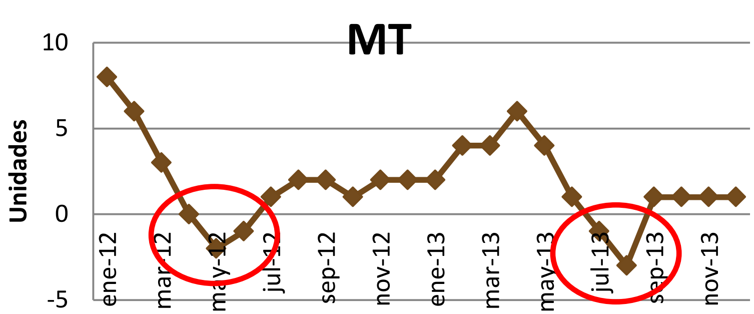
El Problema


PCR - Fallas
Stock
Aumento de Stock –
Compras Emergencias
Políticas de Envío
Políticas de Compras
Unidades
Reparadas
Política Revisión
(Períodica/Continua)
Garantías
XXXX
Otras Demandas
Tasa Retorno/Llegada
γ
Tasa Reparación μ
Taller de
Reparación
Tasa Entrega /
Recuperación ε
XXXX
Otras Demandas
Tasa Pedido
δ
Fabrica -
Distribuidor
Componentes
Dados de Baja
Criterios de Reparación
Reemplazo de Unidades

