

Organizadas
por la
Sociedad
Argentina
de Investigación
OperativaCerrito 1250
Tel. 41-4961 42-9520
Buenos Aires
Argentina

DETERMINACION DEL NIVEL OPTIMO DE UN STOCK DE SEGURIDAD

Ing. Juan J. Schulz Poquet

GENERAL MOTORS ARGENTINA S.A

Resumen: La aplicación del presente método, desarrollado por el autor en G.M.A, es totalmente general, tanto en las funciones del stock como en el tipo de proceso en que se encuentre.

Está basado en el análisis estadístico de lo acontecido en un período de terminado, requiriendo consecuentemente su reactualización periódica. Es por eso que en el caso de ser grande el número de items a controlar es recomendable el uso de computadora, siendo su procesamiento fácilmente volcable a un programa. No obstante ello, en la actualidad se está experimentando con procesamiento manual, consiguiéndose igualmente resultados altamente satisfactorios frente a otros métodos usados con anterioridad.

El análisis estadístico que luego detallaremos permite el trazado de las dos curvas que constituyen la base del método y que son:

-Costos del mantenimiento del stock, en función del riesgo a asumir, expresado éste en días de faltante de material, o de ruptura del flujo ideal, en un período determinado:

$$C_S = f(D_R)$$

-Costos de las consecuencias de esta ruptura, también en función de los días de ruptura:

$$C_R = f(D_R)$$

De la suma de estas curvas obtendremos la de costos totales:

$$C_T = f(D_R)$$

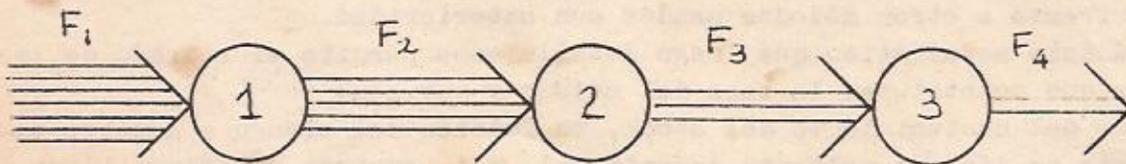
cuyo mínimo nos determinará el riesgo óptimo a asumir y su correspondiente nivel de stock.

Una ventaja relevante de este método es que dicho nivel queda expresado en días (u horas) de los programas de producción, resultando totalmente flexible ante variaciones en estos programas.

1. Introducción: Creo innecesario destacar la importancia de mantener controlados los inventarios en una empresa industrial. En este cometido siempre se encontrarán las opiniones de la gente de Producción con la de Finanzas. Los primeros, tratando de demostrar la conveniencia de tener repletos los almacenes y "colchones" intermedios, y los últimos, mostrando cómo afecta este criterio a la rentabilidad de la empresa. Es pues, de sumo interés poder evidenciar en una forma objetiva las consecuencias de uno y otro criterio, y arribar al punto de compromiso que concilie ambos intereses con el global de la empresa.

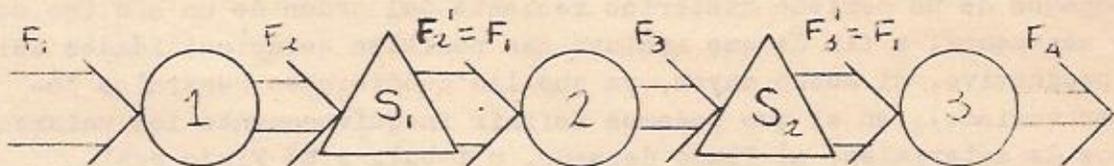
1.1. Enfoque generalizado del problema: Todo proceso productivo puede ser imaginado como un ciclo que se inicia con los programas de fabricación y termina con la obtención del producto terminado, existiendo en su transcurso un flujo de materiales que se van transformando y/o incorporando para terminar en el producto final.

Cada una de las fases intervinientes en este ciclo actuará como un sistema perturbador del flujo, con características de perturbación propias. De no mediar stocks de seguridad, este flujo se vería mermado en mayor o menor grado al atravesar cada una de estas fases, tal como vemos en la figura 1, donde los círculos representan centros productivos, y las líneas de trazos, el flujo del material en estudio, cuantificado por el espesor de las mismas.



Este efecto es sobremanera perjudicial en un proceso seriado, ya que cualquier

interrupción en la producción de uno de los centros paralizaría los subsiguientes, y su remedio es intercalar entre ellos sendos "colchones" del material correspondiente, tal como vemos en la figura 2.



Pero estos "colchones", o stocks de seguridad, S_1 y S_2 , deben estar convenientemente dimensionados de manera que no resulte más caro su mantenimiento que las economías buscadas con los mismos. Definiremos entonces cuáles son los costos que haremos jugar en forma antagónica en la determinación de sus niveles óptimos.

1.2. Costo del mantenimiento de un stock (C_S): Mantener un determinado stock implica efectuar una inversión no rentable, inmovilizar un capital, y el capital tiene un costo: el que la empresa paga por sus recursos financieros. Otra forma de medirlo sería a través de la rentabilidad de la empresa, ya que el stock estaría distrayendo otras inversiones rentables. El criterio a adoptar será, en general, fijado por Tesorería, quien fijará además su valor. En este costo se incluirán todos los que estén relacionados en forma directa con el nivel de inventarios, tales como seguros de almacenaje, de obsolescencia, etc., resultando en definitiva una tasa que grava al stock en la misma manera que un interés a un capital.

1.3. Costo de las consecuencias del faltante de material (C_R): Aquí habrá que estudiar detenidamente cuáles serían las consecuencias de no cumplirse en la fase en estudio los programas previstos por falta del material, poniéndolas debidamente. En general estas consecuencias y sus costos serán función de la magnitud del retraso que ocasionen estos faltantes, como veremos más adelante. En el ejemplo que desarrollaremos, supondremos que todo retraso en los programas de producción deberá ser recuperado trabajando en turnos extras, resultando en este caso que el costo del retraso es el de

los jornales de estos turnos extras. Pero no siempre será así. Además, como también veremos más adelante, juegan fundamentalmente todos los "Colchones" que existen después del que se encuentre en estudio.

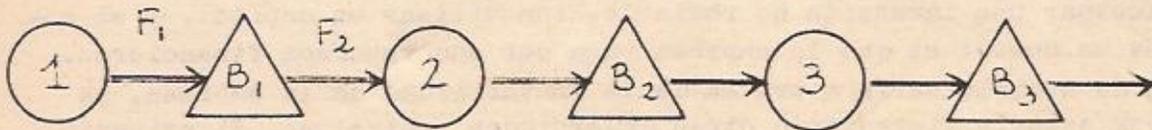
2. Objetivo e Hipótesis del Modelo: El objetivo es, evidentemente, diseñar el stock de seguridad que cumpla su cometido en la forma más económica. Para ello nos basaremos en los siguientes puntos:

2.1) Disponemos de un período histórico reciente del orden de un año (no conviene que sea menor, a fin de que incluya las posibles estacionalidades del fenómeno productivo, ni mucho mayor, ya que las condiciones generales podrían haber variado), en el que podemos definir inequívocamente los valores de 2 flujos de materiales: a) Flujo deseado, o ideal, y b) Flujo real.

2.2) Los factores que intervienen en la perturbación del flujo ideal (dando lugar al real), en la fase en estudio, son múltiples y variados, y su aparición es aleatoria. (De existir factores de accionar fijo, constante o programado, estos deberán tenerse en cuenta en la determinación del flujo ideal)

2.3) Las discrepancias entre ambos flujos se distribuyen conforme a una Ley Normal, o Gaussiana.

3. Descripción del método: Supongamos que nuestro problema sea dimensionar el stock precautorio a anteponer a una serie de procesos cuyos stocks intermedios ya hayan sido fijados con anterioridad (óptimamente o no).



Tendríamos, por ejemplo, que determinar el stock B_1 de la figura 3, conociendo para un período de un año cuáles fueron los flujos real e ideal, o sea, F_1 y F_2 .

Si llevamos en un gráfico ambos flujos en forma acumulada en función del tiempo, obtendremos las curvas mostradas en la figura 4.

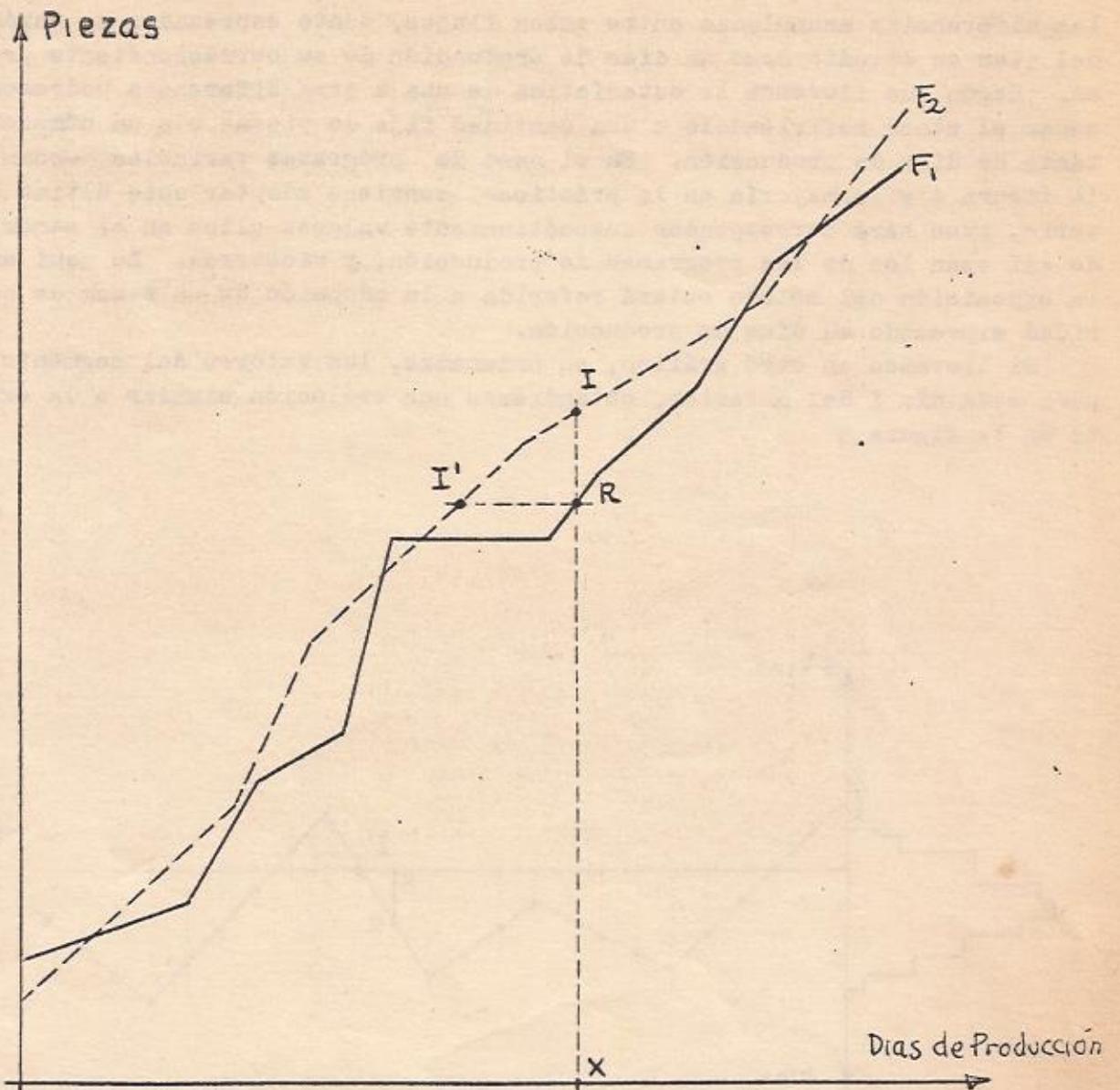


fig. 4

Esta representación nos permite conocer, para un día X, la cantidad acumulada (a partir de un origen conveniente) de piezas que tendría que haberse recibido de (1) (punto I), y los que realmente se recibieron (punto R), así como en cuántos días se encuentra adelantada o atrasada la situación real respecto de la ideal (segmento I'R)

