

5.2 Demanda insatisfecha diferida. Calidad de servicio

5.2.1 Calidad de servicio en lugar de coste de ruptura

Si la limitación sobre la calidad de servicio se da en la forma $H(s) \leq \alpha$, automáticamente, a partir de la ley de la demanda $h(x)$, podremos obtener como condiciones equivalentes $y(s) \leq Y$ o bien $s \leq Z$, que deberán tenerse en cuenta en la obtención de Q y s . Si la condición se da en lugar del coste de ruptura, K se reducirá a:

$$K = CL \cdot \frac{D}{Q} + CS \cdot \left(s - mL + \frac{Q}{2} \right)$$

Al minimizar K , la condición es activa y se satisfará con el signo igual: $H(s) = \alpha$, que dará directamente s , y por tanto:

$$Q = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{CL}{CS}} \quad \text{[PP08]}$$

que es la fórmula del lote económico.

Análogamente, si la limitación es $\frac{y(s)}{Q} \leq \beta$, partiendo de la expresión de K anterior también esta condición será activa y se cumplirá en el mínimo de coste con el signo igual, por lo que empleando como multiplicador de Lagrange $\lambda \cdot D$, tendremos:

$$\begin{aligned} L &= CL \cdot \frac{D}{Q} + CS \cdot \left(s - mL + \frac{Q}{2} \right) + \lambda \cdot D \cdot \frac{y(s)}{Q - \beta} \\ \frac{\partial L}{\partial Q} &= -CL \cdot \frac{D}{Q^2} + \frac{CS}{2} - \lambda \cdot D \cdot \frac{y(s)}{Q} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial s} &= CS - \lambda \cdot D \cdot \frac{H(s)}{Q} = 0 \\ \frac{y(s)}{Q} - \beta &= 0 \end{aligned}$$

de donde:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot CL}{CS \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{\beta}{H(s)} \right]}} = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{[CL + \lambda \cdot y(s)]}{CS}} \quad \text{[PP09]}$$

La última expresión sugiere que el multiplicador de Lagrange λ tiene el significado de un coste de ruptura (para ello hemos tomado inicialmente $\lambda \cdot D$ y no λ); la primera forma de iterar:

$$Q^{(n)} = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot CL}{CS \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{\beta}{H(s^{(n-1)})} \right]}} \quad \text{[PP10]}$$

partiendo de $H(s^{(0)})$ cualquiera, por ejemplo $H(s^{(0)}) = 0,5$, hallamos un valor de $Q^{(0)}$ de la expresión, el que mediante $y(s^{(1)}) = \beta \cdot Q^{(0)}$ nos lleva a uno de $s^{(1)}$ y por tanto uno nuevo de $H(s^{(1)})$, que permite iniciar una nueva iteración, si es preciso.

Si la condición es $TBS \geq \frac{1}{B}$; la condición equivalente es:

$$\frac{D \cdot H(s)}{Q} \leq B$$

por lo que:

$$L = CL \cdot \frac{D}{Q} + CS \cdot \left(s - mL + \frac{Q}{2} \right) + \lambda \cdot \frac{D \cdot H(s)}{Q - \beta}$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = -CL \cdot \frac{D}{Q^2} + \frac{CS}{2} - \lambda \cdot D \cdot \frac{H(s)}{Q^2} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial s} = CS - \lambda \cdot D \cdot \frac{h(s)}{Q^2} = 0$$

$$\frac{D \cdot H(s)}{Q} - B = 0$$

con lo que se llega a unas expresiones semejantes a las anteriores:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot CL}{CS \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot B}{D \cdot h(s)} \right]}} = \sqrt{2 \cdot D \cdot \left[\frac{CL + \lambda \cdot H(s)}{CS} \right]} \quad \text{[PP10]}$$

Aquí λ tiene el significado de coste por rotura independiente de su duración y extensión.

5.2.1.1 Ejemplo

Tomaremos los mismos datos del problema anterior del fabricante textil, pero en lugar de $CD = 1,50 \text{ um}$, adoptaremos:

$$y(s) = 0,001 \cdot Q,$$

por lo que se iniciará la iteración:

$$Q^{(0)} = \sqrt{\frac{2 \times 10.000 \times 70}{0,6 \times \left[1 - \frac{0,002}{0,5}\right]}} = 1.530,5894$$

de ahí:

$$y(s^{(1)}) = 0,001 \times Q^{(0)} = 1,531;$$

$$\Phi(t_H) = \frac{y(s^{(1)})}{40} = 0,0382647,$$

y de las tablas, $t_H = 1,38$ y $H(s^{(1)}) = 0,0848$;

$$Q^{(1)} = \sqrt{\frac{2 \times 10.000 \times 70}{0,6 \times \left[1 - \frac{0,002}{0,0848}\right]}} = 1.545,8635$$

$$y(s^{(2)}) = 1,546; \quad \Phi(t_H) = 0,0386465; \quad t_H = 1,38$$

hemos obtenido la convergencia: $s = 300 + 40 \times 1,38 = 355,2$; de donde:

$$Q^* = 1.546 \quad ; \quad s^* = 356;$$

de aquí podemos obtener el valor del multiplicador de Lagrange:

$$\lambda = CS \cdot \frac{Q}{D \cdot H(s)} = 0,6 \times \frac{1.546}{10.000 \times 0,0848} = 1,093868;$$

que es el coste de ruptura equivalente. Como es menor que el usado antes, 1,5, las rupturas ahora son más importantes y el punto de pedido más bajo.

5.2.2 Calidad de servicio y coste de ruptura simultáneamente

En este caso la restricción de la calidad de servicio sólo será activa si la solución óptima correspondiente al coste de ruptura conduce a una calidad inferior a la solicitada como mínima. Una forma general de tratar el problema consiste en resolverlo según lo indicado

en el apartado 5.1.5.1, determinar la calidad de servicio y comprobar si se cumple la condición. En caso afirmativo los valores hallados de Q y s son los óptimos, en caso contrario debe considerarse que la condición de calidad de servicio se cumplirá en el óptimo con el signo igual (leyes de la demanda continuas) y por tanto aplicar expresiones equivalentes a las vistas en 5.1.5.2.1.

Calidad α

A partir de $H(s) = \alpha$ tenemos s , y por tanto $y(s)$. El valor de Q se determina de la fórmula [PP01]:

$$Q = \sqrt{2 \cdot D \cdot \left(\frac{CL + CD \cdot y(s)}{CS} \right)}$$

Calidad β

Aplicamos directamente la iteración [PP10], iniciándola con el valor de $H(s)$ obtenido como solución de la fase previa con coste de ruptura. En este caso el valor del multiplicador de Laplace λ se compone de CD más un incremento producido por la restricción de calidad de servicio.

Calidad B

Las expresiones a considerar ahora son:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot [CL + CD \cdot y(s)]}{CS - 2 \cdot B \cdot \left(\frac{CS - B \cdot CD}{D \cdot h(s)} \right)}} \quad \text{[PP12]}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot D [CL + CD \cdot y(s) + \lambda \cdot H(s)]}{CS}}$$

5.2.3 Demanda insatisfecha perdida. Coste de ruptura

La modificación más importante respecto al caso anterior consiste en la corrección del stock medio. En efecto, en el caso de que la demanda llegada en ruptura de stock se pierda, las salidas y la demanda ya no coinciden en promedio, las salidas de stock son inferiores, y difieren en la demanda perdida. Podemos escribir:

(salidas medias durante L) =

$$\begin{aligned} & (\text{demanda media durante } L) - (\text{demanda media llegada durante } L \text{ en ruptura de stock}) = \\ & = mL - y(s) \end{aligned}$$

y

$$ss = (\text{punto de pedido}) - (\text{salidas medias durante } L) = s - mL + y(s)$$

por tanto:

$$sm = s - mL + y(s) + \frac{Q}{2}$$

y

$$K(Q, s) = CL \cdot \frac{D}{Q} + CS \cdot \left(s - mL + y(s) + \frac{Q}{2} \right) + CR \cdot D \cdot \frac{y(s)}{Q}$$

habiendo llamado al coste de ruptura CR (PTA/unidad).

Las fórmulas finales son parecidas a las del caso de demanda diferida:

$$Q = \sqrt{2 \cdot D \cdot \left(\frac{CL + CR \cdot y(s)}{CS} \right)} \quad \text{[PP13]}$$

$$H(s) = \frac{CS \cdot Q}{CR \cdot D + CS \cdot Q} \quad \text{[PP14]}$$

que permiten el mismo tipo de procedimientos iterativos.

Los índices de calidad de servicio son:

$$\begin{aligned} \alpha &= H(s) \\ \beta &= \frac{y(s)}{Q + y(s)} \\ TBS &= \frac{Q + y(s)}{D \cdot H(s)} \end{aligned}$$

NOTA : Las aproximaciones adoptadas en este caso son más extensas que en el demanda diferida; en particular hemos despreciado $y(s)$ frente a Q (salvo en las expresiones de β y TBS , pero "a posteriori"). En la expresión de K las dos veces que aparece $\frac{D}{Q}$ deberíamos

escribir $\frac{D}{Q + y(s)}$ pero las dificultades analíticas subsiguientes lo desaconsejan.

5.2.3.1 Ejemplo

Un distribuidor de cerveza utiliza un sistema de gestión por punto de pedido para una marca popular. La demanda semanal es aproximadamente normal de media 800 cajas y desviación tipo 40 cajas. Paga 2,50 um por caja y realiza un beneficio de 1,10 um por cada caja que vende. Su coste fijo de adquisición del cervecero es 50 um por lote y el plazo de entrega es de 2 semanas. Utiliza para contabilizar el coste de posesión una tasa del 20% anual, y estima que la mayoría de las rupturas de stock son pérdidas de ventas. ¿Cuáles deben ser sus parámetros de gestión?