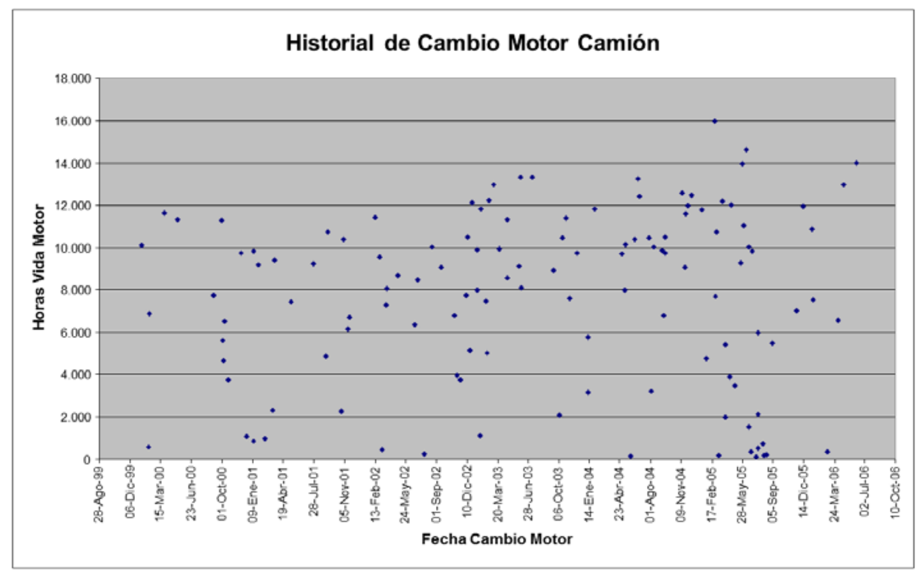
Demanda por Fallas - Compañía







Demanda en Fabrica



Medidas de Rendimiento

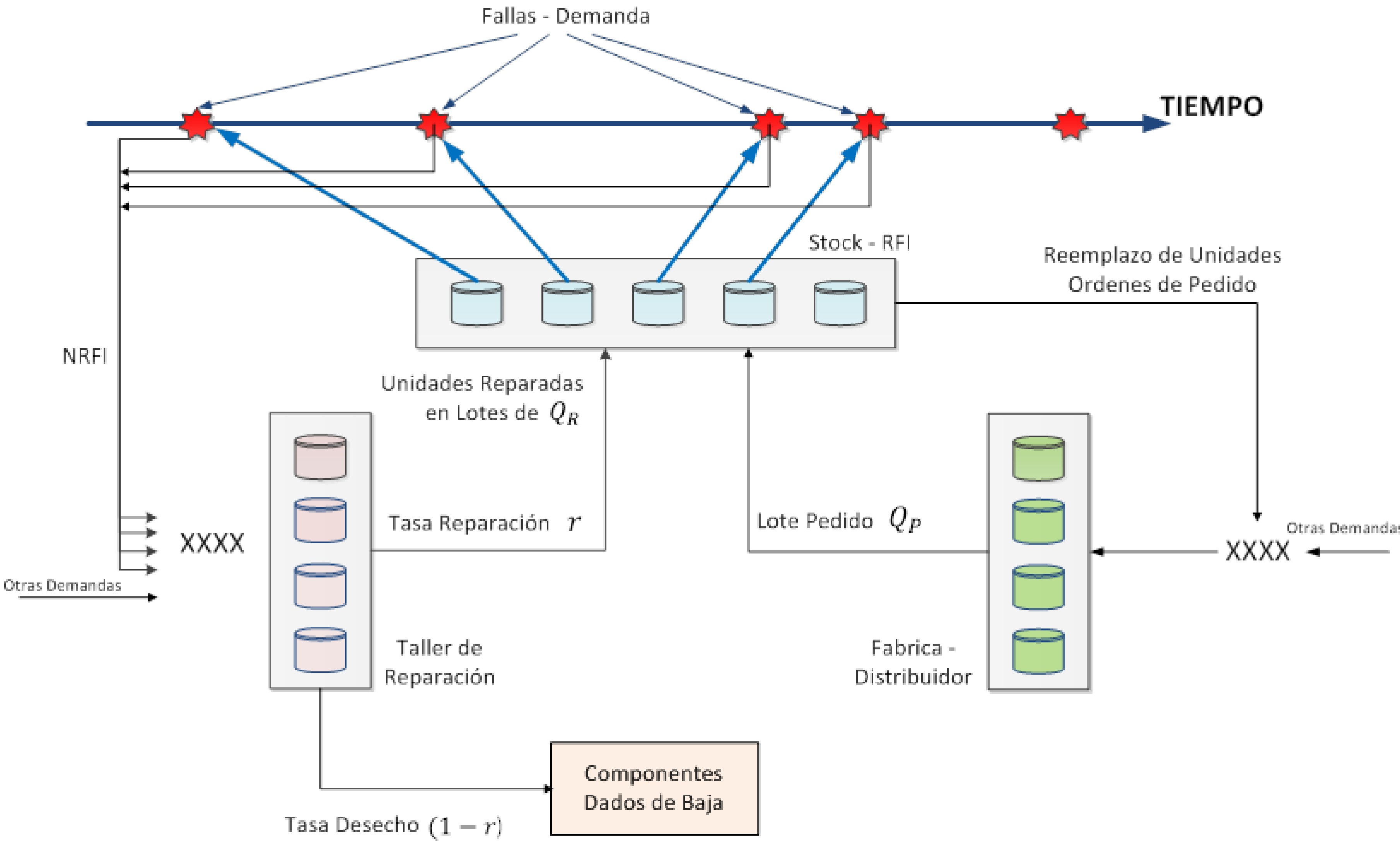
- El ***Nivel de Servicio de Ciclo (CSL)*** que indica el porcentaje de ciclos en los que no existen roturas de stock, también conocido como P_1.
- El ***Fill Rate (FR)*** que se define como la fracción de demanda que se cubre con el stock físico disponible o P_2.
- El ***Ready Rate*** o fracción de tiempo durante el cual el stock neto es positivo, también conocido como P_3.
- ***Backorders (BO)*** número de demandas que no son satisfechas en cualquier punto del tiempo.
- El ***Tiempo Medio entre Roturas de Stock (TBS)***.

Criterios de Optimización

- ***Nivel de Servicio Instantáneo***: probabilidad de que un repuesto esté disponible en cualquier instante.
- ***Nivel de Servicio en un Intervalo (o misión)***: probabilidad de no quedarse sin stock en ningún momento sobre un intervalo específico de tiempo.
- ***Costo Global***: es el criterio más utilizado. Incluye:
  - *Costos de Adquisición*
  - *Costos de Intervención Repuestos*
  - *Costos de Propiedad*
  - *Costos de falla*
- ***Disponibilidad del Sistema Soportado***: fracción del tiempo en que el equipo está en servicio producto de la disponibilidad de repuestos.
- ***Disponibilidad Operacional***: suponemos que cada componente backordeado resulta en un sistema no-operacional.

