

Política de Mantenimiento para un Sistema de Producción con Limitación en la Tasa de Producción y en la Capacidad de Almacenamiento de Inventario.

Adolfo CRESPO MARQUEZ, Rafael RUIZ USANO

Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s / n. 41092 Sevilla, Teléfono: +34 954 487215/01, FAX: +34 954 486112. e-mail: adolfo.crespo@esi.us.es, usano@us.es

RESUMEN

Este artículo estudia el problema de seleccionar políticas de mantenimiento adecuadas para el caso de un sistema de producción con tasa de producción y capacidad de almacenamiento de productos terminados en inventario limitadas. El inventario de productos terminados se diseña para salvar fallos inesperados del sistema de producción, así como para disminuir el impacto de la variabilidad del tiempo de producción y de la demanda.

Utilizando Dinámica de Sistema, se caracteriza, simula y comparan resultados obtenidos aplicando varias políticas de mantenimiento tales como: mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo basado en la edad, mantenimiento preventivo basado en la edad y el tamaño del inventario. Esta comparación es realizada asumiendo valores óptimos de los parámetros que caracterizan cada política de mantenimiento, conforme a diferentes criterios de optimalidad, y que son encontrados utilizando el método de optimización Powell modificado.

1. Introducción

El análisis del problema de optimización de mantenimiento en un sistema de producción con la tasa de producción limitada y la capacidad también limitada de inventario es importante para entender el verdadero efecto que el mantenimiento preventivo (MP) ejerce sobre el proceso de producción. En este problema, la decisión de comenzar acciones de MP sobre la unidad de producción no sólo depende de la condición de esta unidad de producción, sino también del contenido del inventario de producto final, localizado después de la unidad productiva. Como se muestra en la Figura 1, los productos son almacenados antes de ser enviados a los clientes.

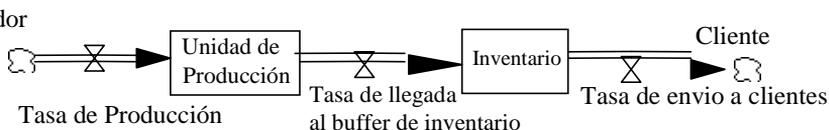


Figura 1. Sistema de producción con buffer de inventario

La política de mantenimiento adecuada a utilizar en este tipo de situaciones ha sido considerada y analizada en la literatura bajo distintos supuestos. En el párrafo siguiente revisamos algunas de las contribuciones más interesantes.

Meyer y otros (1979) presentaron un modelo para un problema similar, con un sistema de producción compuesto por una máquina con una tasa de producción más alta que la tasa de demanda y el almacenaje del inventario en exceso en un tanque de capacidad finita. Alcanzada la capacidad límite del tanque, la tasa de producción se hacía igual a la tasa de

demanda. No se permitía *Backordering*. Las medidas de rendimiento fueron obtenidas para tiempos de reparación exponenciales o constantes y tiempos de fallo tipo Poison. Hopp y otros. (1989) presentaron un modelo que asumía una política tipo (s, S) para la operación de máquina, con tiempos de fallo según Poison y tiempos de reparación exponenciales. Moinszadeh y Aggarwal (1997) presentaron un modelo similar al anterior, para reparación con tiempo constante, e incluyendo *backordering*. Asumiendo, sin embargo, que ningún fallo de la máquina ocurría cuando existía demanda en *backordering*. Simon y Hopp (1995) analizaron un sistema de montaje con dos máquinas de entrada paralelas que producían las piezas que serán introducidas en otra máquina de ensamble final. Las dos máquinas de entrada sujetas a fallo, existiendo la necesidad del almacenamiento con anterioridad a la máquina de montaje. Los tiempos de fallo y de reparación se asumieron geoméricamente distribuidos, y una cadena de Markov discreta en el tiempo fue utilizada para modelar el problema. Abboud (2001) usó un formato similar sin las restricciones de inventario que existe dentro del modelo de Hopp, pero asumieron el tiempo de fallo y de reparación constantes. Van der Duyn Schouten y Vanneste (1995) consideraron la demanda y tasa de producción constantes, y capacidad infinita en el sistema. Wijngaard (1979), Posner y Berg (1989), y Meller y Kim (1996) estudiaron igualmente la fiabilidad de una cadena de producción con dos máquinas y un buffer intermedio. En estos últimos estudios, procesos de decisión semi-markovianos (PDSM) fueron utilizados, junto a técnicas de programación dinámica para la optimización de las soluciones.