De los datos anteriores tenemos:

$L = 2$ semanas; $h(x)$ ley normal de media $mL = 2 \times 800 = 1.600$ cajas y desviación tipo

$\sigma L = 40 \times \sqrt{2} = 56,568$ cajas

$CR = 1,10$; $CS = 0,20 \times 2,50 = 0,50$; $D = 52 \times 800 = 41.600$ cajas/año.

$$Q = \sqrt{2 \times 41.600 \times \frac{50}{0,5}} = 2.884,44$$

$$H(s) = \frac{2.884,5 \times 0,5}{41.600 \times 1,1 + 2.884,5 \times 0,5} = 0,030554$$

de las tablas: $t_H = 1,87$; $\Phi(1,87) = 0,01194$;

$$y(s) = 56,568 \times 0,01194 = 0,6754$$

$$Q = \sqrt{2 \times 41.600 \times \left(\frac{50 + 1,1 \times 0,6754}{0,5} \right)} = 2.905,79$$

$$H(s) = \frac{2.905,79 \times 0,5}{41.600 \times 1,1 + 2.905,79 \times 0,5} = 0,030773$$

y de las tablas obtendremos de nuevo $t_H = 1,87$, por tanto:

$$s = 1.600 + 1,87 \times 56,568 = 1.705,7821;$$

como conclusión:

$$Q^* = 2.906 \text{ cajas}; \quad s^* = 1.706 \text{ cajas};$$

5.2.3.2 Valor del coste de ruptura

Como hemos hecho en el problema anterior, el coste de ruptura en caso de pérdidas de ventas, dada la estructura de costes del modelo, es igual al rendimiento no obtenido:

$$(\text{precio de venta}) - (\text{precio de compra})$$

más una eventual penalización o si existe (influencia de la ruptura en la imagen, ventas futuras, etc.)

Si la ruptura significa la sustitución del elemento por otro más caro, el coste de ruptura es igual al incremento de precio.

5.2.4 Demanda insatisfecha perdida. Calidad de servicio

Si en lugar del coste de ruptura lo que tenemos es una limitación respecto a la calidad de servicio, la expresión de coste se reducirá a:

$$K(Q, s) = CL \cdot \frac{D}{Q} + CS \cdot \left(s - mL + y(s) + \frac{Q}{2} \right)$$

No existe variación respecto al caso anterior cuando la limitación es:

$$H(s) < \alpha; \quad Q = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{CL}{CS}}$$

Si tenemos $y(s) < \beta' \cdot Q$ (si β es la relación entre la demanda perdida y la demanda total $\beta' = \frac{\beta}{1-\beta}$, aunque para valores pequeños no habrá prácticamente diferencia entre β y β'),

llegaremos a:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot CL}{CS \cdot \left[1 - 2 \cdot \beta' \cdot \frac{1 - H(s)}{H(s)} \right]}} \quad \text{[PP15]}$$

que podemos utilizar como antes.

En caso de coexistencia entre el coste de ruptura y la calidad de servicio procederemos como se ha indicado en 5.1.5.2.3.

5.2.5 Gestión por aprovisionamiento periódico. Coste de ruptura

5.2.5.1 Demanda insatisfecha diferida. Coste de ruptura

También utilizaremos el método heurístico en la determinación de T y S , para lo cual deben cumplirse las siguientes hipótesis:

- 1) El coste de información y control, CI , es independiente de T y S .
- 2) El coste variable de adquisición, CA , es independiente de la cantidad pedida.
- 3) El volumen de la demanda diferida es pequeño. Cuando llega un pedido pueden atenderse todos los diferidos.
- 4) El coste de diferir, CD , es independiente del tiempo.
- 5) El plazo de entrega, si es una variable aleatoria, es tal que los pedidos llegan en el orden en que se cursaron, y los plazos de entrega sucesivos son independientes entre sí.

El aprovisionamiento periódico lleva la posición de stock a la cobertura en los instantes de emisión de la orden (fig. 5.2.5.1).

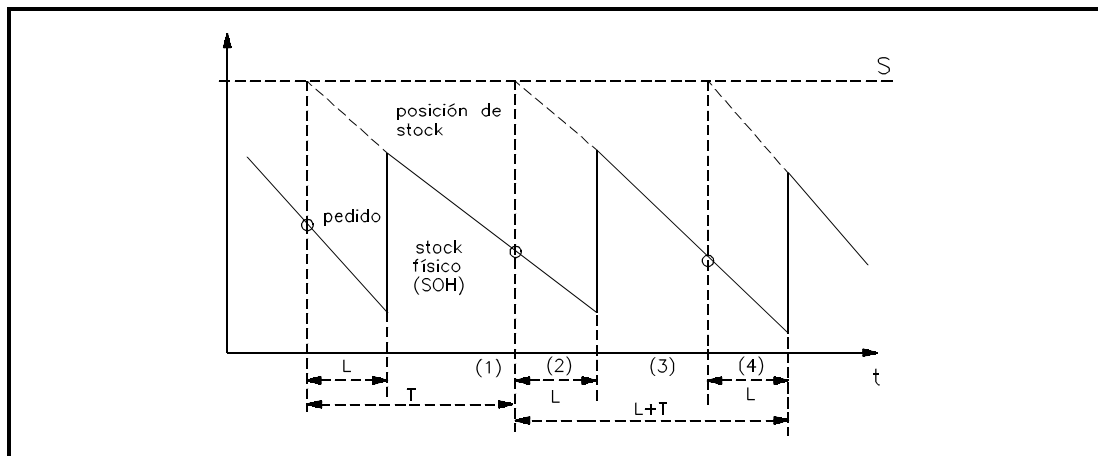


Fig. 5.2.5.1 Gestión por aprovisionamiento periódico

En estas condiciones:

- Coste anual medio de información y lanzamiento:

$$\frac{CL + Cl}{T}$$

- "Stock de seguridad" = "cobertura" - "demanda media durante $T + L$ "

$$ss = S - D \cdot T - mL$$

- "Stock medio":

$$sm = ss + D \cdot \frac{T}{2} = S - mL - D \cdot \frac{T}{2}$$

- Coste anual medio de posesión:

$$CS \cdot \left(S - mL - D \cdot \frac{T}{2} \right)$$

En la gestión por aprovisionamiento periódico juega un papel importantísimo el intervalo de tiempo $T + L$, y la demanda durante el mismo. Obsérvese en la figura que una decisión tomada en (1), un pedido, se recibirá en (2), pero hasta (3) no podrá ordenarse su corrección, que será efectiva en (4); por tanto, cuando en (1) se emite una orden debe estar estructurada de forma que cubra los acontecimientos que van a producirse de (1) a (4), es decir, en un tiempo $L + T$. Aunque L fuese mayor que T el esquema anterior permanecería válido.

El número medio de unidades diferidas por período será:

$$y(S; T) = \int_S^{\infty} (x - S) \cdot h(x; T) \cdot dx$$

donde:

$$h(x; T) = f(x, T+L) \quad \text{si } L \text{ es constante}$$

$$= \int_{Lmin}^{Lmax} f(x, T+1) \cdot g(l) \cdot dl \quad \text{si } L \text{ es aleatoria}$$

Coste anual medio de la demanda diferida:

$$CD \cdot \frac{y(S; T)}{T}$$

de donde el coste anual medio global será:

$$K(S, T) = \frac{CL + CI}{T} + CS \cdot \left(S - mL - D \cdot \frac{T}{2} \right) + CD \cdot \frac{y(S; T)}{T}$$

Si T es un dato (viene fijado exteriormente), la determinación de S es simple. Derivando e igualando a cero:

$$\frac{\partial K}{\partial T} = CS - CD \cdot \frac{H(S; T)}{T} = 0$$

de donde:

$$H(S; T) = CS \cdot \frac{T}{CD}$$

que permite hallar S (el valor corresponde a un mínimo, como puede comprobarse analizando la derivada segunda).

Si T fuese una variable a determinar a partir de K , la vía analítica nos llevaría a anular la derivada de K respecto a T , pero ello entrañaría muchas complicaciones insalvables (salvo para leyes de probabilidad muy simples) ya que la dependencia de $y(S; T)$ de T es compleja. Por tanto, son más adecuadas las vías numéricas, por ejemplo, dando valores a T , calculando su $S^*(T)$ correspondiente mediante las expresiones anteriores y de ahí $K^*(T)$, buscando su mínimo global mediante procedimientos gráficos o iterativos.

Este procedimiento se simplifica al tener en cuenta que T no puede imaginarse como una variable continua que puede tomar cualquier valor; el conjunto de valores posibles de T es lo que denominaríamos valores "razonables" (en la práctica T no puede ser igual a 7,22 días; será 7 u 8 en todo caso).

Un valor de T cercano al "óptimo" será el que proviene de las fórmulas del lote económico, y puede servir para orientar la forma de iniciar la búsqueda:

$$T^{(0)} = \sqrt{2 \cdot \frac{CL + CI}{CS \cdot D}} \quad \text{en el caso continuo}$$

$$[T^{(0)} - u] \cdot T^{(0)} < 2 \cdot \frac{CL + CI}{CS \cdot D} \leq T^{(0)} \cdot [T^{(0)} + u]$$

en el discreto donde u es el intervalo de los valores de T .

Los índices de calidad serán:

$$\alpha = H(S; T)$$

$$\beta = \frac{y(S; T)}{D \cdot T}$$

$$TBS = \frac{1}{T \cdot H(S)}$$

5.2.5.1.1 Ejemplo

Un gran suministrador de componentes electrónicos ha decidido controlar el stock de cierto artículo mediante aprovisionamiento periódico. La demanda media anual es de 500, el plazo de entrega prácticamente constante de tres meses y la demanda durante $(T + L)$ puede representarse mediante una ley normal de media $500 \cdot (T + L)$ y variancia $800 \cdot (T + L)$. La demanda llegada en ruptura de stock se difiere.

El coste de cada unidad es 10 *um*, el de posesión se contabiliza a la tasa de 0,10 anual, el coste de revisión y de pasar pedido es de 15 *um* y el coste de diferir se estima en 30 *um/unidad*.

De lo anterior tenemos:

$$CS = 0,10 \times 10 = 1 ; CD = 30 ; CL + CI = 15 ; L = 0,25 ; mL = 125$$

$$T^{(0)} = \sqrt{\frac{2 \times 15}{500 \times 1}} = 0,245$$

parece que los valores interesantes de T se distribuyen alrededor de los 3 meses. Los cálculos restantes se encuentran en la siguiente tabla (fig. 5.2.5.2).

Por consiguiente al nivel de intervalos considerado el óptimo se obtiene para $T^* = 0,25$ (3 meses), con $S^* = 298$.

T	0,083 (1 mes)	0,166 (2 meses)	0,250 (3 meses)	0,333 (4 meses)
Ley de $T + L$ media	166,66	208,33	250	291,66
desviación tipo	16,33	18,26	20	21,60
$\frac{CS \cdot T}{CD}$	0,002778	0,005556	0,008333	0,011111
t	2,7768	2,5404	2,3945	2,3223
$S^*(T)$	212,01	254,71	297,89	341,83
$y(S^*; T)$	0,0134	0,0323	0,0552	0,0739
$S^* - mL - D \cdot \frac{T}{2}$	66,178	88,046	110,390	133,497
$K^*(T)$	250,998	183,861	177,014	185,146

Fig. 5.2.5.2 Cobertura y coste mínimo asociados a diferentes períodos T

5.2.5.2 Demanda insatisfecha diferida. Calidad de servicio

Si en lugar del coste de diferir tenemos una limitación de la calidad de servicio, la expresión de K será:

$$K(S, T) = \frac{CL + CI}{T} + CS \cdot \left(S - mL - D \cdot \frac{T}{2} \right)$$

Si la limitación es de la forma $H(S; T) < \alpha$, que liga T y S, podemos calcular $K^*(T)$, análogamente al caso anterior, para cada T y elegir el mejor valor:

de $H(S; T) = \alpha$ despejamos $S^*(T)$ en función de T y calculamos $K^*(T)$ a partir de la ecuación de $K(S, T)$.