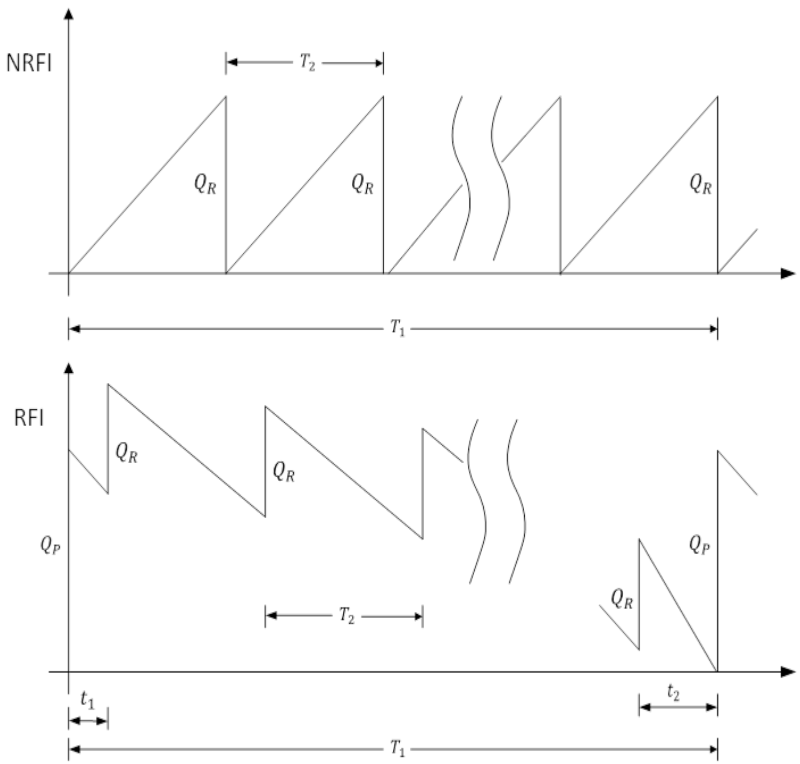
Modelos Deterministas (tipo EOQ)

Sistema de Inventario con Reparación



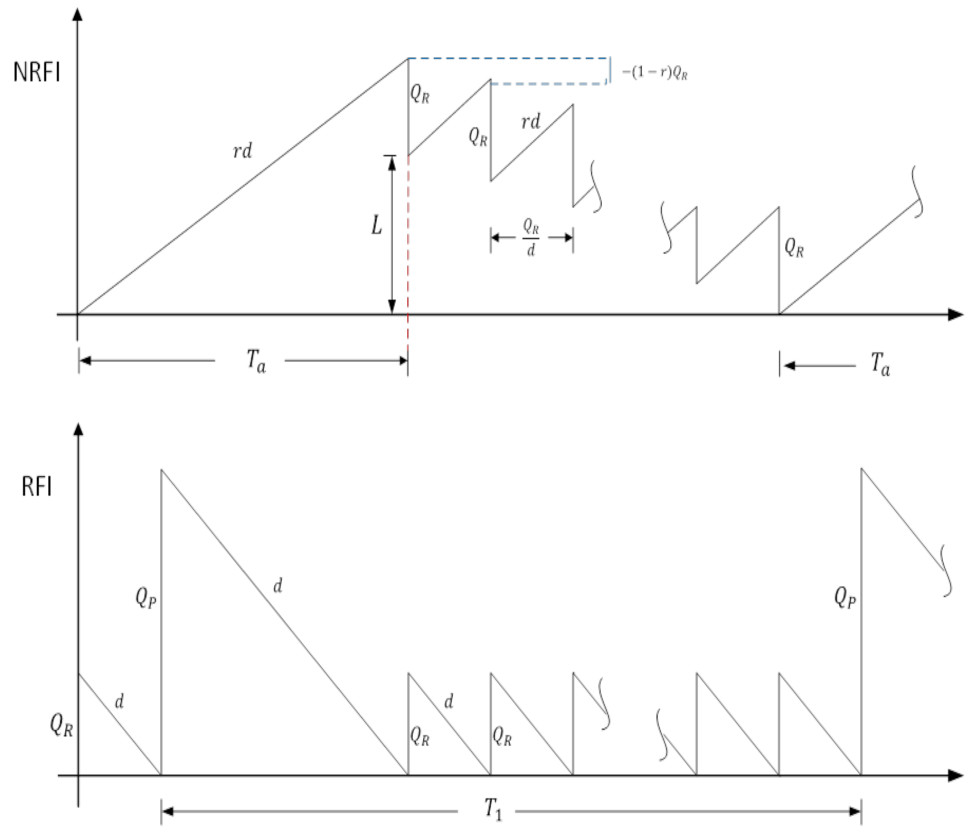
Modelos Inventarios Reparables

<u>Caso 1</u>:



$$Q_P^* = \sqrt{\frac{2SdA_P}{h_1}} \qquad Q_R^* = \sqrt{\frac{2rdA_R}{h_2 + h_1(1-2k)}}$$