Vemos entonces que para cada día del período estudiado podemos conocer las diferencias acumuladas entre ambos flujos, tanto expresadas en unidades del ítem en estudio como en días de producción de su correspondiente programa. Según que llevemos la estadística de una u otra diferencia podremos diseñar el stock refiriéndolo a una cantidad fija de piezas o a un número constante de días de producción. En el caso de programas variables -como el de la figura 4 y la mayoría en la práctica- conviene adoptar este último criterio, pues hará corresponder automáticamente valores altos en el stock cuando así sean los de los programas de producción, y viceversa. De aquí en más la exposición del método estará referida a la adopción de un stock de seguridad expresado en días de producción.

Si llevamos en otro gráfico, en ordenadas, los valores del segmento I'R para cada día X del anterior, obtendremos una evolución similar a la expuesta en la figura 5

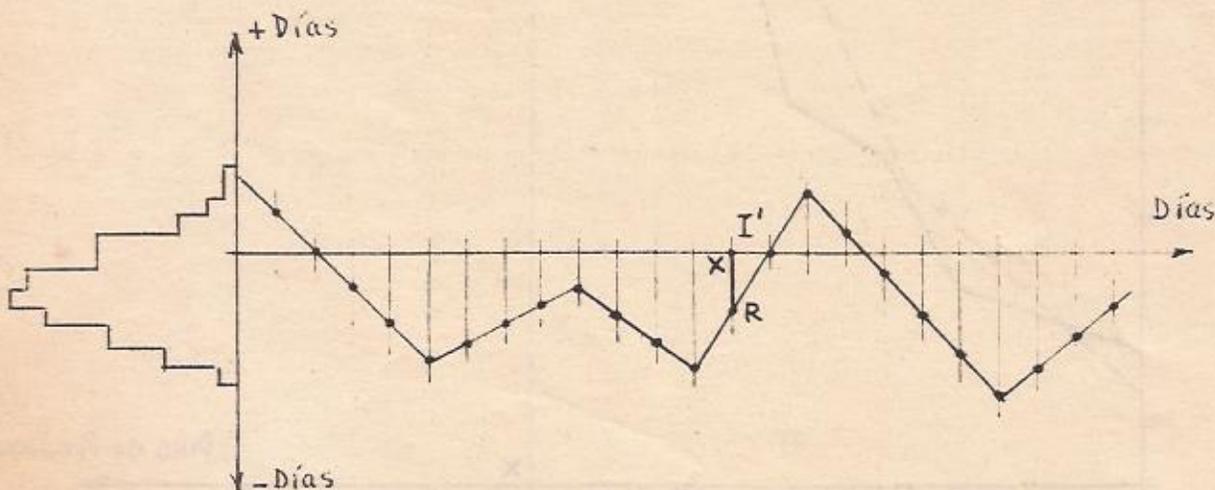


fig. 5

Los puntos R nos miden la situación al término de cada día considerado (según la conveniencia o necesidad pudo haberse computado al término de cada hora, turno o semana), y agrupando sus ordenadas en clases del mismo ancho -de 1 día, en este ejemplo- obtendremos un histograma como el dibujado en la misma figura. Justificamos el sesgo de este histograma, correspondiente a una muestra de una distribución gaussiana, por el origen de la

variable computada. En efecto, esta variable -continua- es el resultado de una multitud de factores aleatorios que se pueden reunir en dos grupos de accionar opuesto: a) los que tienden a apartar el flujo real del ideal, o factores distorsionantes, y b) los que tienden a igualar ambos flujos, o factores correctivos. Como es sabido, toda vez que un fenómeno responda a estas características es de esperar que la variable resultante se distribuya conforme a la ley Normal, o Gaussiana.

El procesamiento de este histograma nos permitirá deducir los parámetros μ y σ -a través de sus estimadores de máxima verosimilitud "media" y "desvío cuadrático medio" -, parámetros que definen la función gaussiana "madre", de la que nuestro histograma es tan sólo una muestra. Vale decir, que habremos inferido la ley estadística que regula las fluctuaciones entre ambos flujos, pudiendo en consecuencia medir el riesgo de interrupción del flujo real de materiales asociado a cada nivel del stock de seguridad propuesto. Veamos cómo lo hacemos.

3.1. Obtención de la curva Costos del Stock en función del Riesgo asumido:

($C_S = f(D_R)$): Supongamos que la de la figura 6a sea la representación de esta ley para nuestro caso. La misma nos está indicando que nuestro sistema tiende a producir un atraso medio de 3 días ($\mu = -3$), con una dispersión de aproximadamente 4 días ($\sigma = 4$).

La curva es, pues, la función densidad de probabilidades de los retrasos o adelantos de nuestro sistema. La relación entre el área sombreada y la total encerrada por la curva nos indica qué probabilidad existe de que se den adelantos comprendidos entre 2 y 4 días. Cuando extendamos nuestros pronósticos a un determinado período futuro, el área total de la curva equivaldrá al total de los días productivos de ese período, y la fracción sombreada nos medirá directamente en cuántos días de ese período podremos esperar estar adelantados en la producción entre 2 y 4 días. Así las cosas, si dispusiéramos permanentemente de un stock de seguridad equivalente a 8 días de producción (notemos que esto lo conseguimos simplemente adelantando la producción en tantos días como lo indique el valor del stock), nos cubriríamos de todas las interrupciones que ocasionaren un retraso de 8 días, y dejaríamos de cubrir interrupciones cuyo efecto total sería el de tantos días de faltante como los encerrados por la curva a la izquierda de la abscisa -8 (La explicación de esta afirmación es simple. Si adelantáramos la producción estaríamos corriendo la curva F_1 de la figura 4 hacia la izquierda, el eje de abscisas de la figura 5 hacia abajo, y, por último, el eje F de la figura 6a hacia la izquierda, en tantos días como exprese ese adelanto).

El valor de los días de faltante de material lo podemos conocer a través del gráfico de la figura 6b, que no es sino la representación de los valores acumulados de las áreas del de la figura 6a. Si extendiéramos nuestros pronósticos a un año, contaríamos con un total aproximado de 240 días de producción (según el caso, naturalmente), tal lo supuesto en este ejemplo, y vemos que para un stock de 8 días podríamos esperar interrupciones por un total de 24. Podemos apreciar en la misma figura que agregando 2 días más al stock reduciríamos este riesgo a solamente 12 días.