Si la limitación es de la forma $y(S; T) < \beta \cdot D \cdot T$ quedan ligados análogamente T y S, por lo que se puede proceder como antes.

5.2.5.2.1 Caso de la ley normal

Supongamos que:

$$h(x; T) \text{ sigue una ley normal de media } D \cdot (T + L)$$

$$\text{desviación tipo } \sigma \cdot \sqrt{T + L}$$

de donde:

$$S = D \cdot (T + L) + t_H \cdot \sigma \cdot \sqrt{T + L}$$

$$y(S; T) = \sigma \cdot \sqrt{T + L} \cdot \Phi(t_H)$$

Si la limitación es $H(S; T) \leq \alpha$, entonces

$$S = D \cdot (T + L) + t_\alpha \cdot \sigma \cdot \sqrt{T + L}$$

donde t_α se obtiene de las tablas de la ley normal. Por consiguiente si T es variable:

$$\frac{\partial S}{\partial T} = D + t_\alpha \cdot \sigma \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T + L}}$$

Por otra parte la expresión del coste será:

$$K = \frac{CL + CI}{T} + CS \cdot \left[S - mL - D \cdot \frac{T}{2} \right]$$

y derivando e igualando a cero:

$$\frac{\partial K}{\partial T} = -\frac{CL + CI}{T^2} + CS \cdot \left[\frac{\partial S}{\partial T} - \frac{D}{2} \right] = 0$$

por tanto:

$$\frac{CL + CI}{T^2} = CS \cdot \left[D + t_\alpha \cdot \sigma \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T + L}} - \frac{D}{2} \right] = \frac{CS}{2} \cdot \left[D + \frac{t_\alpha \cdot \sigma}{\sqrt{T + L}} \right]$$

de donde podemos obtener:

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot (CL + CI)}{CS \cdot D} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t_\alpha \cdot \sigma}{D \cdot \sqrt{T + L}}}}$$

soluble por iteración partiendo de:

$$T^{(0)} = \sqrt{2 \cdot \frac{CL + CI}{CS \cdot D}}$$

5.2.5.3 Demanda insatisfecha perdida. Coste de ruptura

Las modificaciones respecto a lo anterior también se centran en la cuantía del stock medio, que ahora aparece con el término $y(S;T)$. Por tanto, el coste global será:

$$K(S, T) = \frac{CL + CI}{T} + CS \cdot \left(S - mL + y(S; T) - D \cdot \frac{T}{2} \right) + CR \cdot \frac{y(S; T)}{T}$$

y considerando T conocido y derivando respecto a S obtendremos:

$$H(S; T) = CS \cdot \frac{T}{CR + CS \cdot T}$$

expresión que permite efectuar los mismos cálculos que en 5.1.6.1.

Los índices de calidad de servicio son los mismos que en 5.1.6.1.

5.2.5.3.1 Ejemplo

La demanda semanal de cierto artículo sigue una ley exponencial de media 10. Cada semana se hace revisión y se pide hasta una cobertura. El plazo de entrega es de una semana. El coste de revisión y de pasar el pedido es de 500 um, el artículo cuesta 200 um/unidad y el coste de posesión anual se obtiene a la tasa de 0,26. La demanda llegada en ruptura de stock se pierde, y el coste de ruptura es de 49 um por unidad dejada de vender. ¿Cuál debe ser el nivel de cobertura, S ?

De lo anterior tenemos:

$T + L = 2$ semanas; $h(x;T) = 0,1 \cdot (0,1 \cdot x) \cdot e^{-0,1 \cdot x}$; $mL = 20$;

$$H(S) = \frac{0,26 \cdot \frac{200}{52}}{49 + 0,26 \cdot \frac{200}{52}} = 0,02$$

$$H(S; T) = \int_S^{\infty} a \cdot (a \cdot x) \cdot e^{-a \cdot x} \cdot dx = (a \cdot S + 1) \cdot e^{-a \cdot S}$$

$$y(S; T) = \int_S^{\infty} (x - S) \cdot a \cdot (a \cdot x) \cdot e^{-a \cdot x} \cdot dx = \left(S + \frac{2}{a} \right) \cdot e^{-a \cdot S}$$

de donde:

$$0,02 = (0,1 \cdot S + 1) \cdot e^{-0,1 \cdot S} \quad \text{llamando } 0,1 \cdot S = z$$

$$e^z = \frac{1+z}{0,02} = 50 \cdot (1+z)$$

iterando (fig. 5.2.5.3)

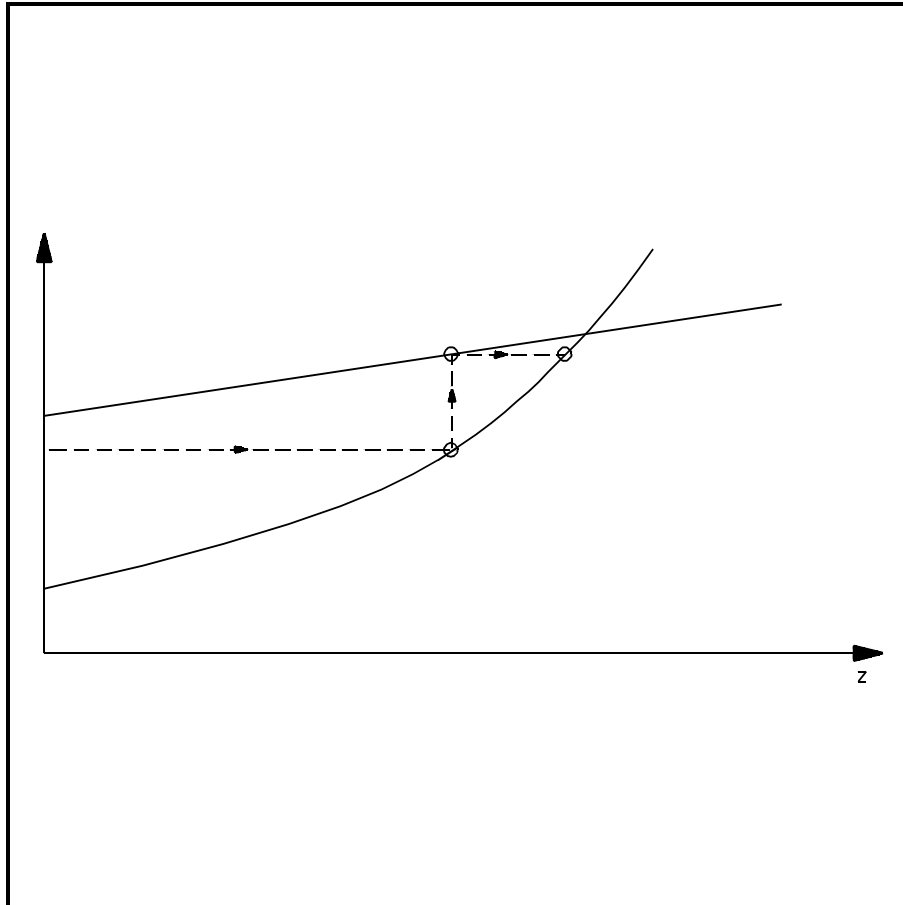


Fig. 5.2.5.3 Esquema iterativo de aproximación a la solución

$$z_0 = 0 \quad ; \quad e^{z_1} = 50 \cdot (1 + z_0) = 50$$

$$z_1 = 3,91 \quad ; \quad e^{z_2} = 245,60$$

$$z_2 = 5,50 \quad ; \quad e^{z_3} = 325,19$$

$$z_3 = 5,78 ; e^{z_4} = 339,22$$

$$z_4 = 5,83 ; e^{z_5} = 341,33$$

$$z_5 = 5,83 ; S^* = 58,3$$

$$y(s^*; T) = (58,3 + 20) \cdot e^{-5,83} = 0,2294$$

5.2.5.4 Demanda insatisfecha perdida. Calidad de servicio

No existe diferencia alguna respecto a 5.2.5.2.

5.2.5.4.1 Caso de la ley normal

La expresión final en este caso será:

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot (CL + CI)}{CS \cdot D} \cdot \frac{1}{1 + [t_\alpha + \Phi(t_\alpha)] \cdot \frac{\sigma}{D \cdot \sqrt{T+L}}}}$$

5.2.6 Métodos *just-in-time*

5.2.6.1 Introducción

En los últimos 40 años los productos japoneses, que eran considerados inicialmente imitaciones baratas y de baja calidad de productos occidentales, han ido ocupando puestos en el mercado compitiendo, a veces con ventaja, con otros productos de sectores industriales tradicionalmente tenidos por típicamente occidentales: la electrónica, la óptica, el automóvil, etc. No sólo la originalidad y la calidad han participado en este éxito sino también la contención de precios, hecho que puede resultar sorprendente dada la carencia de materias primas y de energía del Japón y su relativo alejamiento de los mercados, lo que implica sobrecostos de transporte, lo que sólo es explicable por una elevada eficiencia productiva.

Los sistemas productivos japoneses debieron ser reconstruidos después de la guerra durante la ocupación americana siguiendo pautas occidentales, con soporte y asesoría de

renombrados especialistas americanos como Deming y Juran, pero posteriormente han evolucionado en forma original. Existen características sociales específicas del Japón y tal vez el nivel de automatización de las empresas japonesas sea diferencial, pero ello no basta para explicar dicha eficiencia. Hay que incluir entre las causas de la misma las técnicas de gestión de producción, especialmente de la gestión de materiales, y, posiblemente, la concepción misma de la actividad productiva.

El racionalismo occidental ha buscado una formalización de los procedimientos a que se debe el éxito industrial japonés, lo que ha dado lugar en estos últimos años a una bibliografía abundante. Ello nos hace temer que la descripción que sigue sea una interpretación de la filosofía productiva japonesa elaborada, en gran parte, con mentalidad occidental, ya que durante los años de evolución del sistema productivo los japoneses se dedicaron a hacer y no a formalizar lo que estaban haciendo. La razón última de la inclusión de este tema en este capítulo se basa en el objetivo declarado de cualquier programa JIT consistente en la eliminación, o por lo menos reducción, de los stocks, aunque como podrá apreciarse la filosofía JIT desborda ampliamente el marco de la gestión de stocks.