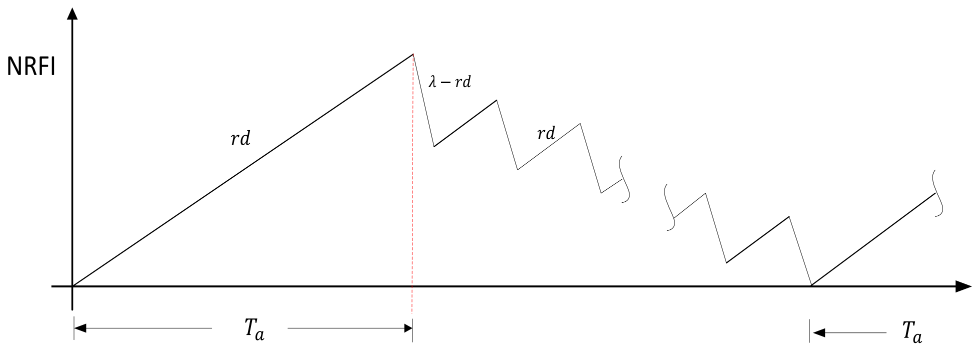
<u>Caso 2</u>:

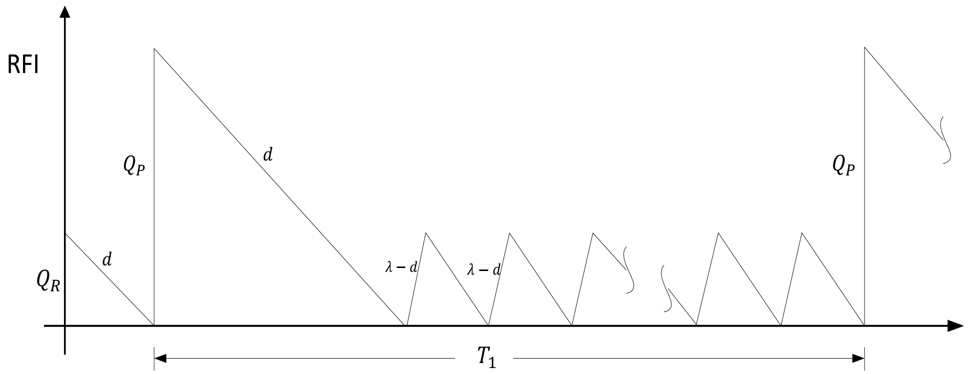


$$Q_P^* = \sqrt{\frac{2SdA_P}{Sh_1 + rh_2}} \qquad Q_R^* = \sqrt{\frac{2dA_R}{h_1 + h_2}}$$

Modelos Inventarios Reparables

Caso 3:





$$Q_P^* = \sqrt{\frac{2SdA_P}{Sh_1 + rh_2}} \qquad Q_R^* = \sqrt{\frac{2dA_R}{(h_1 + h_2)\left(1 - \frac{d}{\lambda}\right)}}$$