Aparte de los modelos de tipo estocástico anteriormente señalados, hay pocas contribuciones en la literatura en cuanto a la utilización de modelos de simulación para realizar este tipo de análisis (Abboud, 2001) en sistemas de producción complejos. Algunas excepciones son Kenne y otros (1997), o Garbi y Kenne (2000), quienes usan la combinación de los enfoques analítico y de simulación para encontrar una solución óptima que reduzca al mínimo una función de coste de tipo backlog/inventario. En este papel artículo generalizamos los criterios de optimalidad del problema (tradicionalmente una función de coste), añadimos limitaciones al flujo de producción, y consideramos la variabilidad en la demanda y en el tiempo de producción (lead time). El tiempo de fallo se asume aleatorio. Sin embargo, los tiempos de las intervenciones de mantenimiento preventivas y correctivas son asumidos constantes. Proponemos el empleo de la Dinámica de Sistema (SD) como una opción para modelar el problema. Finalmente, un algoritmo de optimización del tipo Powell modificado es usado para encontrar las soluciones de mantenimiento óptimas para varios escenarios y para criterios de optimalidad diferentes. Mostramos la importancia de la definición de criterios de optimalidad a pesar del diseño de política de mantenimiento. Nuestro enfoque proporciona ventajas considerables que incluyen menos complejidad de formato modelo, una fácil gestión de los datos, el análisis y entendimiento de los bucles de realimentación entre las variables fundamentales del problema, la clara explicación de comportamiento de sistema, y la utilización de herramientas de optimización rápidas.

El resto del artículo queda organizado de la siguiente forma: En la sección 2 se modela el sistema de producción a estudiar y las políticas de mantenimiento que van a ser comparadas. Las medidas de rendimiento y los métodos usados para optimizar los parámetros de la política de mantenimiento se discuten en la sección 3. Los resultados de simulación y de los esfuerzos de optimización son presentados y discutidos en la sección 4. Finalmente, la Sección 5 concluye el artículo con un resumen de las conclusiones y algunas recomendaciones útiles para la investigación futura.

2. Modelo del sistema de producción

La unidad de producción está sujeta a fallos, y requiere mantenimiento correctivo (MC) para restaurar la condición de la misma después de cada fallo. Durante el período de mantenimiento, la unidad de producción no trabaja, lo que también puede conducir a problemas de cumplimiento de la demanda del cliente. El mantenimiento correctivo (MC) y preventivo (MP) requiere que el sistema no esté en funcionamiento, pero el MP consume menos tiempo que MC. Asumimos que los clientes finales no esperan aquellos productos no entregados a tiempo, y por lo tanto los pedidos no suministrados a tiempo serán ventas perdidas. También se asume que la unidad de producción, que tiene limitada la capacidad de flujo, nunca se detiene con motivo de posible carencia de aprovisionamientos. La capacidad del inventario de esta unidad de producción es finita y ha sido determinada en la fase de diseño del sistema. El tamaño deseado del buffer de inventario deseado, puede ser dinámicamente estimado de acuerdo a la variabilidad del tiempo de producción de la unidad, y la variabilidad de demanda del cliente final.

Si bien no se incluye en el trabajo la formulación matemática completa del modelo, se presenta a continuación la notación utilizada (completa), para dar una idea del alcance y complejidad del modelo, y para facilitar la interpretación de resultados posteriormente presentados.