5.2.6.2 El sistema productivo de TOYOTA (JIT)

Los grandes fabricantes japoneses, y especialmente Toyota, han desarrollado una concepción original del funcionamiento de los sistemas productivos, no sólo a través de aspectos ligados a la planificación y control de los mismos, sino, y más fundamentalmente, mediante una revisión crítica del propio diseño del sistema. Suele denominarse sistema JIT o "justo-a-tiempo" a dicha concepción, lo que de hecho representa utilizar el nombre, ciertamente sonoro, de una parte del sistema global para el todo. En cualquier caso nos amoldaremos a dicha costumbre.

Una forma utilizada por Toyota para definir la motivación de su enfoque sobre el diseño y la gestión del sistema productivo se centra en las frases:

- "reducción de costes por eliminación despiadada de todo despilfarro",
- "utilización al máximo de las capacidades de los operarios y no sólo de sus manos",

con el sobreentendido de que alcanzar plenamente la meta marcada exige un esfuerzo continuado que no tiene fin.

Toyota distingue 7 grandes grupos de ineficiencias o despilfarros:

1. debidos a SOBREPRODUCCIÓN

- A. TODO DESPILFARRO, AQUELLO QUE NO AÑADE VALOR AL PRODUCTO O SERVICIO DEBE ELIMINARSE. EL VALOR ES ALGO QUE AUMENTA LA UTILIDAD PARA EL CLIENTE DEL PRODUCTO O SERVICIO, O LE REDUCE SU COSTE.
- B. EL STOCK ES UN DESPILFARRO. ESCONDE PROBLEMAS QUE DEBERIAN RESOLVERSE EN LUGAR DE TAPARSE. EL DESPILFARRO PUEDE ELIMINARSE GRADUALMENTE QUITANDO PEQUEÑAS CANTIDADES DE STOCK DEL SISTEMA, RESOLVIENDO LOS PROBLEMAS QUE EMERGEN, Y VOLVIENDO A QUITAR UN POCO DE STOCK.
- C. PARA MANTENER ALTA CALIDAD Y BAJO COSTE EN UNA LÍNEA DE PRODUCTOS CON DIFERENCIACIÓN CRECIENTE ES ESENCIAL UNA FLEXIBILIDAD PRODUCTIVA, INCLUYENDO RÁPIDA RESPUESTA A PETICIONES DE ENTREGA, CAMBIOS DE DISEÑO Y CAMBIOS DE CANTIDAD/MIX.
- D. LA DEFINICIÓN DE CALIDAD DEL CLIENTE Y SUS CRITERIOS PARA EVALUAR EL PRODUCTO DEBEN ORIENTAR EL DISEÑO DE LOS PRODUCTOS Y LA MANERA DE FABRICARLOS. ESTO IMPLICA UNA TENDENCIA HACIA PRODUCTOS AMPLIAMENTE PERSONALIZADOS.
- E. SE PRECISA UN TRABAJO EN EQUIPO PARA ALCANZAR UNA CAPACIDAD DE FABRICACION *WORLD CLASS*. LA DIRECCIÓN, LOS EJECUTIVOS Y LOS TRABAJADORES DEBEN PARTICIPAR. ESTO IMPLICA UN INCREMENTO DE LA FLEXIBILIDAD, RESPONSABILIDAD Y AUTORIDAD ASIGNADAS AL OBRERO.
- F. EL EMPLEADO QUE REALIZA UNA TAREA FRECUENTEMENTE ES LA MEJOR FUENTE DE SUGERENCIAS DE MEJORA DE LA OPERACIÓN. ES IMPORTANTE QUE LOS OBREROS TRABAJEN CON SU CEREBRO Y NO ÚNICAMENTE CON SUS MANOS.
- G. DEBE EXISTIR UN GRAN RESPETO Y APOYO MUTUOS ENTRE LA ORGANIZACIÓN, SUS EMPLEADOS, SUS PROVEEDORES Y SUS CLIENTES, BASADOS EN LA TRANSPARENCIA Y EN LA BUENA FE.
- H. EL VIAJE DEL JIT NO TIENE TÉRMINO, NUNCA ACABA, PERO EN EL CAMINO SE ALCANZAN SUBSTANCIOSOS HITOS Y SE RECORREN TRAMOS MUY FRUCTÍFEROS.

Fig. 5.2.6.1 Filosofía del JIT (Fuente: Fogarty, Blackstone, Hoffmann)

2. debidos a TIEMPOS MUERTOS
3. debidos a TRANSPORTES
4. debidos a PROCESOS INADECUADOS
5. debidos a STOCKS
6. debidos a MOVIMIENTOS IMPRODUCTIVOS
7. debidos a PRODUCTOS DEFECTUOSOS

De todos ellos considera que el más pernicioso es el debido a los stocks, pues éstos sirven para ocultar la existencia de los otros despilfarros y problemas (fig. 5.2.6.2). Sin dejar de comprender lo adecuado de este juicio, podemos encontrar razones suplementarias.

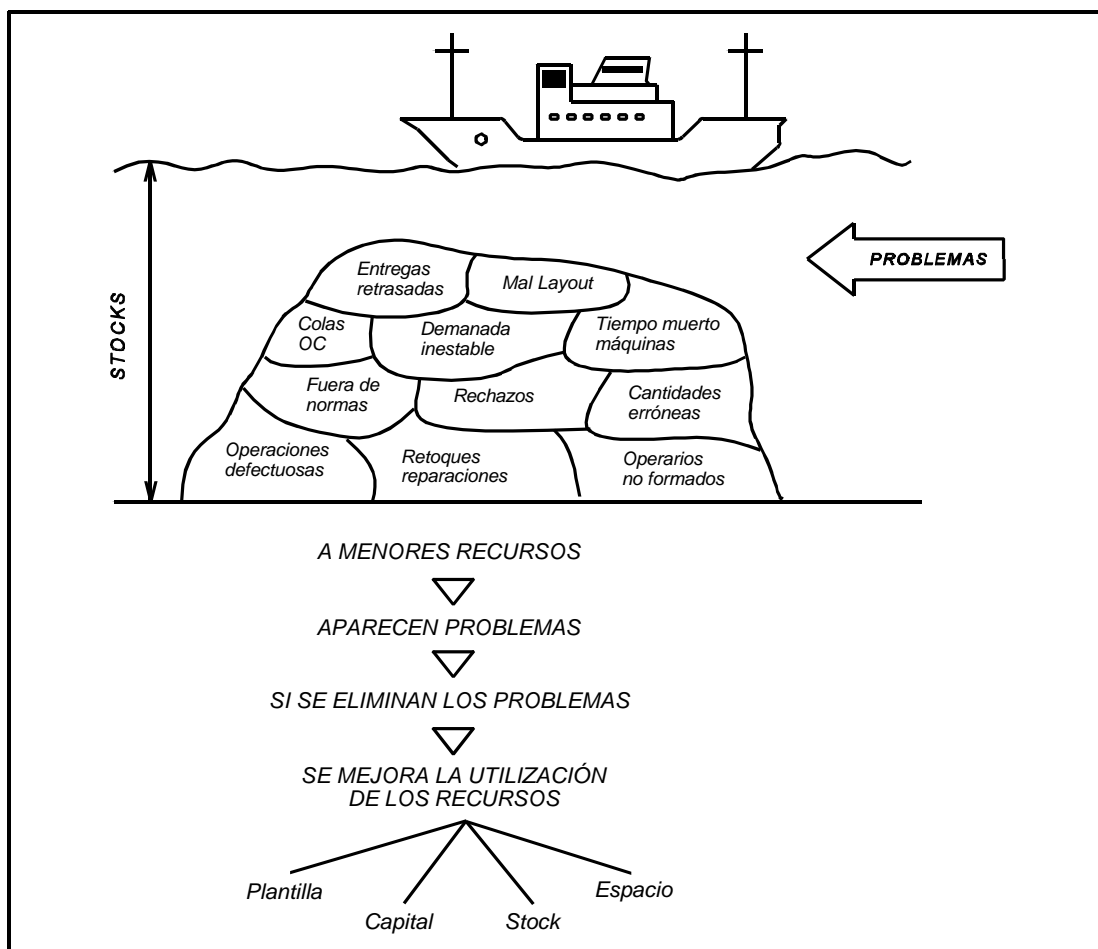


Fig. 5.2.6.2 La existencia de problemas no resueltos en el sistema productivo exige la existencia de stock