Otros casos………

Modelos Estocásticos

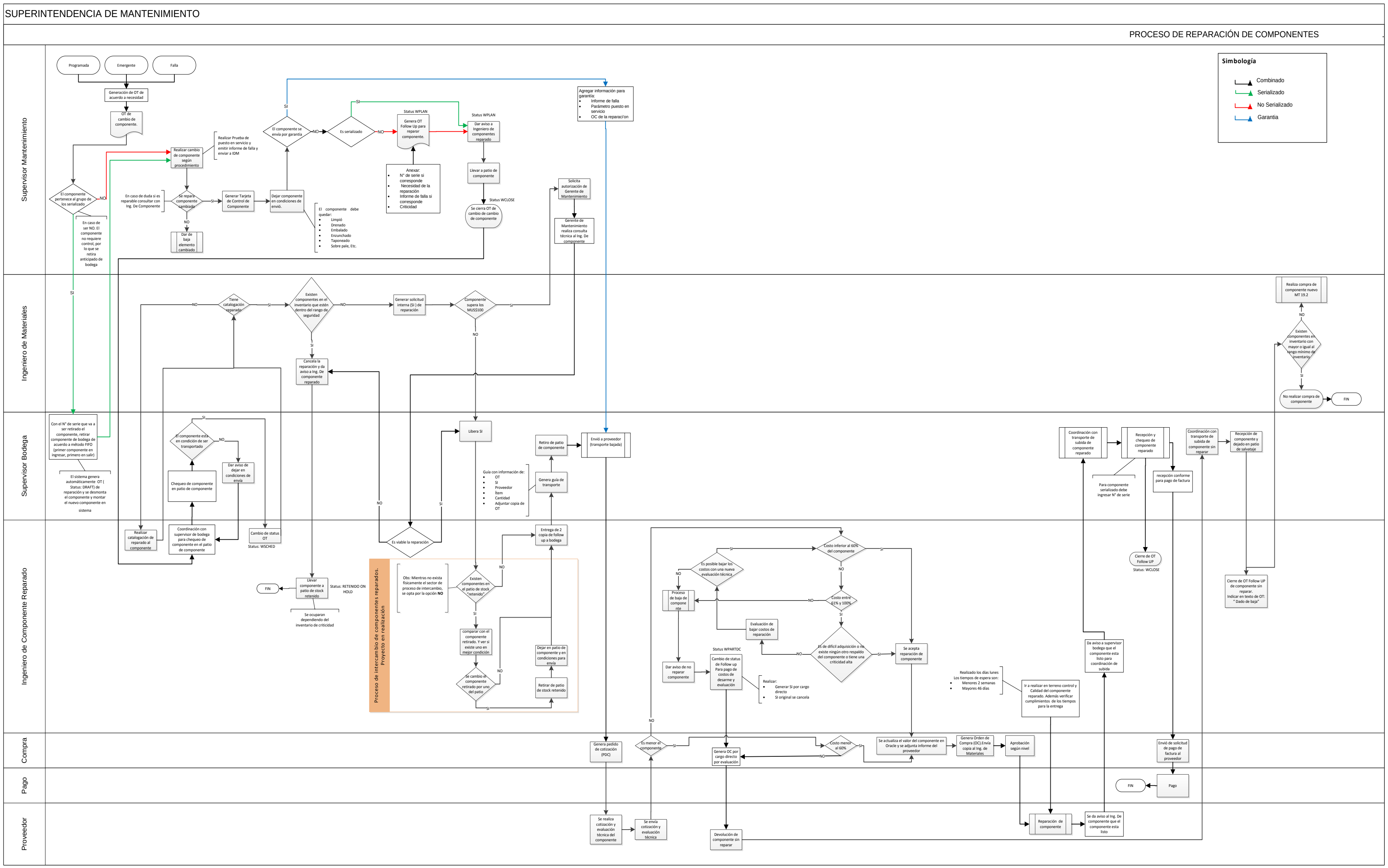
Casos en Estudio……

Sistema	Supuesto	Criterio Optimización	Casos/Política
Single – Echelon Problem	Capacidad Reparación Ilimitada		
		Confiabilidad Instantánea	1.- Reparación uno a uno (one-for-one) 2.- Reparación por lote (batch) ❖ Todo Lote Indistintamente su Tamaño ❖ Todo Lote Indistintamente su Tamaño – Tasa de Reparación Idéntica ❖ Reparación por Lote de Tamaño Específico ❑ Tamaño del Inventario Inicial Mayor al Lote de Reparación ❑ Tamaño del Inventario Inicial Menor al Lote de Reparación
		Minimización Backorders Esperados	Sujeto a una Restricción de Inversión en Inventario
		Maximización de la Disponibilidad	1.- Operacional 2.- Soportada
		Costos	1.- Costos del tiempos de inactividad (downtime), costos de mantener inventario 2.- Costos totales 3.- Costos totales sujeto a restricciones de servicios
		Maximización Fill Rate Esperado	Sujeto a una Restricción de Inversión en Inventario
	Capacidad Reparación Limitada	Confiabilidad Instantánea	1.- Número de canales de reparación ≤ número de unidades de la flota 2.- Número de canales de reparación > número de unidades de la flota

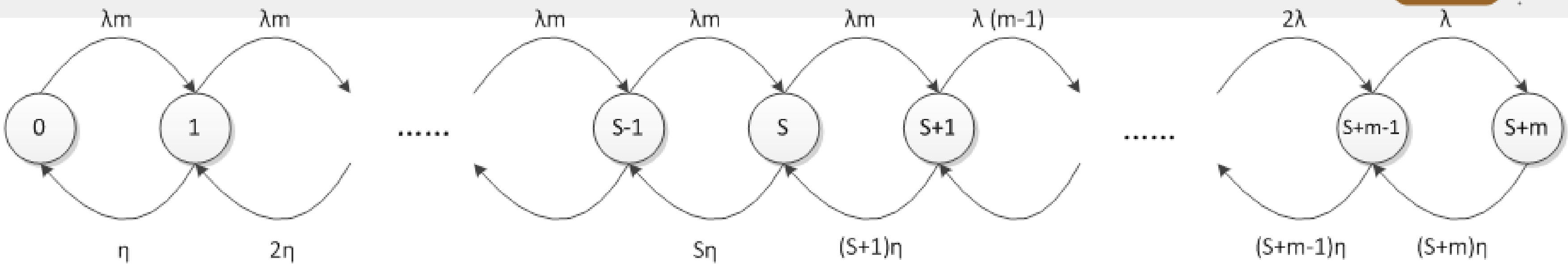
Gracias………

Back-up

Proceso Reparación Componentes



Caso: Confiabilidad Instantánea, Reparación uno a uno (one-for-one)