El gráfico de la figura 6b nos relaciona entonces, en abscisas, el stock

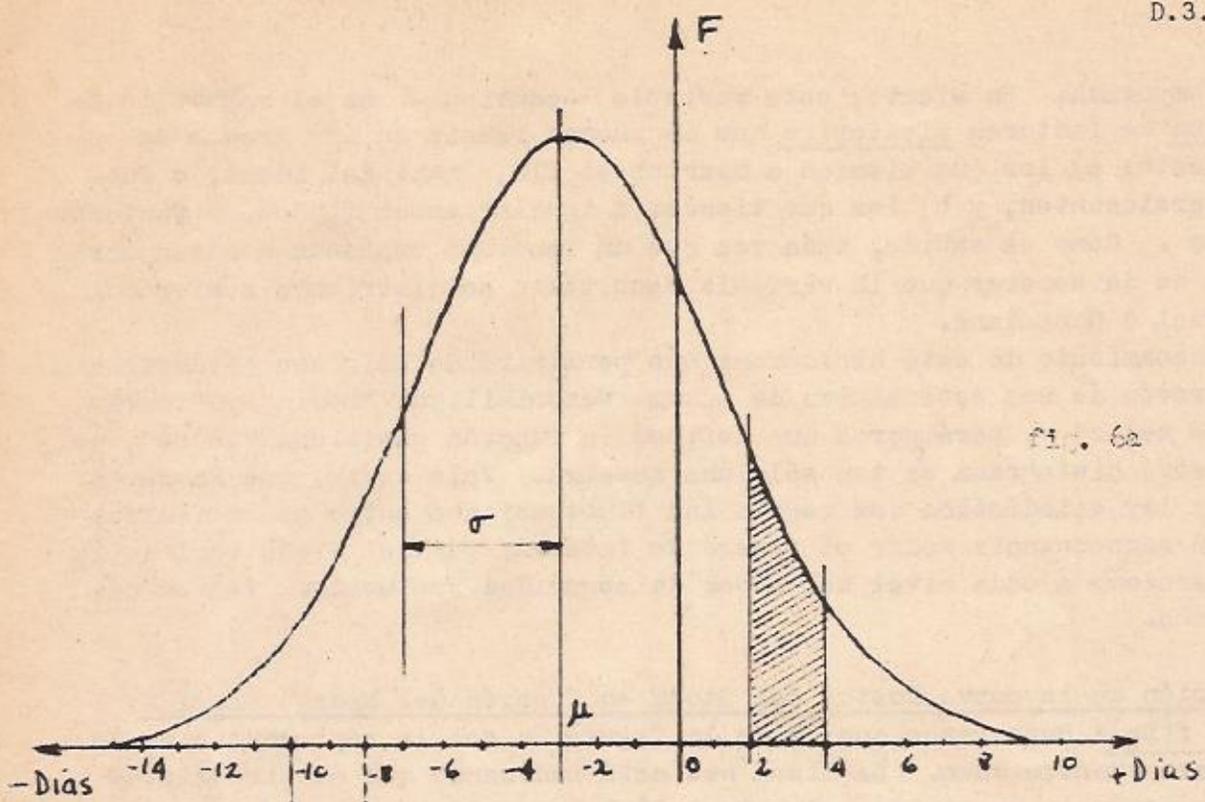


Fig. 6a

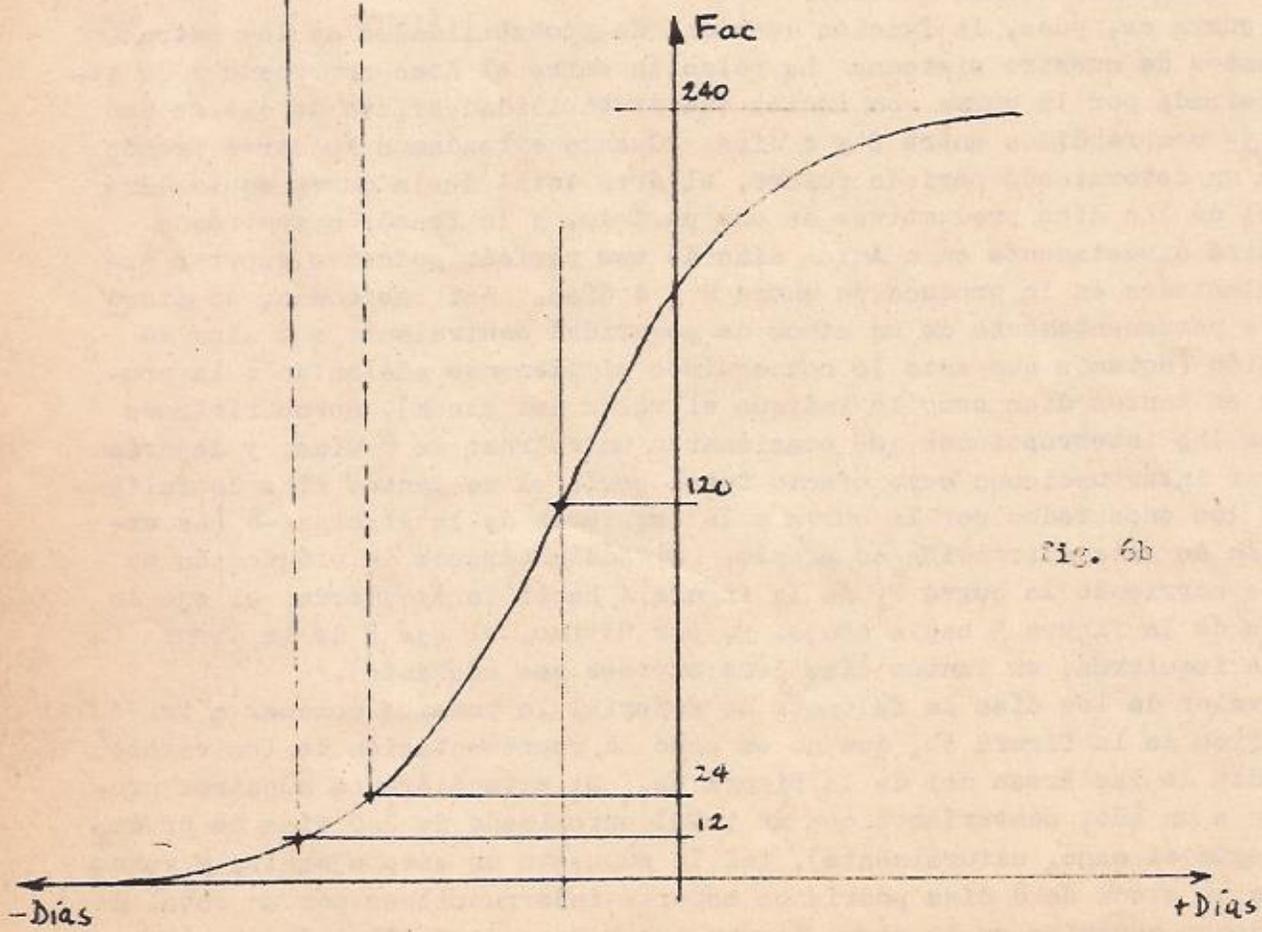


Fig. 6b

de seguridad con el riesgo expresado en días totales de faltante de material, en ordenadas.

De aquí a determinar la curva $C_S = f(D_R)$ sólo resta hacer un cambio en la posición y escalas de las coordenadas. En abscisas llevaremos el eje F_{ac} que ahora llamaremos D_R (días de ruptura), y en ordenadas llevaremos el eje -Días al que llamaremos C_S (Costo de Stocks). La forma de la curva será la misma, ya que los niveles de stock difieren de sus costos tan sólo en una constante.

Tendremos ahora el gráfico de la figura 7, en

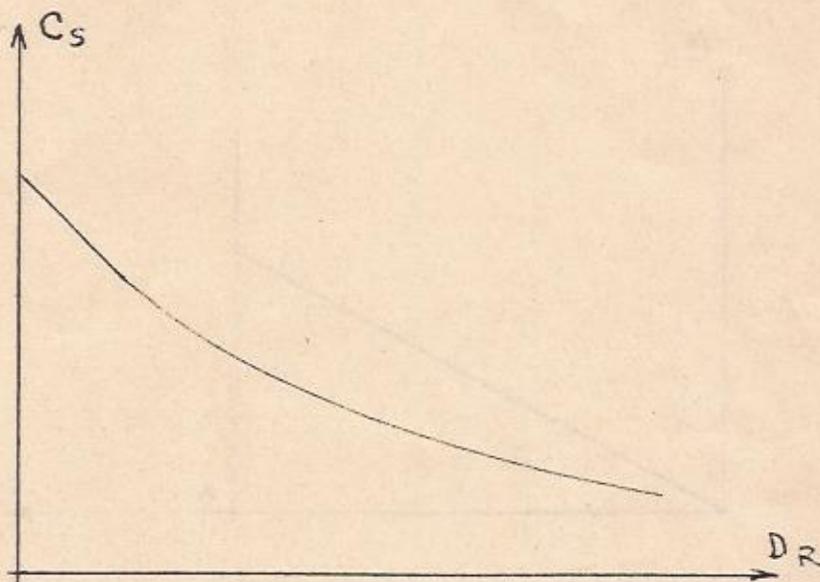


fig. 7

el que apreciamos que la curva no es asintótica al eje C_S como aparece en la figura 6b sino que lo corta con una recta. Esta recta se obtiene de empalmar a la curva la tangente cuya pendiente vale -1 , y la justificación de esta reforma reside en la naturaleza de las variables relacionadas por la curva, que, además de la expresada por ésta, guardan entre sí otra relación. En efecto, como apreciamos en las figuras 6a y 6b, a medida que nos alejamos de la media μ , son necesarios mayores incrementos en los valores del stock para cubrir iguales incrementos en los días de faltante (menor pendiente de la curva F_{ac}), característica de la distribución gaussiana, llegando en los extremos de la misma a necesitar de un stock infinito para asegurar la total continuidad del flujo (asíntota en el origen). Esto sería válido para una muestra de tamaño infinito, y en nuestro caso equivaldría a extender nuestros pronósticos a la eternidad. Pero al limitar este período también tendremos que limitar la pendiente de la curva F_{ac} de manera que, como es obvio, corresponda a un incremento de 1 día de stock un incremento en la continuidad del flujo de 1 día como mínimo. De aquí, entonces, la relación unitaria en el origen de la curva F_{ac} (o de la C_S) entre el decremento de los días de stock y el incremento en los días esperables de ruptura de flujo, expresada por la tangente.

3.2. Obtención de la curva Costos de Ruptura del Flujo en función del Riesgo asumido: $C_R = f(D_R)$: Ya tenemos definida una de las curvas que nos per-

mitirá resolver nuestro problema. Veamos ahora cómo obtendremos la otra, o sea, la que representa los costos involucrados en la interrupción del flujo.

Si los costos por ruptura del flujo fueran directamente proporcionales al total de las interrupciones, sin discriminación de los atrasos ocasionados en el cumplimiento de los programas, esta curva sería simplemente una recta que partiría del origen de coordenadas con una pendiente igual al costo unitario de interrupción, como vemos en la figura 8

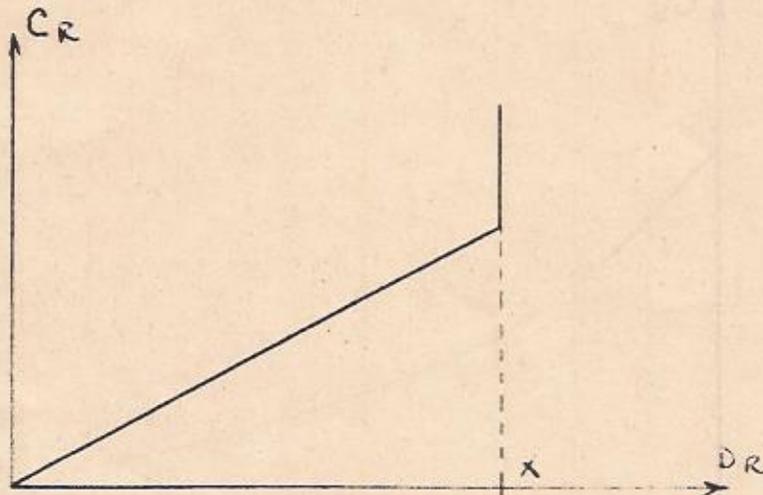


fig. 8

Tal sería el caso de faltarle material a un único proceso —o al último de una serie— donde los atrasos podrían recuperarse trabajando turnos extras. Aquí el costo unitario sería el correspondiente a los jornales para recuperar 1 día de la producción programada. Claro que también habría que considerar otras consecuencias si las hubiere, como por ejemplo, pérdidas de venta. Pero en general, cuando entran a jugar una serie de intangibles que por su naturaleza son de imposible ponderación concreta, lo aconsejable es adoptar un límite en el retraso permitido, es decir, limitar el riesgo a correr, lo que equivale a que la curva C_R pase a ser vertical en dicho límite, de abscisa X . Este no es más que un caso particular, el más simple, del general que pasamos a considerar seguidamente, donde podremos ver también cómo se ubica la abscisa X recientemente mencionada.

Previamente conviene destacar un concepto que hemos venido usando en el transcurso de la presente exposición y que conviene dejar totalmente aclarado antes de seguir avanzando en la misma. Hemos hablado de interrupciones en el flujo de materiales y de atrasos en los programas de fabricación, y éstas son dos cosas totalmente distintas, si bien están relacionadas. Un sistema puede sufrir frecuentes interrupciones pero cortas, de modo que aunque la suma de ellas pueda resultar un número elevado de días totales de ruptura D_R , su consiguiente recuperación impide que se alcancen grandes retrasos. Por el contrario, podemos encontrarnos con otro sistema con menor número de interrupciones pero que, ya sea porque son importantes o porque no se recuperan, ocasionan retrasos considerables.

Desde luego, es evidente que el retraso nunca podrá alcanzar una cifra mayor que la del total de días de ruptura; a lo sumo, igual.

Hecha esta salvedad, pasamos a describir el caso general de la obtención de la curva $C_R = f(D_R)$:

Para ello retomemos nuestro ejemplo de la figura 3. Debido a la existencia de otros stocks de seguridad, las primeras interrupciones podrán ser absorbidas por los mismos sin que afecten a los centros productivos que les siguen, y, según se recuperen o no los atrasos ocasionados, las siguientes interrupciones irán afectando en forma sucesiva a estos centros productivos. Resulta entonces que necesitamos conocer para cada total de días posibles de ruptura D_R , o interrupciones, cuántas de ellas se darán en las distintas situaciones de atraso, y esto, como mencionáramos antes, depende del comportamiento del sistema en estudio. Pero dicho comportamiento lo tenemos definido por las curvas de las figuras 6a y 6b y, en consecuencia, por la de la figura 7.