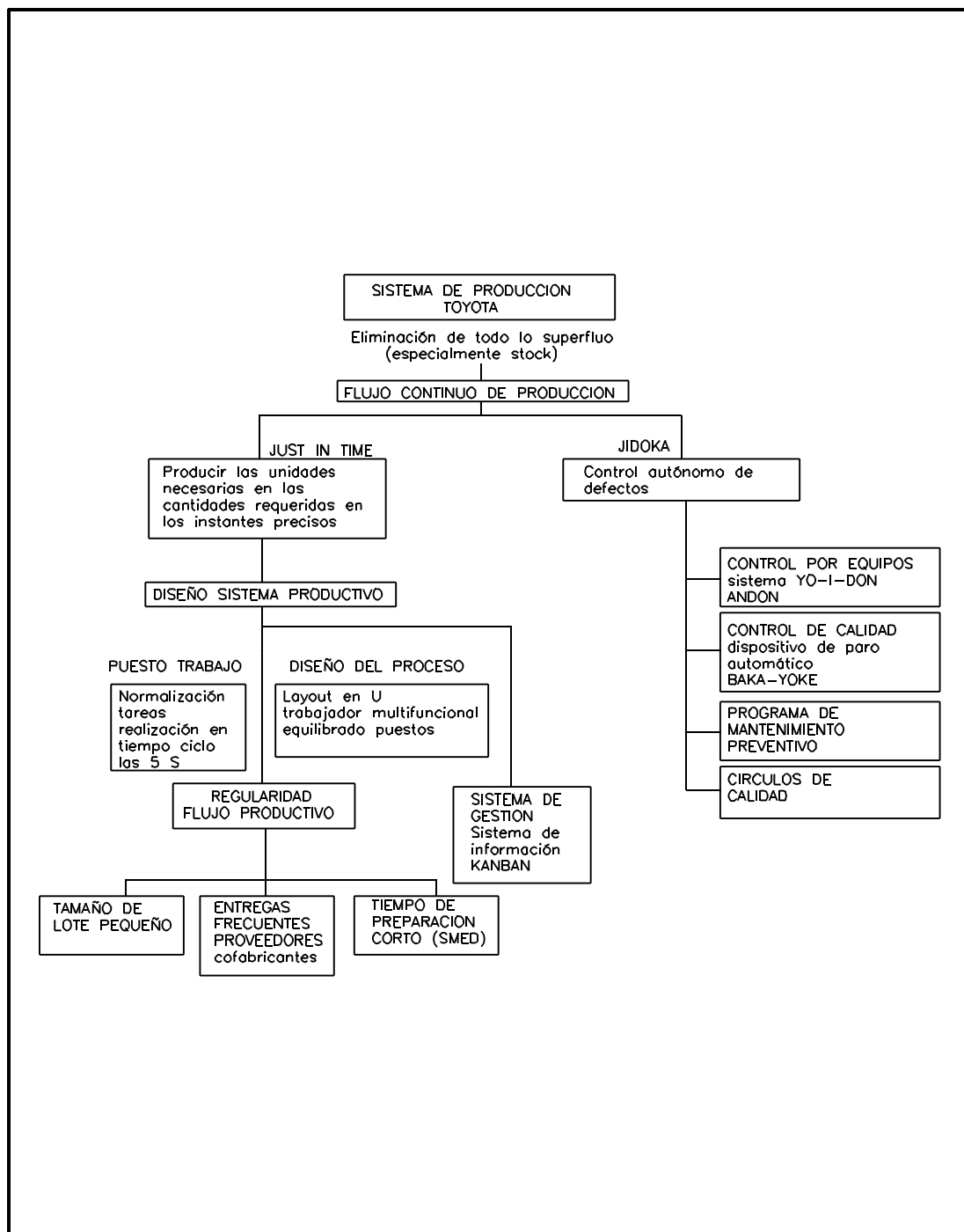


Fig. 5.2.6.3 Sistema productivo de Toyota basado en Yasuhiro Monden (Industrial Engineering, Vol. 13, No. 1, 1981)

- A. AMPLIO EMPLEO DE PROCESOS DE FLUJO SECUENCIAL TALES COMO LÍNEAS DE MONTAJE ESPECIALIZADAS Y CÉLULAS DE TECNOLOGÍA DE GRUPOS.
- B. CRECIENTE FLEXIBILIDAD Y CAPACIDAD DEL EQUIPO.
- C. FOMENTO Y APROVECHAMIENTO DE OPERARIOS MULTIFUNCIONALES.
- D. REDUCCIÓN DE TIEMPOS DE PREPARACIÓN PARA LOGRAR TAMAÑOS MÁS PEQUEÑOS DE LOS LOTES DE PRODUCCIÓN
- E. UTILIZACIÓN EXTENSA DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO.
- F. PROGRAMAS DE INTEGRACIÓN Y PARTICIPACIÓN DE LOS EMPLEADOS TALES COMO LOS CÍRCULOS DE CALIDAD.
- G. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS (SPC)
- H. PRERROGATIVA DE PARAR LA PRODUCCIÓN.
- I. ANÁLISIS CAUSA/EFECTO
- J. FORMALIZACIÓN, ESTABILIDAD Y CONSISTENCIA EN LA PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN.
- K. ACUERDOS CON LOS PROVEEDORES A LARGO PLAZO.
- L. ENTREGAS FRECUENTES DE LOS PROVEEDORES.
- M. SOPORTE TÉCNICO INTENSO DE LOS PROVEEDORES.

Fig. 5.2.6.4 Técnicas del JIT (Fuente: Fogarty, Blackstone, Hoffmann)

Japón tiene una extensión del orden del 75% de España con el triple de habitantes, y sólo el 16% del territorio es cultivable debido a lo accidentado del terreno. Es notable la extraordinaria densidad humana de las ciudades, así como el reducido tamaño de las viviendas. Existen pocos terrenos llanos disponibles y consecuentemente los terrenos aptos para la instalación de fábricas son escasos y, por tanto, caros, lo que obliga a buscar la optimización del espacio en las fábricas japonesas. En este contexto los stocks y la obra en curso son muy costosos, no sólo porque como en todas partes hay que financiarlos sino

porque, además, no caben, ocupan unos metros cuadrados de los talleres o de los almacenes que son unos bienes extremadamente raros. No es extraño que, en estas circunstancias, exista una obsesión para reducir los stocks y la obra en curso.

Por otra parte, la función de los stocks como amortiguadores de problemas es bien conocida. Recuérdese la explicación de Ramboz sobre las razones de la existencia de un stock (apartado 5.1.1.1); cada vez que no es posible garantizar la identidad de las tasas instantáneas de suministro y consumo de un artículo se suele utilizar el expediente de favorecer la aparición del stock entre el subsistema suministrador y el subsistema consumidor; así se evita la propagación de las incidencias fuera del subsistema en donde éstas se producen y se favorece un funcionamiento regular (dentro de ciertos límites) de ambos subsistemas así independizados. Cada subsistema trabaja a su ritmo propio y el stock sirve de elemento de amortiguamiento transformando el flujo de suministro en el flujo de consumo.

La idea del sistema Toyota es eliminar los despilfarros, especialmente los stocks, creando un flujo continuo de producción, es decir, producir los artículos necesarios, en la cantidad necesaria, en el instante preciso y con calidad 100 %. Según Yasuhiro Monden, para poder mantener este flujo continuo de producción, de artículos correctamente elaborados, se apoya en dos ideas claras: el *Just-in-Time* (JIT) y el *Jidoka*, tal como se observa en la figura 5.2.6.3. (Inicialmente Monden, que aparentemente dominaba poco el inglés en aquel tiempo, denominó a éste último "autonomación"; la autonomación se refiere esencialmente a un nivel de automatización en el que las máquinas pueden trabajar sin la supervisión constante del operario ya que en caso de incidente pasan a un régimen de funcionamiento degradado o incluso se paran; el *Jidoka*, tal como aparece en la figura 5.2.6.3, presupone otros aspectos además de la autonomación).

Un flujo continuo de producción permite trabajar sin stocks intermedios, y la eliminación de los stocks obliga consecuentemente a la eliminación previa de los problemas o despilfarros que ocultaban (si no el funcionamiento es imposible) y por tanto a la sincronización de las tasas instantáneas en todos los subsistemas conectados.

5.2.6.2.1 Procedimientos para la reducción de stocks

Si consideramos un procedimiento tradicional de planificación y control de la producción (entre los que incluimos MRP), vemos que su finalidad consiste en gobernar los flujos de materiales y equilibrar la carga y la capacidad, lo que en ciertas situaciones resulta muy difícil dada la complejidad del problema: habitualmente dichos procedimientos presuponen que el sistema productivo es el que es, y por consiguiente que muchos de los condicionantes que complican los procedimientos son inamovibles. JIT pretende incidir

sobre estos condicionantes, confesadamente para reducir stocks, pero consecuentemente se produce una simplificación de los flujos de materiales y en definitiva de los problemas que dificultan la gestión.

Razonablemente si pretendemos como objetivo principal la reducción de los stocks estaremos abocados directamente a estudiar varios temas. En primer lugar nos interesará conocer cuál es el nivel mínimo imaginable de stock y obra en curso y por qué. A continuación deberemos conocer las razones que hacen que trabajemos con niveles de stock superiores.

El nivel mínimo teórico de stock y obra en curso es el que corresponde al plazo de fabricación (*lead time*) de los productos elaborados por la empresa. Este plazo de fabricación comprende:

- tiempos de proceso, incluyendo preparaciones (útiles),
- tiempos de tránsito (inútiles),
- tiempos de cola (inútiles),

Por encima de este nivel mínimo llevan a tener más stock las siguientes razones:

- la lotificación (por reagrupación de necesidades) en el lanzamiento o en el aprovisionamiento; para conseguir cantidades llamadas "económicas",
- las incertidumbres sobre la demanda, la tasa de rechazos, los plazos de fabricación y de aprovisionamiento, cubiertas mediante "stocks de seguridad",
- los ajustes entre la carga y la capacidad, que conducen a "adelantar" ciertas elaboraciones.

El enfoque de los industriales japoneses, y más particularmente de Toyota, es muy simple y pragmático: para eliminar el máximo de stocks y de obra en curso deben eliminarse las causas que llevan a tener un stock superior al mínimo teórico, y además deben tomarse las medidas oportunas para reducir dicho mínimo, utilizando todos los resortes disponibles.

Medios para reducir el stock mínimo teórico

Para reducir el nivel mínimo teórico del stock y de la obra en curso es preciso reducir el ciclo de fabricación, y para ello eliminar al máximo todos los plazos no directamente indispensables, y en particular las esperas y los tiempos de tránsito. Ello conduce a estudiar y realizar una reimplantación de los talleres.

El procedimiento consiste en agrupar en familias tecnológicas las piezas cuyo modo de fabricación presente similitudes (ciclos o partes de ciclos análogos o parecidos) y después

constituir células reagrupando y acercando las máquinas que permiten efectuar las operaciones sucesivas de una misma familia de ciclos correspondientes a una familia tecnológica de piezas. Las máquinas de una célula se disponen en forma de "U", muy próximas entre sí, eliminando espacios inter-máquinas donde disponer stocks intermedios, que ahora son inexistentes. Cada operario es capaz de manejar tres tipos de máquinas al mismo tiempo, y lo hace si es necesario, moviendo el lote de piezas sobre el que trabaja, idealmente una unidad, de una máquina a otra de la célula. Este concepto se conoce como *multi-process holding*, y el operario multifuncional (*multi-function worker*) es la evolución natural del operario clásico. Además de la extensión de su competencia técnica, el operario también recibe una extensión de sus funciones, con lo que asume responsabilidades en calidad, preparación y mantenimiento (habitualmente dependientes de otras líneas funcionales en las fábricas occidentales).

La nueva disposición ayuda a la eliminación de stock entre procesos, puesto que no cabe, y aumenta la productividad y la motivación de los obreros. Permite la creación de grupos de trabajo y que se establezca cooperación (ayuda) entre operarios en el transcurso del trabajo (filosofía *yô-i-don*). Para apoyar esta cooperación existe un tablero luminoso *Andon* situado en alto para que sea fácil de ver; cuando algún operario precisa ayuda para eliminar el retraso en una tarea enciende una luz amarilla en el *Andon*; si necesita que la línea se pare para corregir algún problema con sus máquinas, enciende la luz roja.