➤ Variables del flujo de información

- B_{t-1} : backlog en $t-1$,
- CA_t : descenso en la edad del sistema con motivo de un MC en t ,
- D_t : pedidos de unidades recibidos en el período t ,
- F_t : previsión de la demanda en el período t ,
- FR_t : fill Rate del sistema desde 0 a t ,
- LC_t : tiempo de comienzo del último MC, para un sistema en t ,
- LP_t : tiempo de comienzo del último MP, para un sistema en t ,
- PA_t : descenso en la edad del sistema con motivo de un MP en t ,
- PO_t : órdenes de producción lanzadas en t ,
- PSW_t : interruptor tasa de producción (en base al mantenimiento y nivel de inventario),
- RN_t : numero aleatorio con valores en el intervalo (0,1), generado en t ,
- STM_t : parada del flujo de producción por mantenimiento,
- STB_t : parada del flujo de producción por alcanzarse máxima capacidad de inventario,
- SL_t : nivel de servicio del sistema desde 0 a t ,
- S_t : pedidos enviados finalmente al cliente en t ,
- ss_t : tiempo deseado de permanencia de una unidad en stock,
- T_t : edad del sistema en t ,
- TI_t : aumento de la edad del sistema en el período t ,
- TO_t : disminución de la edad del sistema en el período t ,
- σ_t : desviación típica de la demanda durante el lead time en t ,
- σ_{L_t} : desviación típica del lead time,
- $\lambda(T_t)$: tasa de fallos del sistema en t ,

➤ Variables del flujo de materiales:

- I_t : tasa de producción, entrada al trabajo en proceso en el período t ,
- INV_t : inventario de producto terminado, inventario en mano, en t ,
- O_t : salida de la línea de producción en el período t ,
- S_t : unidades enviadas finalmente al cliente en el período t ,
- WIP_t : trabajo en proceso en t .

➤ Parámetros del modelo:

- AD : demanda promedio,
- CT : tiempo medio de una intervención de MC,
- CC : coste promedio, por unidad de tiempo, de una intervención de MC,

- k : cota inferior de inventario requerido para poder realizar una intervención de MP,
- K : máxima capacidad del almacén de producto terminado,
- MPR : máxima tasa de producción,
- L : tiempo de producción (lead time),
- n : edad mínima del sistema a partir de la cual realizar MP,
- N : máxima edad del sistema para realizar MP,
- PC : coste promedio, por unidad de tiempo, de una intervención de MP,
- PT : tiempo medio de una intervención de MP,
- TI : tiempo máximo de funcionamiento del sistema sin fallo,
- Z : factor de seguridad (en base al nivel de servicio deseado),
- α : factor de alisamiento al realizar la previsión de la demanda,
- β_S : coeficiente fraccional de ajuste para el inventario de producto terminado,
- β_{SL} : coeficiente fraccional de ajuste para el inventario en proceso,
- σ_D : desviación típica de la demanda.

2.1. Modelado del flujo de información y del flujo de materiales

2.1.1. Modelado del flujo de materiales

En el modelo, ase asume que los pedidos recibidos (D_t) se intentan inmediatamente suministrar a los clientes. Sin embargo, pueden existir limitaciones de inventarios que reduzcan la cantidad final que se envía, S_t , y por lo tanto, que ocasionen la correspondiente pérdida de ventas.