Supondremos que en nuestro ejemplo, B_2 es un stock de 2 días de producción y B_3 otro de 3. B_3 es un almacén del productivo terminado, el que se distribuye luego a los mayoristas. Esto significará que mientras el retraso se mantenga menor a los 2 días, solamente se verá afectado el centro (2), manteniendo la continuidad en (3) el stock B_2 . El costo unitario de recuperación en (2) lo llamaremos $\bar{C}_{R<2}$. Cuando el retraso se encuentre comprendido entre los 2 y 5 días afectará también al centro (3), manteniendo la salida del producto terminado B_2 . Al costo unitario anterior tendremos que sumarle el de la recuperación en (3) y obtendremos ahora $\bar{C}_R 2/5$. Una penetración mayor a los 5 días interrumpiría el flujo del producto terminado, riesgo que no queremos correr, por lo que éste será nuestro límite.

Reproducimos en la figura 9 la curva C_S de la figura 7. Este gráfico tendrá por coordenadas C y D_R (Costos y días totales de ruptura). Si trazamos por el origen una recta a 45° , RL, la misma limitará con el eje D_R un semiplano cuyos puntos tendrán por abscisas días totales de ruptura y por ordenadas días de atraso, medidos en la misma escala que D_R . Vale decir, que a todas las situaciones posibles de interrupciones y atrasos les corresponderán puntos de este semiplano. La escala C de costos la hemos representado en días de stock de seguridad, lo que simplificará mucho el trazado gráfico. Esto significa que todos los costos estarán representados por la relación que guarden con los de stocks. Así, la curva C_S es directamente la que surgiría de la figura 6b, pues tiene por ordenadas días de stock. Por otra parte, los costos unitarios de ruptura los supondremos tales que guarden las siguientes relaciones con el del stock equivalente a 1 día promedio de producción (\bar{C}_S):

$$\bar{C}_{R<2} = \frac{\bar{C}_{R<2}}{\bar{C}_S} = 0,2 ; \bar{C}_{R2/5} = \frac{\bar{C}_{R2/5}}{\bar{C}_S} = 0,4 ; \bar{C}_{R>5} = \frac{\bar{C}_{R>5}}{\bar{C}_S} = 0,6$$

Como habrán podido apreciar, aquí nos salimos un poco de nuestro ejemplo, pues le damos un cierto valor a la recuperación del retraso mayor de 5 días ($R > 5$), en vez de no aceptar este riesgo. Lo hacemos para ilustrar mejor la obtención de la curva C_R , dejando para más adelante el asunto de la limitación.

Supongamos querer saber cuál es el riesgo que asumiríamos de adoptar un stock de seguridad de 5 días en B_1 , y cuál sería el costo asociado al mismo, a lo largo de un año de producción. Siempre refiriéndonos a la figura 9, ve

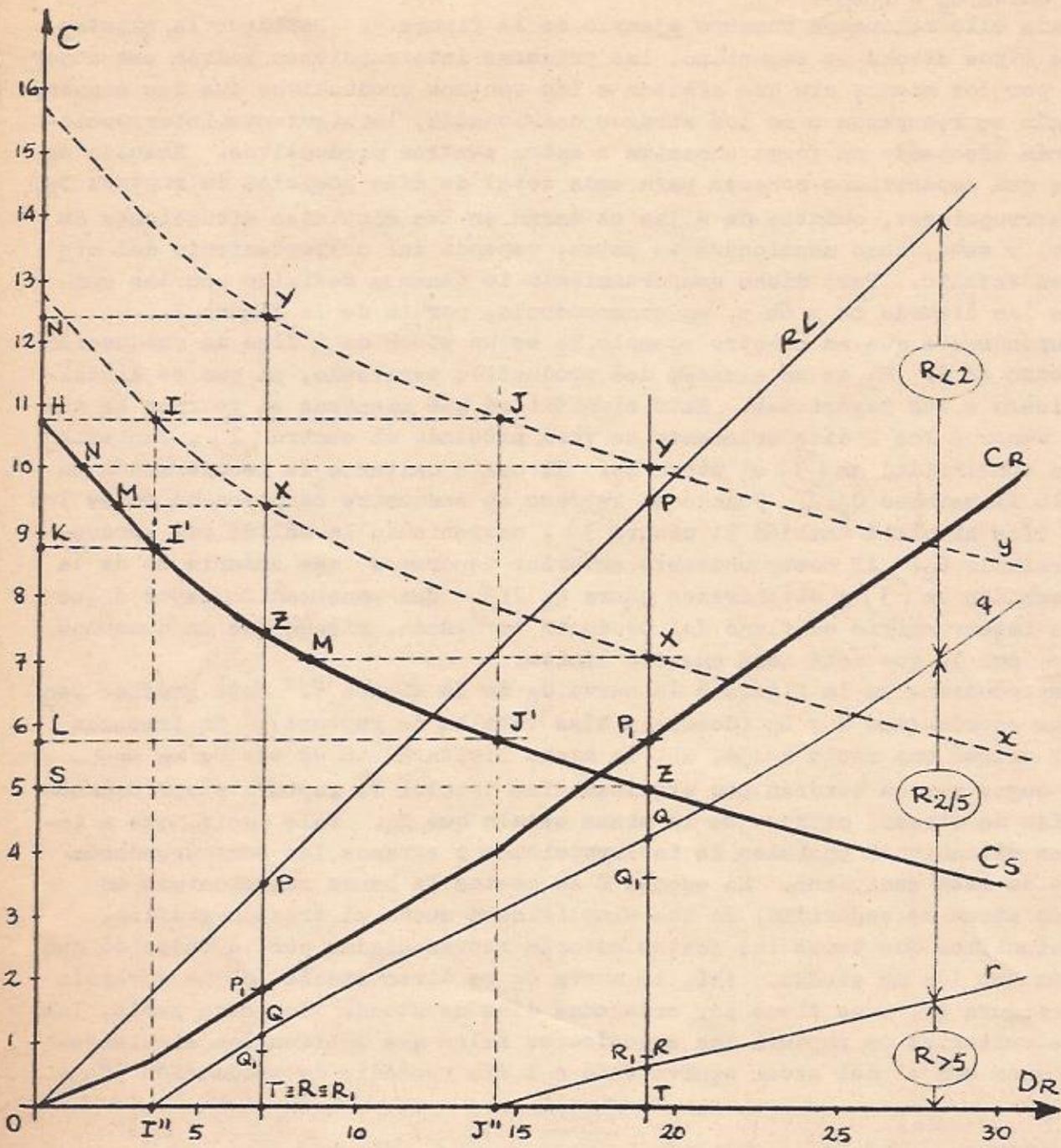


fig. 9

mos que para un stock igual a 5 (punto S sobre el eje C), la curva C_S hace corresponder (punto Z, de igual ordenada que S) un riesgo de 19 días anuales de interrupciones totales (punto T en el eje D_R). Trazamos por T una vertical que cortará a RL en P. En el segmento TP = OT se encontrarán explicadas todas las situaciones de atraso de estos 19 días. Llevamos a partir de Z 2 días de la escala C y obtenemos X. Trazamos una horizontal por X y cortamos a C_S en M. Si en nuestro stock de 5 días hubiéramos agregado 2 más habríamos obtenido en C_S este punto M. Esto significa que con 2 días más de stock a partir de S disminuimos el riesgo en MX días de ruptura, lo que equivale a decir que del total de días de ruptura (19), MX se darían con atrasos de hasta 2 días. Pues bien, llevamos este segmento MX sobre la recta TP a partir de P y obtenemos el punto Q (PQ = MX), resultando que PQ mide los días en que el sistema sufre estos atrasos. Para conocer ahora cuántos serán los días de interrupciones que hagan sufrir atrasos de 2 a 5 días, llevamos a partir de X 3 días más (en la escala de C), obteniendo el punto Y. Vemos ahora que el riesgo inicial se vería reducido en NY días de interrupciones. Llevamos este valor a partir de P y obtenemos en la vertical TP el punto R (PR = NY). Tendremos entonces que, por diferencia con el anterior, el segmento QP nos indicará los días con atrasos entre 2 y 5 días, y, con el mismo razonamiento, RT equivaldrá a los de atrasos mayores de 5 días.

Ahora sólo nos resta, para conocer el costo del riesgo de mantener un stock de 5 días, multiplicar los días de los distintos atrasos por las escalas de sus costos de recuperación. Tendremos así:

$$\begin{array}{rcl}
 & \text{TR días (en escala } D_R) \times 0,6 (C_R > 5) = & \text{TR}_1 \text{ (en escala C)} \\
 + & \text{RQ días (en escala } D_R) \times 0,4 (C_R \geq 2/5) = & \text{R}_1\text{Q}_1 \text{ (en escala C)} \\
 & \text{QP días (en escala } D_R) \times 0,2 (C_R < 2) = & \text{Q}_1\text{P}_1 \text{ (en escala C)} \\
 \hline
 \text{Total: TP días (en escala } D_R) \text{ tienen un costo de:} & & \text{TP}_1 \text{ (en escala C)}
 \end{array}$$

Si reiteramos este procedimiento a lo largo del eje D_R (lo hemos hecho en la figura 9 para otra posición de la recta TP) obtendremos lo siguiente:

-Los puntos X e Y dibujarán las curvas x e y que no son sino paralelas a la C_S , separadas entre sí por 2 y 3 días de stock.

-Los puntos Q y R dibujarán las curvas q y r que dividen al semiplano RL/ D_R en zonas de atrasos menores de 2 días ($R < 2$), entre 2 y 5 días ($R \geq 2/5$) y mayores que 5 días ($R > 5$). (No es difícil comprender por qué estas curvas nacen en I" y J". Baste para ello observar el procedimiento de obtención de las mismas y que dichos puntos son los correspondientes de los I y J resultantes de cortar las curvas x e y con la horizontal que pasa por el punto H del nacimiento de la curva C_S , o de los I' y J' que se obtienen en C_S con ordenadas K y L, menores a H en 2 y 5 días respectivamente).

-Los puntos P_1 dibujarán, finalmente, la curva C_R .

3.3. Obtención del Stock Optimo: En el gráfico de la figura 9 ya tenemos reunidas las 2 curvas representativas de los costos asociados a los distintos niveles operativos del stock. Fijar sobre estas bases el punto de conveniencia obviamente no será otra cosa que adoptar aquel nivel cuyo riesgo conse -

cuente arroje los menores costos esperables, o, usando el término de la Estadística, cuya esperanza matemática de costos sea la menor. Para tales fines, sumamos las ordenadas de ambas curvas a lo largo del eje D_R , obteniendo la curva $C_T = C_S + C_R = f(D_R)$. Lo haremos en aparte (figura 10) para no complicar más el gráfico de la figura 9.