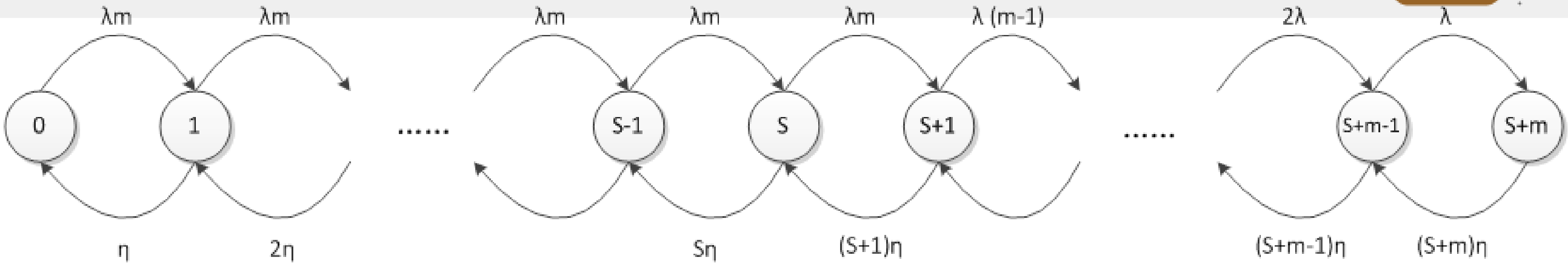
$$Min \quad S^*$$

$$s.a. \quad \sum_{i=0}^{S^*} e^{-a}\frac{a^i}{i!} \geq p$$

Descripción	Cantidad	Unidad de Medida	Observación
Datos Generales			
Flota de Camiones	39	Camiones	
Componente X	2	Unidades por Camión	
Componente X en operación	78	Unidades	
Horas Operación Camión al Año	6.600	Horas Operación/año	Horizonte Planificación
Horas Calendario Año	8.760	Horas Calendario/año	
Intervalo Cambio Componente X	9.000	Horas Operacionales	
Total Eventos	171		
Fallas	86		
Cambios Preventivos	85		
Parámetros Weibull			
Beta (β)	0,8565	Horas operacionales	
eta (η)	14.650	Horas operacionales	
Parámetros Cadena Markov			
Tiempo medio demanda (μ) - reemplazo	6.420,3	Horas operación	
Tasa de demanda (λ) - reemplazos	0,000156	reemplazos/ horas operacionales	
Tiempo medio reparación MTTR	452	Horas operación	
Tasa de reparación (η)	0,002212	Reparaciones /Horas Operacionales	

Política Reparación uno - uno		
Parámetros		
a	5,4913	
Stock (S*)	10	
Confiabilidad Garantizada (p)	97,00%	
Número de ítems en inventario (S*)	Valor Modelo	suma
0	0,41223%	0,41223%
1	2,26372%	2,67595%
2	6,21542%	8,89137%
3	11,37697%	20,26834%
4	15,61868%	35,88702%
5	17,15347%	53,04049%
6	15,69924%	68,73973%
7	12,31567%	81,05541%
8	8,45368%	89,50909%
9	5,15800%	94,66709%
10	2,83243%	97,49951%
11	1,41398%	98,91350%

Caso: Maximización de la Disponibilidad Soportada



$$\text{Número Esperado de Componentes Indisponibles} = U_S = \sum_{i=S+1}^{S+m} (i-S)\pi_i$$

$$\begin{aligned} &Min \;\; S \\ &s.a. \;\; \frac{U_S}{m} \leq 1 - A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &Min \;\; S \\ &s.a. \;\; \frac{1}{m}\left[\sum_{i=S+1}^{S+m} (i-S) \prod_{k=S+1}^{i} \left(1 - \frac{[k-(S+1)]}{m}\right) \frac{a^i}{i!} e^{-a}\right] \leq 1 - A \end{aligned}$$