Este nuevo trabajador multifuncional sintoniza con el entorno socio-cultural (elevado nivel educativo de la plantilla obrera de las grandes empresas), el carácter propio japonés y las características de los sindicatos. Estas circunstancias, que en principio podrían dificultar su implantación en otros entornos, no han sido definitivas, habiéndose efectuado ya implantaciones válidas en otros países, si bien ha sido necesaria una actuación muy definida en nuevas formas de organización, fundamentalmente en el campo de los grupos de trabajo.

De esta forma se ha eliminado una parte significativa de los stocks dentro de los talleres y se han reducido sensiblemente los tiempos de tránsito y de espera.

A partir de esta situación, células multi-técnicas capaces de producir las diferentes piezas de una o varias familias tecnológicas, es posible automatizar las transferencias de piezas entre las diferentes máquinas de una misma célula, automatizar dichas máquinas, y obtener entonces una célula flexible de fabricación.

Este enfoque funciona tanto mejor cuanto más reducida es la gama de productos del catálogo comercial que las fábricas producen. Esto lleva a algunas empresas japonesas a constituir unidades de producción (UP) más reducidas, siendo el tamaño que parece óptimo situado alrededor de las 750 personas.

Esta especialización de las UP, que parece redescubierta también en los Estados Unidos (*focused factory*), además de favorecer la constitución de células, disminuye la complejidad de la gestión, lo que permite reducir los servicios administrativos de fabricación y devolver todas las responsabilidades del taller a los mandos.

Medios para reducir el stock complementario

Como se ha indicado las dos causas que llevan a tener un stock superior al mínimo indispensable se centran en la lotificación y en la incertidumbre. Atacaremos separadamente ambas.

Reducción del stock inducido por la lotificación

El enfoque japonés no ha sido el de calcular pasivamente el tamaño de lotes "económicos" mediante fórmulas (como la de Wilson o EOQ) que "optimizan" estas reagrupaciones, sino intentar reducirlos actuando activamente sobre los factores que llevan a ellos: esencialmente el tiempo de preparación (lo que tal vez signifique cierta "aceptación" del contenido de las fórmulas). Se han realizado reducciones, algunas veces espectaculares, sobre todo en la industria del automóvil, del tiempo de cambio de herramientas y matrices, y de preparación; la mayoría de las veces estas operaciones las realiza el propio operario.

El sistema Toyota supone y exige que el tiempo, y por tanto los costes de preparación (cambio de un artículo a otro), se reduzcan al mínimo (sistema SMED: *Single Minute Exchange Die*). Shigeo Shingo lo explica así:

" En 1970 visité el taller de carrocerías de la planta principal de Toyota Motors. La dirección había pedido al directos de división Sr. Sigiura que redujera al 50% el tiempo de preparación, que era de 4 horas, de una prensa Scheoler de 1.000 toneladas. Aparentemente habían sabido que Volkswagen estaba empleando justamente 2 horas en una prensa idéntica. Hice dos sugerencias: primero distinguir claramente entre las operaciones internas (a prensa parada) y externas (a prensa en marcha); segundo mejorar las operaciones de ambas categorías. En un período de seis meses los tiempos de preparación (a máquina parada) se habían reducido a hora y media.

Sin embargo cuando volví algunos meses después Sigiura me dijo que la dirección quería ahora reducir los tiempos de preparación a *tres minutos*. Quedé desconcertado un momento pero recordé una experiencia anterior en el astillero Mitsubishi; ¿por qué no transformar el tiempo de preparación exterior en interior? Un cierto número de ideas se me ocurrieron en rápida sucesión y sin perder tiempo anoté ocho técnicas basadas en dicho principio en una pizarra de una sala de conferencias. El nuevo método nos permitió alcanzar el objetivo de tres minutos en pocos meses."

Preguntado Taichi Ohno, vicepresidente de Producción de Toyota por la razón de esta directriz sobre la reducción tan considerable del tiempo de producción indicó que además de la repercusión favorable sobre el tamaño del lote, un tiempo de preparación del orden de minutos conducía a un incremento considerable de flexibilidad, por cuanto cualquier incidencia que llevase al agotamiento prematuro de las piezas podía quedar subsanada en un plazo muy corto. Según Shigeo Shingo las ocho técnicas fundamentales del método SMED son:

- Técnica 1 - Separar las operaciones de preparación internas de las externas,
- Técnica 2 - Convertir preparación interna en externa,
- Técnica 3 - Estandarizar la función, no la forma,
- Técnica 4 - Utilizar mordazas funcionales o eliminar los cierres completamente,
- Técnica 5 - Utilizar plantillas intermedias,
- Técnica 6 - Adoptar modos de operación paralela,
- Técnica 7 - Eliminar ajustes,
- Técnica 8 - Mecanización.

Estas ocho técnicas no dejan de recordarnos los procedimientos clásicos de mejora de métodos de trabajo.

Los proveedores son instruidos para realizar entregas frecuentes de cantidades reducidas, depositándolas junto al punto de utilización o consumo. Ello obliga a revisar toda la logística de transportes y entregas.

Reducción del stock de seguridad inducido por la incertidumbre sobre la tasa de rechazos

El objetivo consiste en suprimir esta incertidumbre y por consiguiente el stock de seguridad consiguiendo produciendo piezas buenas al 100% en todas las fases del proceso productivo. Para llegar a ello se hace responsable a cada obrero de la calidad, y por tanto del control de calidad de su producción dotando a cada puesto de trabajo de los medios de control, automatizados de preferencia, y permitiendo a cualquier obrero parar el proceso de fabricación en caso de problema que señala inmediatamente a los mandos encendiendo una lámpara roja en el Andon encima de su puesto de trabajo. Mediante dispositivos apropiados que impiden cometer equivocaciones usuales se eliminan obstáculos a la obtención de producción sin rechazos. Estos dispositivos se conocen con el nombre "*bakayoke* (a prueba de imbéciles) o *pokayoke* (a prueba de errores), que resulta menos peyorativo.

Finalmente un control y mantenimiento preventivo sistemático de las instalaciones contribuyen a este objetivo. Para evitar averías los japoneses evitan la utilización anormal de las máquinas, e incluso la sobrecarga de las mismas. Se adiestra a los operarios para

que al iniciar la jornada efectúen una revisión de las máquinas e instalaciones (mantenimiento preventivo simple). En muchos casos si se produce una avería menor en el transcurso de la jornada el operario es capaz de repararla él mismo.

Reducción del stock de seguridad inducido por la incertidumbre sobre la demanda y el ajuste carga-capacidad

En el mundo occidental existe la costumbre de atacar estos problemas a través de un stock. El enfoque japonés consiste, al contrario, en adaptar el sistema productivo y por tanto la capacidad a las variaciones de la demanda, lo que implica una gran flexibilidad de dicho sistema y en particular de la mano de obra, que puede verse desplazada de un puesto de trabajo a otro (de aquí la importancia del operario multifuncional) y cuyo horario de trabajo puede variar en función de la carga. Naturalmente, esto sólo puede funcionar si las variaciones a que nos referimos no son demasiado grandes.

Reducción del stock de seguridad inducido por la incertidumbre sobre los plazos de fabricación y de aprovisionamiento

También aquí el enfoque consiste en suprimir este tipo de incertidumbre consiguiendo de los talleres y de los proveedores un respeto absoluto de los plazos previstos. Téngase en cuenta que la limitación al máximo del tamaño de los lotes económicos, el entretenimiento preventivo y la flexibilidad del sistema productivo a que hemos hecho alusión con anterioridad, contribuyen grandemente a hacerlo posible.

Todas las tareas están normalizadas y existe una descripción escrita de las mismas que pueden ver todos los operarios, la cual contiene los siguientes elementos: el tiempo de ciclo, la ruta de operaciones y la cantidad estándar de obra en curso.

Los cambios de tasas de producción inducen un reequilibrado constante de las células de fabricación, que en la mayoría de los casos realiza el encargado.

5.2.6.3 Gestión de la producción en contexto JIT

Los procedimientos descritos anteriormente ponen las bases para lograr un flujo continuo de producción simplificando notablemente la estructura de dicho flujo. Se disminuye por consiguiente el nivel de stock, no sólo en los almacenes sino también en la obra en curso, al reducir los plazos de fabricación. Los costes de almacenamiento son menores, y además se reduce la inversión en stock, aumentando la tasa de rotación, lo que posee apreciables ventajas.

El sistema de gestión posee un subsistema de información denominado sistema Kanban. El nombre de Kanban es el que reciben unas tarjetas (normalmente situada dentro de una cubierta rectangular de vinilo) que sirven para transmitir la información sobre consumo y demanda de componentes (aparentemente *Kanban* es la yuxtaposición de dos palabras japonesas que significan señal- visible; una tarjeta es una señal-visible, pero caben otros soportes para dicho fin). Dichas tarjetas tratan de establecer un seguimiento cuidadoso y permanente de la actividad productiva que permita una toma de decisiones en la ejecución acorde con los principios establecidos.

En la gestión de los sistemas de producción hay dos factores críticos:

- la variabilidad de la demanda, generalmente muy oscilante,
- la variabilidad inducida en los flujos de materiales que a su vez producen oscilaciones en la carga de los recursos y conducen a la necesidad de controlar los desfases temporales, con la consiguiente fijación de las prioridades en el trabajo,

y el sistema Kanban trata de resolver dicha problemática mediante una vigilancia atenta y permanente para autorizar y controlar la actividad (tarjetas Kanban), y un control de los ritmos de trabajo, acompañado de una intervención constante de obreros y mandos (nuevas formas de organización).

Si bien los procedimientos de gestión productiva, y particularmente el Kanban, son fundamentales para el funcionamiento de los sistemas de producción a la japonesa, no son suficientes para alcanzar buenos resultados. Como ya hemos indicado es necesaria la actuación en diversos campos que eliminan ciertos condicionantes; dicha actuación trasciende de la gestión de operaciones estrictamente, pues está centrada en el diseño del sistema productivo. Todos los resortes deben ponerse a punto para hacer posible el suavizado del flujo de producción.

La regularidad de la producción es la condición más importante para alcanzar el JIT y tal vez la que distingue más la forma de producir japonesa de las demás. Si el sistema físico la permite, lo único que debe procurar el sistema de gestión es alcanzarla y mantenerla.

Lamentablemente en la mayoría de los textos (japoneses o no) que tratan del JIT los aspectos gestionales de fondo son obviados, y aparecen sólo algunos anecdóticos (como pueden ser las mismas tarjetas Kanban). Nuestra descripción de los aspectos gestionales del sistema JIT será forzosamente esquemática, y la estructuraremos en: planificación, cálculo de necesidades y programación, ejecución y control.