Podemos observar que el punto W es el mínimo de la curva C_T . Su abscisa nos estará indicando cuál es el riesgo más conveniente y, a través de la curva C_S , cuál es el costo más conveniente en stocks. Pero por la forma en que determinamos la escala de costos, resulta que el de stocks lo tenemos expresado directamente en días. La mecánica es ésta: bajamos una perpendicular por W hasta cortar a C_S en Z. Trazamos por Z una horizontal hasta cortar al eje C en B. La ordenada de este punto nos expresa el valor óptimo del stock de seguridad a adoptar.

Este valor puede resultar fraccionario e interesarnos redondearlo a un entero. Habrá que tener en cuenta cuál es el redondeo más conveniente. En el ejemplo desarrollado en los gráficos vemos que el stock óptimo es 7,5 días aproximadamente. Usando la curva C_S podremos conocer cuál de los enteros inmediatos arroja costos totales menores. Vemos que para 8, C_T es ligeramente menor que para 7, resultando por consiguiente más justificable adoptar aquel valor.

Si nos interesara conocer cómo está compuesto el riesgo óptimo no tendríamos más que prolongar la vertical de W hasta T. Tanto el segmento OT como el PT nos dice que son esperables interrupciones por un total de 7 días al año. De ellos, 4,8 provocarán atrasos de hasta 2 días (PQ) y el resto entre 2 y 5 días (QT).

Veamos ahora el asunto de la limitación del riesgo. Volvamos a la figura 9. La curva C_S nace en H, lo que significa que con un stock de H días nos aseguraríamos la total continuidad del flujo, sin ninguna interrupción en los procesos subsiguientes. En la medida en que reduzcamos este stock estaremos permitiendo retrasos en la producción. Pues bien, si no queremos que este retraso supere los 5 días, esta reducción no tendrá que pasar de este valor. De manera que a partir de H llevamos $HL = 5$ días y obtenemos el punto L. Cortando a C_S con la horizontal por L obtenemos J', abscisa que nos marca el límite del riesgo D_R a correr. El análisis lo limitaremos, entonces, al sector OJ' del eje D_R . Si el mínimo de la curva C_T cae dentro de este sector es válido el stock resultante, pero si cayera fuera, el stock a adoptar sería L.

Como apreciamos en figura 10, a nuestro ejemplo le corresponde el primer caso.

4. Detalles de su aplicación práctica: Hasta ahora hemos visto la estructura general del modelo. Cuando lo apliquemos a un caso concreto habrá que hacer un minucioso estudio del marco de condiciones operativas y administrativas a fin de establecer claramente los flujos ideal y real, que constituyen la base del mismo.

Debemos poner especial énfasis en que -como todo estudio estadístico- está basado en datos del pasado, que estos datos surgen de ciertas condiciones que pueden ir variando y que, por lo tanto, las conclusiones obtenidas son perecederas en la misma medida que varíen estas condiciones, resultando entonces indispensable su reactualización periódica. Lo ideal sería controlar mensualmente el nivel óptimo en base a una memoria móvil de un año. El proceso sería así parecido al usado en el establecimiento de límites para el control de calidad. Naturalmente, para el caso de un elevado número de items a revisar, este criterio requeriría el uso de computadora.

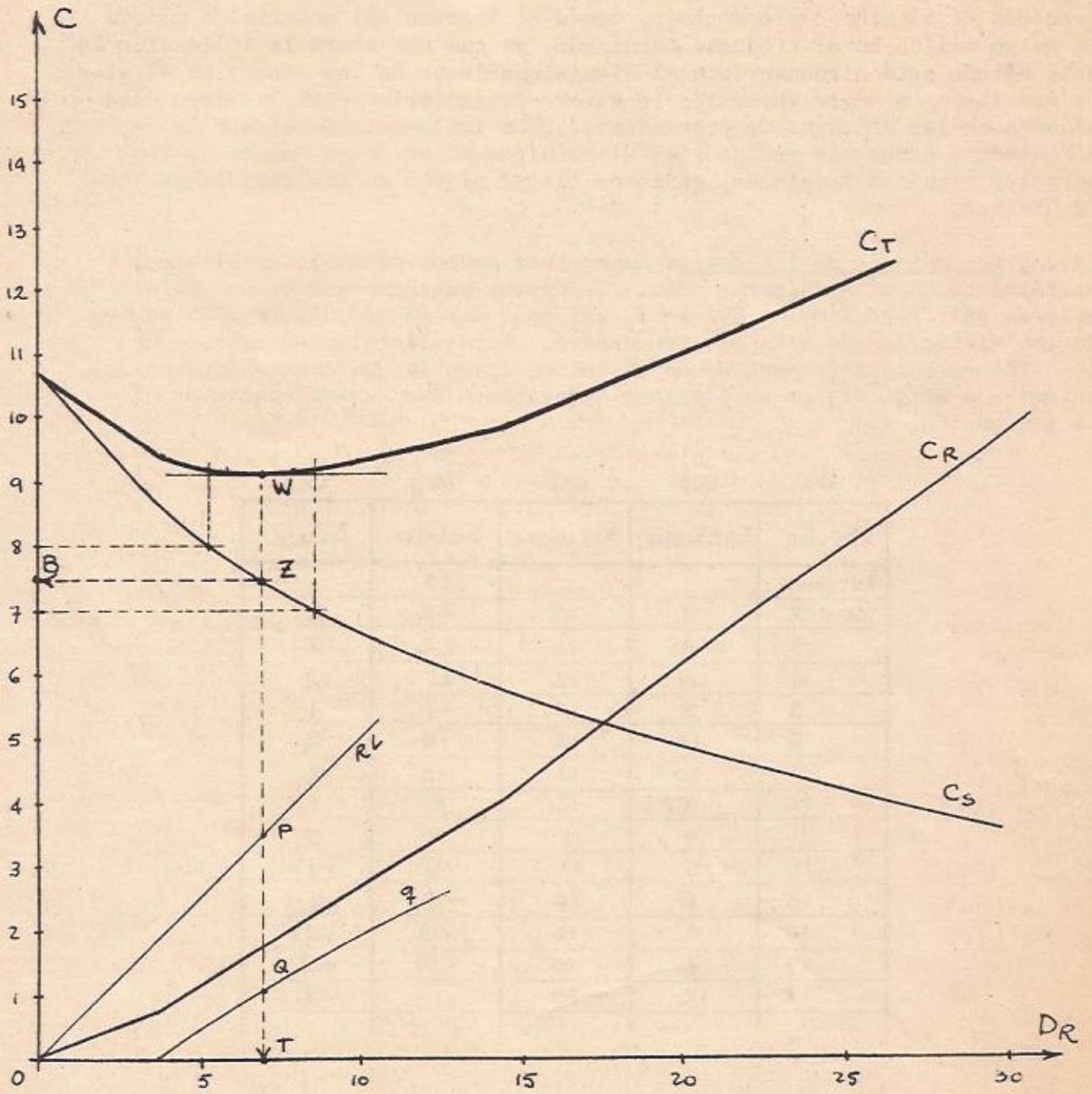


fig. 10

En la actualidad, como dijera en el resumen, el procesamiento es manual; se encuentra en experimentación, con resultados satisfactorios hasta el presente, tanto por los valores emergentes para el stock de seguridad como por la rapidez con que se efectúan los estudios (16 a 24 horas por ítem y persona). Estos tiempos incluyen compilación de datos y el análisis de los procesos de maquinado y/o montaje, desde el ingreso del material a planta hasta su salida en el producto terminado, ya que por ahora la aplicación de este método está circunscripta al dimensionamiento de los stocks en almacenes de los ítems de mayor inversión (o stocks precautorios para las irregularidades en las entregas de proveedores). De implementarse el uso de computadora estos tiempos podrían disminuirse en un orden del 60 al 70% para los estudios iniciales, pudiendo llegar al 80% en las revisiones subsiguientes.

4.1. Procesamiento de los datos: Supongamos querer dimensionar el stock en términos de días de producción. Tendremos entonces que computar los valores del flujo ideal y del real, así como los de sus diferencias acumuladas, al término de cada día productivo. Para ello dispondremos de una planilla como la representada en el cuadro 1, en la que contrastaremos los valores de estos flujos en piezas y deduciremos sus equivalencias en días de producción.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Fecha	Entrada	Salida	Saldo	Días
Anterior			23	
Nov 2	9	10	22	2
3	10	10	22	2
4	11	12	21	2
5	8	12	17	1
6	13	12	18	2
9	10	11	7	2
10	5	11	11	1
11	-	11	0	0
12	5	11	-6	-1
13	6	10	-10	-1
16	4	10	-16	-2
17	7	10	-19	-2
18	12	10	-17	-2

Cuadro 1

Explicaremos cómo obtenemos cada una de las columnas del mismo:

Columna (1): Días productivos del período estudiado.

" (2): Valores del flujo real, al término de cada día productivo.

" (3): Ídem, pero del flujo ideal, o programado.

" (4): Valores acumulados de las diferencias entre las columnas anteriores: $(4)_i = (4)_{i-1} + (2)_i - (3)_i$

Columna (5): Valores redondeados de los alcances de los saldos (4) en días de (3). Debido a que los saldos se computan al finalizar el día al que se refieren, cuando son positivos medimos su alcance a partir del día siguiente, mientras que en el caso de ser negativos empezamos a descontar días de atraso a partir del mismo al que se refiere el saldo.

Ejemplos:

$$\begin{array}{l} \text{Nov. 4: Saldo en piezas: 21} \\ 21 - 12 \text{ (Nov. 5)} = 9 \quad \rightarrow 1 \text{ día} \\ 9 < 12 \text{ (Nov. 6)} \rightarrow 9/12 > 0,5 \rightarrow 1 \text{ día} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 21 - 12 \\ 9 < 12 \end{array}} \right\} 2 \text{ días}$$

$$\begin{array}{l} \text{Nov. 5: Saldo en piezas: 17} \\ 17 - 12 \text{ (Nov. 6)} = 5 \quad \rightarrow 1 \text{ día} \\ 5 < 11 \text{ (Nov. 9)} \rightarrow 5/11 < 0,5 \rightarrow 0 \text{ día} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 17 - 12 \\ 5 < 11 \end{array}} \right\} 1 \text{ día}$$

$$\begin{array}{l} \text{Nov. 18: Saldo en piezas: -17} \\ -17 + 10 \text{ (Nov. 18)} = -7 \quad \rightarrow -1 \text{ día} \\ |-7| < 10 \text{ (Nov. 17)} \rightarrow 7/10 > 0,5 \rightarrow -1 \text{ día} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} -17 + 10 \\ |-7| < 10 \end{array}} \right\} -2 \text{ días}$$

Una vez procesado todo el período de estudio, o período base, nos fijamos en los valores extremos de la columna (5), cubrimos todos los intermedios y anotamos una cruz o bastón en el valor correspondiente a cada lectura de la columna. Obtendremos así el histograma de la distribución de frecuencias de los saldos traducidos a días de producción.