Parámetros del Modelo				
	N° Demandas durante una Reparación	a	5,4913	
	Stock Óptimo	Stock (S*)	6	
	Cantidad Componentes X	m	78	
	Disponibilidad	A	0,99	
		1-A	0,0100	
Cantidad Stock	i	Valor Modelo	Suma Lado Izquierdo (Acumulado)	Diferencia con Lado Derecho
s+1	7	0,001578933	0,00157893	-0,00842107
s+2	8	0,002139821	0,00371875	-0,00628125
s+3	9	0,001908196	0,00562695	-0,00437305
s+4	10	0,001343402	0,00697035	-0,00302965
s+5	11	0,000795313	0,00776566	-0,00223434
s+6	12	0,000408737	0,00817440	-0,00182560

Caso: Minimización Backorders Esperados Sujeto a una Restricción de Inversión en Inventario

$$Min \quad EBO(S)$$
$$s.a \quad c[S - E[DI] + EBO(S)] \le b$$

$$\Updownarrow$$

$$Min \quad (a-S)\left[1-\sum_{j=0}^{S} e^{-a}\frac{a^j}{j!}\right] + ae^{-a}\frac{a^S}{S!}$$

$$s.a. \quad c\left[S - \frac{\lambda m}{\eta} + (a-S)\left(1-\sum_{j=0}^{S} e^{-a}\frac{a^j}{j!}\right) + ae^{-a}\frac{a^S}{S!}\right] \le b$$

$$\Updownarrow$$

$$Min \quad EBO(S) + \theta\left[c\left(S - a + EBO(S)\right) - b\right]$$
$$s.a. \quad S = 0,1,2\ldots$$

Algoritmo

- **Paso 0:** Sean $\theta_{\min} = 0, \ \theta_{\max} = \frac{1}{c}\left[\frac{1}{p\left(0/\lambda\frac{m}{\eta}\right)} - 1\right]$

  y $N = 0$

- **Paso 1:** Calcular $\theta = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\max}}{2}$, y $N = N + 1$
- **Paso 2:** Encontrar el valor más pequeño $S^*(\theta)$ para el cual $\sum_{x \le S} p\left(x/\lambda\frac{m}{\eta}\right) \le \frac{1}{(1+\theta c)}$
- **Paso 3:** Calcular

  $A = c\left(S(\theta) - \frac{\lambda m}{\eta} + EBO(S(\theta))\right)$. Si $|A - b| < \varepsilon$, para $\varepsilon > 0$ lo suficientemente pequeño, o si $N >$ máximo iteraciones, Parar. En caso contrario, si $A > b$, sea $\theta_{\min} = \theta$, y si $A < b$, sea $\theta_{\max} = \theta$, y retornar al Paso 1.

Back-up 2

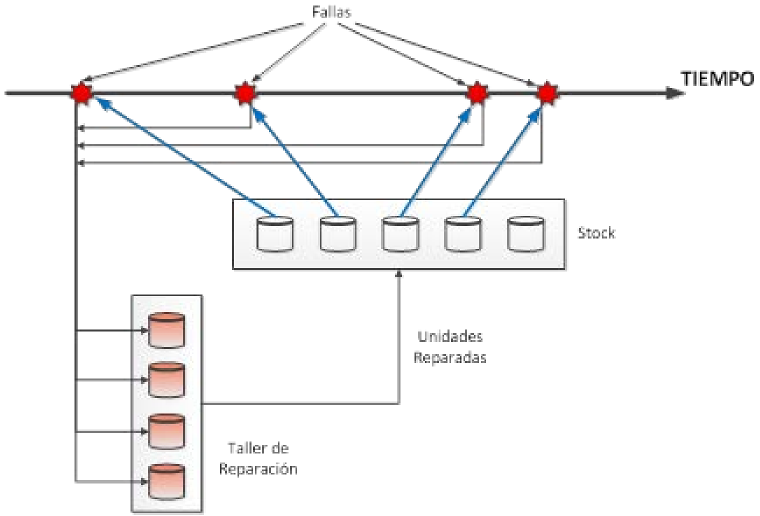
Posición del Inventario

$$I_t = OH_t - D_t + DI_t + C_t - CB_t$$

I_t = posición del inventario en el tiempo t
OH_t = número de unidades disponibles (on-hand) en el tiempo t
D_t = número de unidades que fallan en el tiempo t
DI_t = número de unidades en el sistema cola de reparación en el tiempo t
C_t = numero de unidades en el sistema de ordenes del proveedor en el tiempo t
CB_t = número de unidades dadas de baja en el tiempo t
$BO_t = OH_t - D_t < 0$ número de unidades pendientes (Backorders) en el tiempo t
N_t = inventario neto en el tiempo t

$$I_t = N_t + DI_t + BO_t$$

[1] 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.
[2] Sherbrooke, C.C. *Optimal Inventory Modelling of Systems:* multi-echelon techniques, Second Edition, Kluwer, Bostos, 2004.
[3] Muckstadt, J. and Sapra, A., *Principles of Inventory Management: When you are Down to four, order more*. Springer, 2010.