2.1.2. Modelado del flujo de información.

Para lanzar las órdenes de producción, primero se obtiene una previsión de la demanda en la ecuación (6-2), donde utilizamos un alisamiento exponencial, práctica extensamente utilizada en este tipo de modelos (ver por ejemplo Chen et al., 1999), y que es considerada una práctica muy popular (Sanders, 1994). Para escoger los valores apropiados de α , se sugiere al lector consultar a Makridakis et al. (1998).

$$F_t = \alpha D_t + (1-\alpha) F_{t-1} \text{ with } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (6-2)$$

Luego, se estima el nivel de stock de seguridad deseado, para lo cual se asume que la disponibilidad de inventario se mide en termino de probabilidad de no-rotura de stock por ciclo de pedido (Evers, 1999). En este caso, el stock de seguridad puede modelarse como una función del nivel de servicio ofrecido al cliente y de la desviación típica de la demanda durante el tiempo de producción (Tersine, 1994). Si se asume además que las distribuciones de la demanda y tiempo de producción son independientes una de la otra, la desviación típica de la demanda durante el período de producción puede calcularse como sigue:

$$ss_t = Z\sigma_t = Z((L\sigma_{D_t}^2 + \sigma_{L_t}^2 AD^2)^{1/2}/AD) \quad (7-3)$$

Donde ss_t se expresa en unidades de tiempo utilizando la demanda media (AD) en el denominador de la ecuación (7-3), y Z es un factor de seguridad, calculado en función al nivel de servicio que desea ofrecerse a los clientes. Para seleccionar valores adecuados de Z , el lector puede consultar Aucamp y Barringer (1987). Para tener en cuenta el impacto de la política de mantenimiento actual, se supone que la variabilidad del tiempo de proceso (σ_{L_t}) se revisa de forma periódica. Finalmente, las órdenes de producción a colocar se calculan utilizando una heurística de anclaje y ajuste (Tversky and Kahneman, 1974), la cual puede aplicarse a este tipo de toma de decisiones (Serman, 1989), y por lo tanto, la cantidad a producir en el tiempo t , PO_t , se obtiene con la ecuación (8-4):

$$PO_t = \text{Max}(F_t + \beta_S(F_t ss_t - INV_t) + \beta_{SL}(F_t L - WIP_t), 0) \quad (8-4)$$

2.1.3. Obtención de la tasa de producción

La tasa de producción, se define entonces según las órdenes de producción colocadas (8-4), y teniendo en cuenta al mismo tiempo las condiciones del sistema que pueden parar la unidad de producción: el mantenimiento que se lleva a cabo, y/o el alcance de la capacidad máxima del inventario. Al mismo tiempo, la tasa de producción no podrá exceder la tasa máxima (MPR).

$$I_t = \text{Min}(PO_t \text{ PSW}_t, \text{MPR}) \quad (9-5)$$

Como se aprecia en la ecuación (9-5), la tasa de producción se formaliza multiplicando las órdenes de producción colocadas por la variable PSW (interruptor de la tasa de producción), que colocara a cero la tasa en caso que se alcance la máxima capacidad de inventario, o que se esté realizando mantenimiento. PSW se define entonces como sigue:

$$\text{PSW}_t = \text{STM}_t \text{ STB}_t \quad (10-6)$$

Donde STM_t hace que se pare el sistema durante el mantenimiento, mientras que STB_t hace lo mismo en el caso que se alcance la máxima capacidad de unidades en inventario.

2.2. Modelado de la política de mantenimiento

Se formalizan una serie de políticas de mantenimiento, alguna de ellas políticas básicas¹ en función exclusivamente a la edad del sistema, y otras considerando el tamaño del inventario de producto terminado como otra variable de control de la política de mantenimiento².

2.2.1. MP basado en la edad del sistema

Para este tipo de política de mantenimiento, si el sistema de producción no falla antes de un determinado período de tiempo n , entonces se mantiene preventivamente. En cualquier otro caso, se realiza mantenimiento correctivo en el momento del fallo.

2.2.2. MP basado en la edad del sistema y en el tamaño del inventario

En este caso, la decisión de comenzar una acción de MP dependerá no solo de la edad del sistema de producción (T_t), sino también del contenido del inventario (INV_t).