5.2.6.3.1 Planificación

No parece existir diferencia a este nivel entre el sistema JIT y cualquier otro tradicional; en

esta etapa se pretende definir el plan maestro de producción. El sistema JIT suele aplicarse más cómodamente a la fabricación de grandes series relativamente estables en las que el plan maestro se expresará en tasas diarias (y mensuales) de cada producto acabado. Dichas tasas se mantendrán lo más constantes posibles dentro de amplios períodos de tiempo (por ejemplo, una quincena o un mes) a fin de lograr que se traduzcan en flujos de consumo de componentes tan regulares como sea posible.

5.2.6.3.2 Cálculo de necesidades y programación

También aquí hay pocas innovaciones. A partir del plan maestro y de la lista de materiales se determinan las cadencias previsionales mensuales de componentes, sub-conjuntos y materiales. Sin embargo en el sistema JIT, conforme a lo que se ha expuesto anteriormente, se limitan al máximo los reagrupamientos económicos y se adapta, dentro de ciertos límites, la capacidad a la carga y no a la inversa. Dado que ciertos aspectos operativos se han delegado al lanzamiento y control, el nivel de detalle de la lista de materiales suele ser menos prolijo en el sistema JIT que en los MRP tradicionales en occidente. La programación detallada mantiene el criterio de lograr un flujo de consumo de componentes lo más regular posible dentro de extensos períodos de tiempo, para lo cual insiste en mantener las tasas de producción constantes a lo largo de los mismos. La idea básica consiste en no dificultar la regularidad del flujo de materiales planificando o programando producciones con un alto contenido de variabilidad.

Vamos a reproducir un ejemplo tomado de Toyota (dado por Yasuhiro Monden en "*Industrial Engineering*, Vol. 13, No. 1, 1981): supongamos que deben producirse 10.000 vehículos Corona por mes de 20 días laborables de 8 horas; distribuidos en 5.000 berlinas, 2.500 cupés y 2.500 furgonetas, lo que conduce a producir 250 berlinas, 125 cupés y 125 furgonetas al día de 480 minutos. Para regularizar los flujos de producción desde los productos finales hasta el nivel de componentes elementales, se alternará en la línea de montaje final: 1 berlina, 1 cupé, 1 berlina, 1 furgoneta, 1 berlina, 1 cupé, etc. y se pondrán en juego todos los recursos necesarios para lanzar un vehículo todos los 57,6 segundos. Si de un mes a otro la producción debe aumentar o disminuir en algún porcentaje, se adaptarán la capacidad o los horarios de trabajo en consecuencia. El mismo Yasuhiro Monden describe el método de "búsqueda de objetivos" (*goal chasing*) para secuenciar los lanzamientos a línea de montaje de forma que se regularicen al máximo los consumos de componentes (que veremos en el capítulo 7).

Como resultado de esta fase de cálculo de necesidades y programación, conociendo las tasas de cada componente, se calcula por mes y por elemento a fabricar o a aprovisionar el número de tarjetas Kanban a poner en circulación; el número de tarjetas Kanban determina la obra en curso teórica.

5.2.6.3.3 Ejecución: control de stocks, gestión de órdenes, seguimiento del taller

Es esencialmente aquí que el sistema JIT presenta particularidades, al crear una conexión física entre los diferentes niveles de la lista de materiales. Un procedimiento peculiar, aunque no indispensable, es el ya reiteradamente citado sistema Kanban que funciona mediante la puesta en circulación de tarjetas. Un ejemplo ayudará a su comprensión. En la *figura 5.2.6.5* se representa un caso específico con la utilización de dos tipos de tarjeta para cada pieza llamados "Kanban de retiro" (C-Kanban) y "Kanban de producción" (P-Kanban). Se consideran dos talleres o secciones, el taller posterior monta *A*, *B* y *C*, de los que *a* y *b* son componentes fabricados por el taller anterior.

A cada contenedor de piezas *a* o *b* utilizadas en el taller posterior está asociado un Kanban de retiro (la cantidad de piezas situadas en un contenedor, que está normalizada, corresponde en general a un lote de producción).

Cuando el operario del taller posterior empieza a utilizar un nuevo contenedor de las piezas *a* o *b*, retira el C-Kanban fijado al contenedor y lo coloca en un casillero (paso 4). Cercano a dicho punto se situarán igualmente los contenedores vacíos. El suministrador con periodicidad predefinida toma los Kanbans en espera del casillero (así como los contenedores vacíos, uno por Kanban), y se dirige (en una carretilla con horquilla o un jeep) a la zona tampón intermedia entre los talleres (paso 1) y en función de las indicaciones inscritas en los Kanbans toma un contenedor de *a* o de *b*, del cual retira el Kanban de producción, que coloca en espera en otro casillero situado en dicha zona tampón (paso 2); a continuación fija el C-Kanban en el contenedor lleno que lleva entonces al taller solicitante, habiendo dejado en la zona tampón tantos contenedores vacíos como llenos se ha llevado (paso 3).

Regularmente el encargado del taller anterior recoge las tarjetas P-Kanban en espera, las clasifica por tipo de pieza (paso 5) y cuando su número corresponde a un lote de lanzamiento (lo más frecuente es 1 contenedor) y la carga del taller lo permite lanza la producción de *a* o *b* correspondiente mediante la tarjeta P-Kanban (paso 6). Durante todo el proceso de fabricación el P-Kanban acompaña al material (paso 7). Cuando el contenedor de *a* o de *b* está lleno de piezas terminadas, se fija en él la tarjeta P-Kanban y se sitúa el contenedor en la zona tampón (paso 8).

En cierta forma, como ya indicó T. Ohno, se imita el comportamiento de los supermercados, en los que el hecho físico de que un cliente retire de una estantería cierto producto dejando un hueco desencadena las acciones correspondientes para que sea reemplazado por otra unidad al poco rato.

Naturalmente este comportamiento puede generalizarse a una sucesión de talleres o bien entre la fábrica y algunos de sus proveedores. El sistema Kanban simplifica, por tanto, la

gestión de órdenes y el seguimiento del taller en la medida que es el montaje final quien "tira" del resto de la producción en función de necesidades reales, pero no se adapta más que a las producciones en serie.

El volumen de obra en curso máximo queda determinado por el número de Kanbans; este número se define en el momento de la programación mediante la fórmula:

$$NK = \frac{D \cdot L + G}{CC} = \frac{D \cdot L \cdot (1 + \alpha)}{CC}$$

donde D es el consumo medio (previsto) por unidad de tiempo,

$L = L1 + L2$ es el plazo de obtención de un contenedor de piezas,

$L1$ es el plazo necesario para reponer un contenedor lleno en el pulmón de entrada del taller posterior, desde que el operario deposita el C-Kanban en el casillero hasta que un nuevo contenedor lleno es depositado en el pulmón por el suministrador,

$L2$ es el plazo necesario para reponer un contenedor lleno en el pulmón de salida del taller anterior,

CC es la capacidad de un contenedor (< 10% de la demanda diaria),

G es un "factor de gestión" (< 10% de $D \cdot L$), y por tanto ejerce la función de stock de seguridad,

α es el coeficiente de seguridad.

Se deduce a partir de esta fórmula que el nivel máximo de obra en curso es $NK \cdot CC = D \cdot L + G$. Para disminuir este nivel puede pensarse en disminuir L , que es el plazo global de producción o de aprovisionamiento, o bien en hacer tender G a cero, lo que sólo es posible si la producción es perfectamente regular.

Naturalmente este procedimiento descrito, que es el más "exótico" de la filosofía Kanban, responde a un cierto tipo de situación productiva (talleres en serie principalmente) y corresponde a un cierto tipo de gestión de stocks "clásica" (punto de pedido con lote de pedido unitario). Como indudable ventaja, si la disciplina se cumple, está la de que el taller anterior sólo produce la pieza a si el taller posterior la consume; lo que digan las previsiones y programas es irrelevante. Si el consumo de la pieza a por el taller posterior sufre pequeñas oscilaciones, el taller anterior adaptará, dentro de los límites de su capacidad productiva, su ritmo de producción a las mismas, y se supone que el taller posterior está más cerca del producto final y por tanto del mercado y del cliente. Si el taller posterior dejase de consumir la pieza a , una vez todos los contenedores dotados de Kanban estuviesen llenos el taller anterior dejaría de producirla, y tal vez se quedase sin trabajo y hubiese que enviar sus trabajadores a otro taller o a su casa.

5.2.6.3.4 Otros tipos de Kanban

Kanban triangular

Se utiliza en aquellos artículos que se gestionan mediante punto de pedido y lote no unitario (por ejemplo piezas de estampación). Los contenedores con el artículo se apilan y se coloca el Kanban, que suele ser metálico y de forma triangular, en el contenedor que representa una reserva del igual al punto de pedido; cuando se empieza a utilizar este contenedor se emite una orden de reaprovisionamiento, generalmente mediante un Kanban de transporte de materiales asociado. El lector habrá reconocido un procedimiento "clásico" de utilizar el método de gestión por punto de pedido mediante una señal que indica cuándo empezamos a consumir la reserva.

Kanban de proveedores

Cuando es Toyota quien retira y no el proveedor que entrega se utiliza dicho Kanban, en el que incluyen informaciones sobre la frecuencia de las entregas y las horas de las mismas, punto de entrega, etc. Formalmente es un procedimiento de aprovisionamiento periódico, usual cuando se desea concentrar las entregas de los diferentes artículos que suministra el mismo proveedor. Consideremos el siguiente caso para aclarar las ideas: en un trabajo a dos turnos el proveedor recibe la visita del un empleado de Toyota con una camioneta a las 8 y a las 16 horas. En cada visita el proveedor entrega lo solicitado mediante los Kanbans recibidos en la visita anterior y recibe los Kanbans correspondientes a lo que tiene que entregar en la próxima visita; por tanto los Kanbans que recibe son la diferencia entre las Kanbans totales (cobertura) y los que están en contenedores llenos, bien en poder de Toyota, bien en poder suyo, en nuestra notación $L = T = \frac{1}{2}$ día, y el número total de Kanbans a disponer para cada artículo será:

$$NK = \frac{D \cdot (L + T) + G}{CC} = \frac{D \cdot (L + T) \cdot (1 + \alpha)}{CC}$$

Naturalmente la recepción de los Kanbans no puede ser la primera noticia que tiene el proveedor sobre lo que deberá entregar dentro de un plazo muy corto. El procedimiento es particularmente útil cuando el proveedor suministra varias piezas distintas, y está situado a una distancia tal que conviene concentrar las órdenes y las entregas. La relación entre el proveedor y el fabricante principal debe ser mucho más estrecha en el sistema JIT que en los procedimientos tradicionales, puesto que el trasfondo de dicho sistema no consiste en traspasar el stock al proveedor como parece deducirse de algunas (malas) aplicaciones. El número de proveedores de cada pieza debe ser reducido en el sistema JIT (idealmente uno solo), y los problemas deben resolverse mediante una colaboración franca, llegando a ser el proveedor un "cofabricante" del producto principal.