Del procesamiento del histograma obtendremos los estimadores de los parámetros μ y σ a los que designaremos por comodidad con las mismas letras.

histograma	<u>S</u>	<u>S²</u>	<u>f</u>	<u>S·f</u>	<u>S²·f</u>
X X X X X	2	4	5	10	20
X X	1	1	2	2	2
X	0	0	1	0	0
X X	-1	1	2	-2	2
X X X	-2	4	3	-6	12
Σ			13	4	36

Cuadro 2

Resulta útil disponer el procesamiento tal como lo mostramos en el cuadro 2 (con los valores del cuadro 1), pues calculamos los parámetros según los siguientes algoritmos:

$$\bar{\mu} = \frac{\Sigma S \cdot f}{\Sigma f} = \frac{4}{13} = 0,31 \quad \therefore \mu^2 = 0,94$$

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{\Sigma S^2 \cdot f}{\Sigma f} = \frac{36}{13} = 2,77$$

$$\sigma^2 = s^2 - \mu^2 = 2,77 - 0,94 = 1,83$$

$$\therefore \boxed{\sigma = \sqrt{1,83} = 1,35}$$

4.2. Análisis del histograma: Previamente a su procesamiento es conveniente analizar el sesgo del histograma a fin de detectar posibles anomalías que, una vez investigadas, habrá que decidir si se incluyen o no en el período estudiado. Teniendo en cuenta que nuestro método está basado en el efecto que sobre el flujo de materiales tienen los distintos factores de perturbación, sin discriminarlos, para excluir alguno de ellos deben existir razones que le confieran carácter de excepcional y que por consiguiente no se espere su repetición futura o que, de aparecer, haga cambiar las "reglas de juego". Tal sería, por ejemplo, el caso de un incendio o el de una huelga, tanto en la propia planta como en la de algún proveedor relacionado con el sistema en estudio. Claro que estas anomalías deben ser tenidas en cuenta previamente, pero ocurre que a veces el histograma revela detalles que habían sido pasados por alto.

Todas estas precauciones deben ser tomadas a fin de asegurarse lo que los estadísticos llaman "una muestra representativa", cuidando, no obstante, no caer en "exquisiteces" que le restarían representatividad por la razón opuesta.

Otro fenómeno muy común es que el histograma aparezca agrupado en distribuciones netamente independientes, que revelan sub-períodos de desigual desempeño. En estos casos procesaremos solamente la distribución correspondiente al período más desfavorable, es decir, la que se encuentre concentrada en el sector negativo o de menores valores para los saldos. Para aclarar este concepto adjuntamos dos ejemplos en las figuras 11a y 11b.

Las líneas de trazo lleno corresponden a los perfiles de los histogramas; en punteado tenemos las distribuciones teóricas que los podrían haber generado. Si no tomásemos en cuenta estas separaciones al procesar los datos, hallaríamos los parámetros de una única distribución, que sería la marcada con línea de trazos en ambas figuras, y esto sería obviamente poco representativo. Para el caso de la figura 11b, si bien la cola derecha es una prolongación de la distribución principal, su efecto es también distorsionante.

Estas distorsiones aumentan la dispersión de la distribución efectiva en ambos casos, haciendo aparecer al sistema con una capacidad menor de la que realmente posee para mantener, por ejemplo, un ritmo de producción. Para remediar estos efectos, antes de procesar los valores deseamos los correspondientes al sector de la derecha, a partir de la abscisa X. Este corte requiere "ojo de buen cubero", y una forma de ayudarse es el trazado previo de las funciones "madres" (en puntos, en las figuras), y hacerlo, en el caso de la 11a, donde ambas funciones se cortan, y en el de la 11b donde ésta prácticamente termine. Pero estos cortes solamente serán válidos cuando la distribución principal quede del lado de los saldos menores.

Su justificación reside en el hecho de que esta zona es la que refleja mejor el desempeño del sistema en circunstancias más críticas, en las que se ve obligado a responder directamente y dentro de sus posibilidades a las exigencias de los procesos subsiguientes, pues seguramente se habrá encontrado con su "colchón" agotado o semiagotado. Por el contrario, la porción de los saldos positivos corresponde a un ritmo anormal de su performance, ya que la producción se ha debido efectuar sin ninguna exigencia apremiante, tal vez para mantener ocupado al personal o para engrosar el "colchón" en resguardo de futuros inconvenientes. (De otra manera no podrían darse saldos positivos que equivale a producir por arriba de lo programado).

Es obvio que de no existir estas claras separaciones, se procesarán todos los valores del histograma.

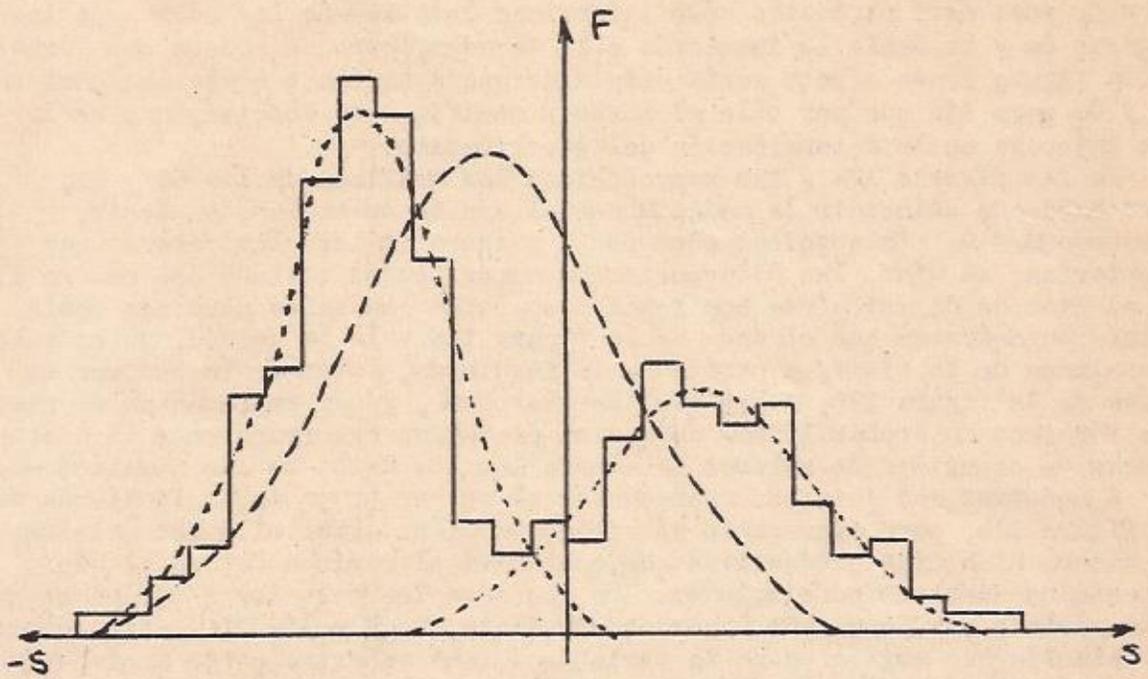


fig. 11a

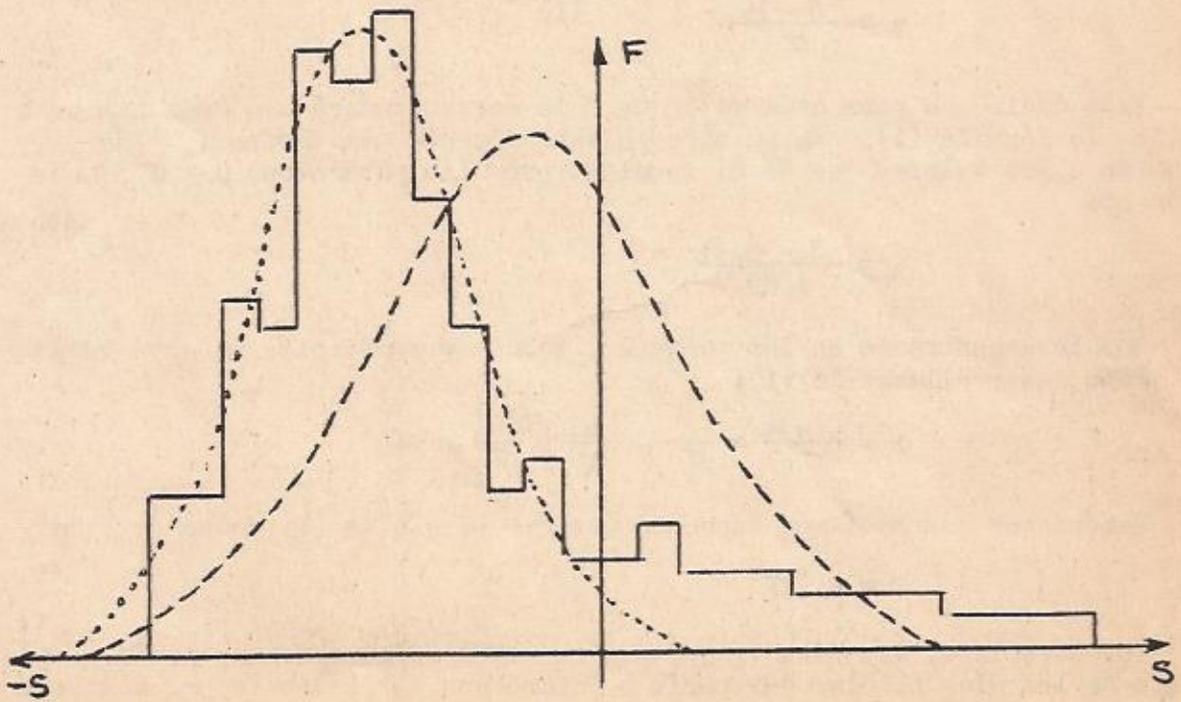


fig. 11b

4.3. Trazado de la curva $C_S = f(D_R)$: Para trazar esta curva nos valdremos del valor de σ hallado en el punto anterior. El de μ lo usaremos más adelante. Esto significa que el balanceo económico lo haremos suponiendo que $\mu = 0$, pues este parámetro sólo interviene desplazando las curvas de las figuras 6a y 6b hacia la izquierda o la derecha, pero no afecta sus formas. En la figura 10 su efecto sería desplazar hacia arriba o abajo las curvas C_S y C_T pero sin que por ello el punto W modifique su abscisa, que es lo que interesa en la determinación del stock óptimo.

En las figuras 12a y 12b reproducimos los gráficos de las 6a y 6b, pero haciendo coincidir la media μ con el eje de ordenadas, es decir, haciendo $\mu = 0$. En abscisas tenemos S, y ahora indican los valores que adoptarían, en días, las diferencias de ambos flujos (saldos del cuadro 1) en el caso de distribuirse con igual dispersión que antes pero con media nula. Supondremos que el área de la figura 12a vale la unidad, y los valores acumulados de la misma, a partir de la izquierda, están indicados por la curva de la figura 12b, a los que llamaremos α , y que representan el riesgo -en términos de probabilidad- de que se produzcan interrupciones al adoptar stocks de seguridad de valores iguales a los absolutos de las abscisas -S.