El Problema

Sea $x(t)$ variable aleatoria representando el número de unidades en reparación (reabastecimiento) en algún tiempo arbitrario t. Distinguiremos entre el caso "backorder" en el cual "x", tiene el rango $0 \leq x < \infty$, y el caso "ventas perdidas" donde "x" está restringida al rango $0 \leq x < S$. En el caso "ventas perdidas", cualquier demanda que ocurre cuando existen S unidades en reabastecimiento es rechazada, puesto que no existe stock on hand.

Utilizaremos una "Política de Inventario $(S-1, S)$" de revisión continua. Sea "λ" la tasa de demanda del proceso de pedidos de los clientes.

Caso Backorder

Teorema: Sea *"S"* el nivel de stock para un ítem cuya demanda es generada por un proceso de Poisson con tasa *"λ"*. Considere que el tiempo de reabastecimiento es una variable aleatoria con función de densidad *g(t)* con media *"T"* y función de distribución *G(t)*. Supongamos que los tiempos de reabastecimiento son independientes e idénticamente distribuidos entre pedidos de los clientes. Entonces la probabilidad en estado estacionario que "*x*" unidades son reabastecidas está dada por

$$h(x) = e^{-\lambda T}\frac{(\lambda T)^x}{x!}$$

Caso Ventas Perdidas (Lost Sales)

Teorema: Supóngase que las ordenes de los clientes llegan de acuerdo a un Proceso de Poisson con tasa de llegada λ. Además, suponga que el nivel de Stock es *S*, y el tiempo de reabastecimiento para pedidos de clientes aceptados son independientes e idénticamente distribuidos con densidad común *gτ=βe-βτ*, con media *τ=1β*. Entonces la probabilidad estacionaria que *x* unidades están en reparación en el caso ordenes perdidas está dado por

$$\pi_x = \frac{e^{-\lambda/\beta}\left(\dfrac{\lambda}{\beta}\right)^x / x!}{\displaystyle\sum_{n=0}^{S} e^{-\lambda/\beta}\frac{\left(\dfrac{\lambda}{\beta}\right)^n}{n!}} = \frac{e^{-\lambda\bar{\tau}}\left(\lambda\bar{\tau}\right)^x / x!}{\displaystyle\sum_{n=0}^{S} e^{-\lambda\bar{\tau}}\frac{\left(\lambda\bar{\tau}\right)^n}{n!}}$$

El Problema

Sea $\pi_i(t)$ la probabilidad que "i", $(i = 0,1,\dots\dots,m)$, maquinas estén en reparación en el tiempo "t". Sea $\pi(t) = [\pi_0(t), \pi_1(t), \dots\dots, \pi_m(t)]$ el vector de probabilidades de estado en el tiempo t. El vector de probabilidades $\pi(t)$ satisface el sistema de ecuaciones diferenciales

$$\pi'(t) = \pi(t)Q$$

donde $\pi_i'(t) = \frac{d\pi_i(t)}{dt}$, $\quad i = 0,1,\dots\dots,m,\quad$ y

$$Q = \begin{pmatrix} -\lambda_0 & \lambda_0 & 0 & 0 & \cdots & & 0 \\ \eta_1 & -(\lambda_1+\eta_1) & \lambda_1 & 0 & \cdots & & 0 \\ 0 & \eta_2 & -(\lambda_2+\eta_2) & \lambda_2 & \cdots & & 0 \\ & & & \vdots & \cdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & -(\lambda_{m-1}+\eta_{m-1}) & \lambda_{m-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \quad 0 & 0 & \eta_m & -\eta_m \end{pmatrix}$$

Definimos el modelo:

- $M(t)$: número de unidades, "i", sometidas a reparación en un momento particular en el tiempo "t".

Sí S es el tamaño inicial del stock del inventario, obtenemos los siguientes casos factibles:

- Si $i \leq S$, el número de unidades en operación sigue siendo "m", y el tamaño actual del stock es "$S - i$".

Si $i > S$, el número de unidades en operación "$S + m - i$", y el stock está agotado.