Kanban de emergencia

Para cubrir rechazos, inserciones extra o picos de demanda, se emite por un pequeño período y se retira posteriormente, inmediatamente después de su uso.

Kanban de urgencia

Algunas veces utilizando el procedimiento descrito en el párrafo 5.1.7.3.3 puede ocurrir que cuando el suministrador llega a la zona tampón no encuentre ningún contenedor con las piezas deseadas. Para suplir en dicha situación un P-Kanban el suministrador rellena un Kanban de urgencia, que deposita en un casillero especial "buzón rojo" y pulsa un interruptor que enciende una luz roja en el Andon, con lo que pone de manifiesto la carencia. Dicen los autores japoneses que, si el operario logra que dicha luz se apague en poco tiempo, es felicitado.

Kanban etiqueta

En la línea de montaje final un Kanban, con la descripción correspondiente, fijado a cada unidad que circula por la misma indica a todos los puestos de la línea de qué producto concreto se trata y por consiguiente qué elementos deben ser montados en dicha unidad, (corresponde a una hoja de ruta de montaje, llamada en algunas empresas "cartelino").

5.2.6.4 Comentarios finales

A la descripción anterior, necesariamente fragmentaria, deseamos unir cinco puntualizaciones:

- el sistema JIT o Toyota constituye una filosofía de producción que trasciende la simple dirección de operaciones para tocar todos los aspectos estructurales y funcionales del sistema productivo; la *búsqueda constante y sistemática de la mejora* es, en definitiva, el verdadero objetivo del sistema, dentro de la convicción de que siempre es posible mejorar, y que un esfuerzo continuado y bien orientado proporciona resultados,
- no cabe hablar de empresas, talleres, o fábricas JIT, sino de proyectos de mejora con la filosofía JIT; debe interpretarse el sistema JIT con la visión de una *acción* antes que con una visión de un *resultado*. Por ello resulta especialmente adecuado incluir un esquema de plan de aplicación del JIT tal como el de la *figura 5.2.6.6*.
- el paradigma de la reducción de los stocks no es el único que puede servir de estandarte para una acción JIT; servirían también el de la reducción de plazos o de reducción de costes, aunque posiblemente con menos impacto dada la mayor inmaterialidad del objetivo,

- la simplificación de los subsistemas y los flujos buscada a través del JIT puede alcanzar grados más o menos avanzados según los sistemas productivos a los que se aplique; y por tanto puede permitir la utilización plena de los instrumentos descritos (por ejemplo, el Kanban) o no. En cualquier caso la simplificación y la mejora continua son actividades cuya rentabilidad e interés están fuera de toda discusión. La utilización de uno u otro instrumento se presta a discusión, y por tanto conviene recurrir a estudios de oportunidad.

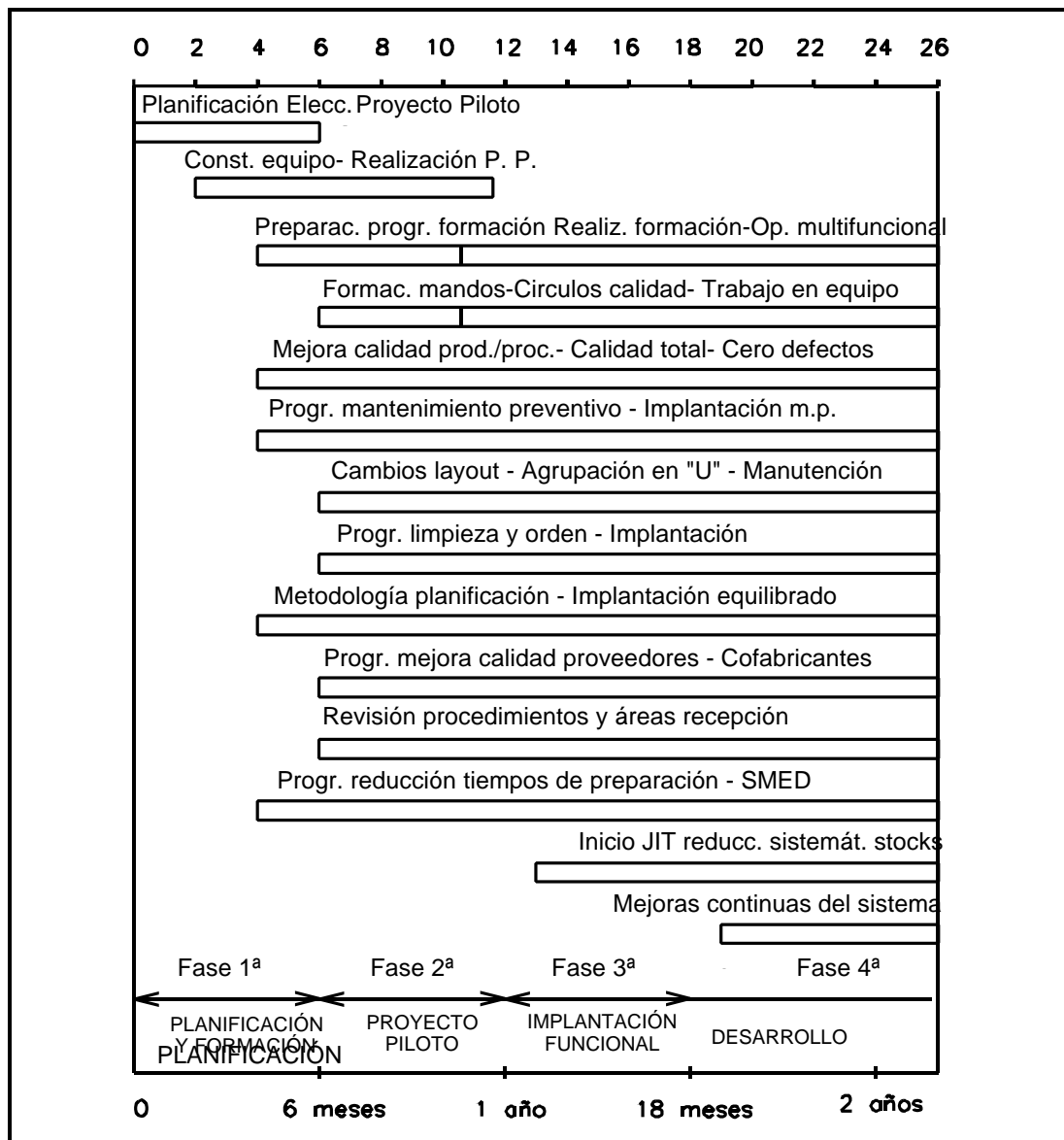


Fig. 5.2.6.6 Planificación de un proyecto JIT

- no es condición necesaria la nacionalidad japonesa para aplicar estos procedimientos, tanto más cuando en gran parte parecen derivarse de los principios del *Scientific Management*. Posiblemente la originalidad japonesa estriba en llevar estos principios hasta sus últimas consecuencias. Existen aplicaciones afortunadas en América, en Europa y, particularmente, en España (fig. 5.2.6.7)

	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIO
Reducción de los tiempos de preparación	90%	25%	60%
Reducción de la obra en curso	88%	40%	60%
Reducción del plazo de fabricación (<i>lead-time</i>)	88%	40%	60%
Reducción del stock de producción terminado	60%	40%	55%
Reducción de la superficie empleada	51%	23%	39%
Reducción de la mano de obra directa	31%	15%	19%

Fig. 5.2.6.7 Resultados de implantaciones JIT en España (Sistema KPS). Fuente: Juan Montero - "Just-in-Time en España: Presente y Futuro"; CIMWORLD num. 18, abril/mayo 1990

5.2.7 Bibliografía

- [1] BUCHAN, J; KOENIGSBERG, E. *Scientific inventory management*. Prentice-Hall, 1963.
- [2] COMPANYYS, R; FONOLLOSA, J. B. *Nuevas técnicas de gestión de stocks: MRP y JIT*. Marcombo, 1989.
- [3] FOGARTY, D. W; BLACKSTONE, J. H; HOFFMANN, Th. R. *Production and inventory management (2nd edition)*. South-Western, 1991.
- [4] HADLEY, G; WHITIN, T. M. *Analysis of inventory management*. Prentice-Hall, 1963.
- [5] JOHNSON, L. A; MONTGOMERY, D. C. *Operations research in production planning, scheduling, and inventory control*. John Wiley & Sons, 1971.
- [6] MIZE ET AL, J. H. *Operations planning and control*. Prentice-Hall, 1971.

- [7] MONDEN, Y. *El sistema de producción de Toyota*. CDN, 1987.
- [8] NADDOR, E. *Inventory systems*. John Wiley & Sons, 1966.
- [9] PETERSON, R; SILVER, E. A. *Decision system for inventory management and production planning*. John Wiley & Sons, 1979.
- [10] SCHONBERGER, R. J. *Técnicas japonesas de fabricación*. Limusa, s.a., 1987.
- [11] SHINDO, S. *El sistema de producción de Toyota desde el punto de vista de la ingeniería*. TGP, s.a., 1990.
- [12] STARR, M. K. MILLER, D. W. *Inventory control: theory and practice*. Prentice-Hall, 1962.
- [13] TERSINE, R. J. *Principles of inventory and materials management (2nd edition)*. North Holland, 1982.
- [14] ZIMMERMANN, H. J; SOVEREIGN, M. G. *Quantitative models in production management*. Prentice-Hall, 1974.

Comentario

Los textos incluidos son el resultado de dos filtros: por una parte hemos evitado, salvo excepciones, los tratados generales de gestión de producción en los que habitualmente figura algún capítulo de stocks, por otra nos hemos decantado por aquellos libros que habían sido nuestra base de trabajo sobre el tema, lo que, ciertamente, conduce a una edad media de la lista elevada.

[4] y [12] son unos textos fundamentales, en el primero de los cuales aparece el método heurístico en una forma que se va repitiendo en otros libros, como por ejemplo en [5]. Una exposición sistemática, muy teórica, de los modelos puede encontrarse en [8], con muchos desarrollos que no hemos incluido y que pueden servir de ampliación. [9] y [13] son textos relativamente modernos y completos (Silver es una autoridad reconocida, que da nombre a procedimientos originales ampliamente difundidos).

[7], [10] y [11] se centran en JIT, constituyendo [10] una buena introducción bien estructurada.