A nosotros nos interesa representar el primer tramo de la izquierda de la figura 12b, pero expresando el riesgo en días. Para ello determinamos el número N de días productivos que contendrá el período futuro al que extendemos nuestras conclusiones. En los ejemplos anteriores supusimos que este período era de un año y por consiguiente que N valía 240. Para conocer la relación que existe entre la variable S (nos referiremos de ahora en adelante al valor absoluto de la abscisa -S) y α , acudimos a tablas o curvas de los manuales de Estadística. Pero en estas tablas la función gaussiana se encuentra estandarizada, es decir, estos valores están expresados para una distribución cuyos parámetros valen: $\mu = 0$ y $\sigma = 1$.

Para estandarizar nuestra distribución no tenemos más que hacer un cambio en la variable, y que es la siguiente:

$$z = \frac{S - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Vale decir que para cada valor de S le corresponderá uno de z tal como indica la fórmula (1). En nuestro pequeño ejemplo del cuadro 1, y de acuerdo a los valores que de él resultan para los parámetros μ y σ , tendríamos:

$$z = \frac{S - 0,31}{1,35}$$

A α lo encontramos en los manuales, tabulado en función de esta variable z. Pero desarrollemos la (1):

$$z = \frac{S - \mu}{\sigma} = \frac{S}{\sigma} - \frac{\mu}{\sigma} = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

Recordemos que habíamos supuesto que $\mu = 0$. De la (2) deducimos que

$$S = z \cdot \sigma \quad (3)$$

Por otro lado, los días de ruptura esperables los obtenemos como el producto de los días totales del período futuro por el riesgo de producirse una ruptura:

$$D_R = N \cdot \alpha$$

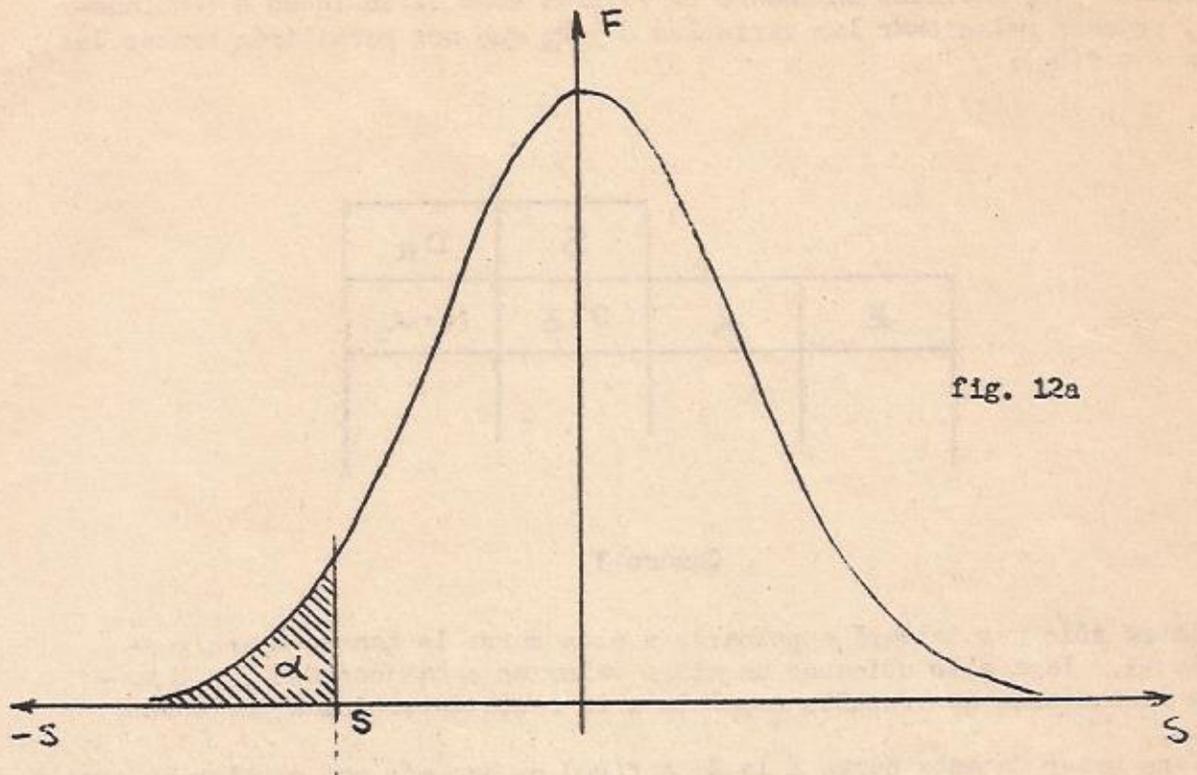


fig. 12a

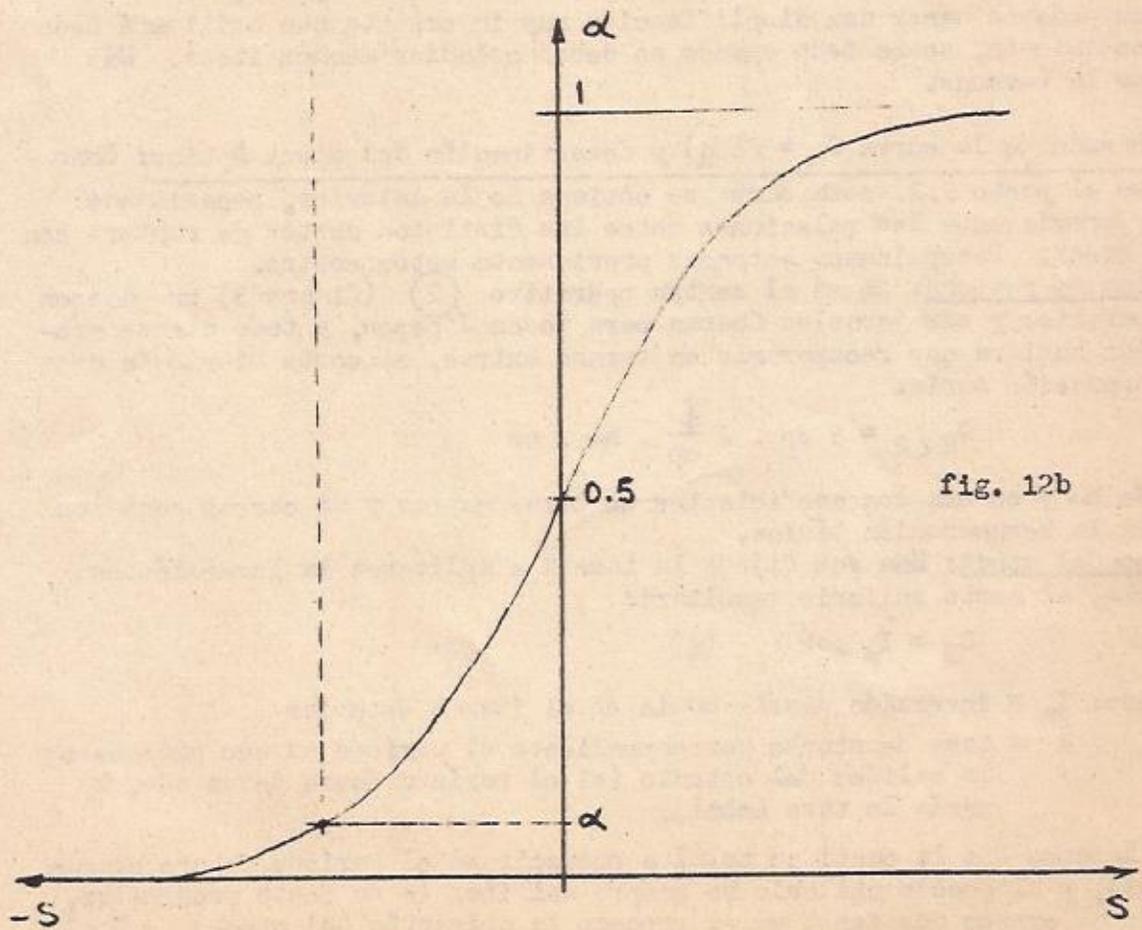


fig. 12b

Finalmente, mediante un cuadro de valores como el indicado a continuación, podemos relacionar las variables S y D_R que nos permitirán trazar la curva $S = f(D_R)$:

		S	D_R
Z	α	$\sigma \cdot Z$	$N \cdot \alpha$

Cuadro 3

Ahora sólo nos faltará empalmarle a esta curva la tangente con pendiente -1 . Para ello ubicamos un mismo valor en ambas coordenadas y trazamos la tangente que resulte paralela a la recta determinada por estos puntos.

Para pasar de esta curva a la $C_S = f(D_R)$ no hay más que cambiar la escala S por la de los costos de mantener los correspondientes stocks.

Pero podemos hacer una simplificación muy importante que agilizará todo el procesamiento, sobre todo cuando se deban estudiar muchos items. Más adelante la veremos.

4.4. Trazado de la curva $C_R = f(D_R)$ y determinación del stock óptimo: Como vimos en el punto 3.2. esta curva se obtiene de la anterior, necesitando conocer previamente las relaciones entre los distintos costos de ruptura con el del stock. Determinemos entonces previamente estos costos.

a) Costos de ruptura: Si en el centro operativo (2) (figura 3) trabajasen 5 operarios y sus jornales fueran para todos J pesos, y todo atraso producido hubiera que recuperarlo en turnos extras, el costo diario de esta recuperación sería:

$$C_{R < 2} = 5 \text{ op} \cdot J \frac{\$}{\text{op}} \cdot \text{he} \cdot \text{cs}$$

donde he y cs son los coeficientes de horas extras y de cargas sociales sobre la remuneración básica.

b) Costo del stock: Una vez fijada la tasa k a aplicar a la inversión en stocks, el costo unitario resultará:

$$C_S = I_m \cdot k \quad (4)$$

siendo: I_m = inversión diaria media en el item a estudiar

k = tasa de stocks correspondiente al período al que extendemos la validez del estudio (si el período fuera de un año, k sería la tasa anual).

Si llamamos Q a la cantidad total a producir en el período futuro considerado, p al precio unitario de compra del item (o su costo progresivo, según el avance que tenga en el proceso la ubicación del stock), y N al número de días de producción de dicho período, resultará:

$$I_m = \frac{Q \cdot D}{N}$$

Reemplazando I_m en la (4), tendremos:

$$C_S = \frac{Q \cdot D}{N} \cdot k$$

Definidos los costos, veamos cuáles le corresponderán a un punto de la curva $S = f(D_R)$ y cómo los podemos relacionar de modo de arribar a la simplificación anunciada en el punto anterior.

Costos de Stocks: $C_S = S \cdot \bar{C}_S = z \cdot \sigma \cdot \bar{C}_S$ (por (3))

Costos de Ruptura: $C_R = D_{R<2} \cdot \bar{C}_{R<2} + D_{R2/5} \cdot \bar{C}_{R2/5} + D_{R>5} \cdot \bar{C}_{R>5}$

(Aquí hemos hecho la separación del ejemplo de la figura 3 para los costos de ruptura. Recordemos que para un total D_R días de ruptura los valores $D_{R<2}$, $D_{R2/5}$ y $D_{R>5}$ corresponden a los de las distintas penetraciones en los atrasos, representados en la figura 9 por los segmentos PQ, QR y RF).

Si dividimos tanto a C_S como a C_R por $\sigma \cdot \bar{C}_S$ y decimos que $\frac{\bar{C}_R}{\sigma \cdot \bar{C}_S} = \bar{C}_R$, tendremos:

$$C_S = z$$

$$C_R = D_{R<2} \cdot \bar{C}_{R<2} + D_{R2/5} \cdot \bar{C}_{R2/5} + D_{R>5} \cdot \bar{C}_{R>5}$$

Apreciamos entonces que la curva $C_S = f(D_R)$ será ahora $z = f(D_R)$, que no es otra que la acumulada de la gaussiana estandarizada, tal como aparece en los manuales, a más de la constante N , puesto que $D_R = N \cdot \alpha$, y, por lo tanto, $z = f(D_R) = N \cdot f(\alpha)$

Como esta curva será ahora completamente general (no interviene en su trazado el valor de σ), podemos tenerla impresa en papel milimetrado (xerox o similar) y desarrollar sobre ella el resto de los trazados. Esto implicará que todos los estudios que realicemos sobre dicho impreso estarán referidos a una misma extensión del período futuro.

En la figura 13 vemos cómo sería el gráfico impreso para el caso de que N valga 240 días.

Para trazar la tangente de pendiente -1 y las curvas de atrasos y costo de ruptura debemos tener en cuenta la escala del eje z . Por ser $z = S/\sigma$, cuando S valga 1 día z valdrá $1/\sigma$ días. Ahora el punto de C_P mínimo, W , revelará un z óptimo. De aquí a hallar el stock óptimo sólo mediará multiplicar este valor de z por el de σ :

$$S_{\text{óptimo}} = \sigma \cdot z_{\text{óptimo}} \quad (5)$$

En la figura 13 hemos trazado la tangente para un caso en que σ vale 2. El trazado de las curvas C_R y C_P no lo hemos repetido por haber sido explicado en el párrafo 3.2. y ser completamente similar en esta simplificación. Solamente habrá que tener en cuenta, como dijimos recién, el valor de la escala de z y los de los costos \bar{C}_R que diferirán de los anteriores en que ahora están divididos por σ .

4.5. Stock operativo y stock de programación: El valor que hemos obtenido del stock óptimo ha surgido de considerar solamente la dispersión que presenta la distribución de los saldos, caracterizada por el parámetro σ .

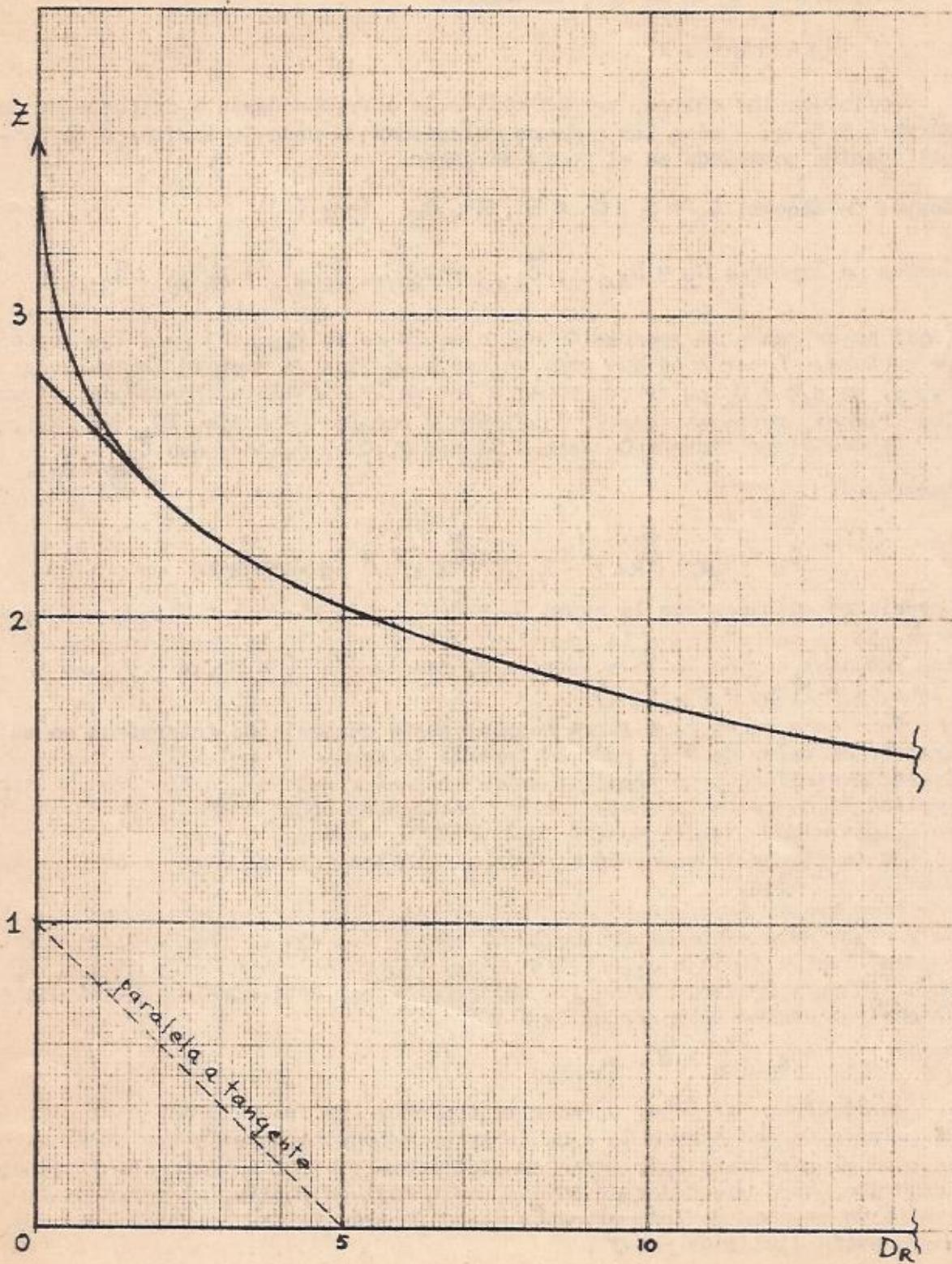


fig. 13

Pero esta dispersión se dará alrededor de un valor medio μ que en la mayoría de los casos no será nulo y que, según sea positivo o negativo, cuantificará la tendencia del sistema a estar adelantado o atrasado respecto de su programación. En general no será difícil justificar el valor de este parámetro μ , y, conocida su razón, habrá que decidir su inclusión o no en el dimensionamiento del stock de seguridad.

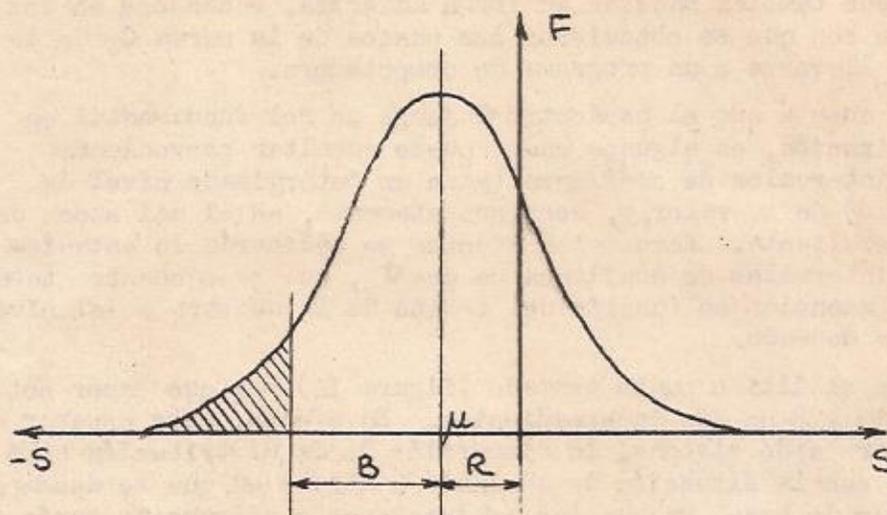


fig. 14

En la figura 14 vemos una distribución con un cierto retraso medio $\mu = -R$. La zona sombreada es la que corresponde al riesgo óptimo. Con nuestro método hemos hallado por ahora que el stock óptimo es B. Pero para correr la distribución a la derecha, de modo de dejar en el sector negativo solamente el área correspondiente a este riesgo, tendríamos que sumarlos a todos los valores de los saldos el valor $B + R$, vale decir, tendríamos que contar con un stock de seguridad de valor $B + R$. Aquí es donde es preciso conocer la causa de que el sistema se haya mantenido con tal retraso: ¿se produjo pérdida de producción con el mismo o fue tan sólo que se estuvo contando con un "colchón" sobredimensionado, el que no se cuidó mantener?

De todos modos, B es el stock operativo, el que hay que cuidar de mantener físicamente disponible, mientras que $B + R$ es el que hay que tener en cuenta en la programación.

Para expresarlos en función de los parámetros de la distribución, tendríamos:

$$\begin{aligned} \text{Stock operativo} &= \sigma \cdot z_{\text{óptimo}} \\ \text{Stock de programación} &= \sigma \cdot z_{\text{óptimo}} - \mu \end{aligned}$$

Vemos que según que μ sea positivo o negativo (adelanto o atraso), el stock de programación será menor o mayor que el de operación.

Si la reactualización de los estudios es frecuente nos despreocuparemos del causal de μ , pues se irán captando sus valores cambiantes. Pero si no es éste el caso conviene vigilar si la causa que lo originó se mantiene, a fin de que en la planta no se cuente ni con más ni con menos que el stock de conveniencia.

5. Consideraciones finales: El método expuesto es mucho más expeditivo de lo que puede suponerse a través de su exposición, un tanto engorrosa. Naturalmente, requiere una cierta compenetración.

El propósito de este trabajo impide exponer algunos aspectos más de su desarrollo, pues lo harían demasiado extenso. Sólo los mencionaremos:

- La determinación del stock óptimo, que ha sido realizada en forma gráfica, puede también hacerse en forma numérica, basándose en los mismos pasos con que se obtuvieron los puntos de la curva C_T de la figura 9, y llevarse a un programa de computadora.
- Teniendo en cuenta que el parámetro σ juega un rol fundamental en esta determinación, en algunos casos puede resultar conveniente establecer intervalos de confianza (para un determinado nivel de confiabilidad) de su valor, y, consiguientemente, en el del stock de seguridad resultante. Para tales efectos se aplicaría la estadística χ^2 de intervalos de confianza de una σ , que se encuentra tabulada en los manuales en función del tamaño de la muestra y del nivel de confianza deseado.
- Con relación al último punto tratado (figura 14) hay que hacer notar que los valores B y R no son independientes. En efecto, cabe esperar que para un determinado sistema, la dispersión de la distribución esté relacionada con la situación de adelanto o atraso en que se desempeñó en el período de base, ya que las activaciones o exigencias serán mayores a medida que el mismo se vaya atrasando. En el caso de reactualizaciones frecuentes es posible relacionar empíricamente estos valores, pudiendo así ajustar mejor el del stock operativo B.