2.2.3. MP, basado en edad y tamaño de inventario modificado

En esta ocasión, el mantenimiento preventivo será realizado cuando el sistema alcanza n periodos sin fallar, antes de llegar a ser muy viejo (N periodos), y mientras que el inventario sea mayor que un cierto nivel de stock k . Estas políticas de mantenimiento preventivo se denominan como políticas de clase (n, N, k) en Van der Duyn Schouten y Vanneste (1995).

3. Optimización de la política de mantenimiento

3.1. Método de optimización

Entre técnicas de optimización numéricas, el método directo de búsqueda que no evalúa el gradiente, es uno de los más convenientes para el análisis de la dinámica de sistemas de

¹ El lector puede consultar Dohi et al. (2000) donde hay una revisión de las políticas de mantenimiento y sus variaciones.

² Una política similar se formula en Van der Duyn Schouten y Vanneste (1995).

control complejos no lineales. El método Powell (Powell, 1964), es conocido por tener una convergencia rápida entre métodos directos de búsqueda. Este método fue posteriormente revisado, denominándose método Powell Modificado (1968).

3.2. Selección de medidores y funciones objetivo

- *Nivel de Servicio (Service Level - SL)*, es el porcentaje de ciclos de pedido que el sistema supera sin rotura de stock (Coleman, 2000).
- *Nivel de entrega (Fill Rate - FR)*, es el porcentaje de unidades demandadas que estaban en stock en el momento en que fueron demandadas. Note como, matemáticamente, el nivel de entrega va a ser más alto que el nivel de servicio prácticamente en cualquier circunstancia (Coleman, 2000).
- *Utilización de la unidad de producción (U)*, es el porcentaje de períodos de tiempo los que la unidad de producción está funcionando.
- *Disponibilidad de la unidad de producción (Availability-A)*, es el porcentaje de períodos de tiempo que el sistema está disponible, i.e. que podría funcionar si fuese requerido. Note como la disponibilidad será, matemáticamente, más alta o igualará a la utilización (U), en cualquier circunstancia.
- *Inventario medio (MI)*, es la media del valor del inventario de productos terminados a lo largo del horizonte de simulación.
- *Coste de mantenimiento (MC)*, es el coste total de mantenimiento a lo largo del horizonte de simulación.

Es razonable esperar que, por lo que respecta a criterios de toma de decisiones, haya diferentes tipos de “direcciones” de mantenimiento, que den diferente peso relativo a cada una de estos medidores. En este artículo se han seleccionado dos “perfiles tipo” de direcciones de mantenimiento, que reflejan el distinto nivel de integración existente de la función mantenimiento a la hora de tomar decisiones dentro del sistema de producción:

- *Perfil A_MC*: la dirección de mantenimiento incluida en este perfil tomaría decisiones de optimización de acuerdo a un criterio local de mejora de la disponibilidad de la maquinaria, intentando al mismo tiempo minimizar el coste de mantenimiento
- *Perfil FR_MI*: la dirección de mantenimiento representada por este perfil intentaría optimizar el mantenimiento con un criterio más global, para conseguir una mejora del nivel de entrega a los clientes, minimizando al mismo tiempo el nivel de inventario de producto terminado.

4. Simulaciones y resultados de la optimización

A continuación se presentan los resultados para un conjunto de escenarios. Cada escenario se caracteriza mediante un tipo de perfil de dirección, un tiempo de mantenimiento correctivo, y una política de mantenimiento empleada (la cual se define mediante una serie de parámetros).

$X_{CT}\{y^*\}$:	{	<p>X la</p> <p>CT</p> <p>{y*}</p>	<p>Función objetivo seleccionada para optimizar los parámetros de política de mantenimiento (definirá los pesos w_a, w_{mc}, w_{jr} y w_{mi}).</p> <p>Tiempo promedio de una acción de MC.</p> <p>parámetros que caracterizan la política de mantenimiento. Los valores mejores para estos parámetros se obtendrán optimizando</p>
		X.	

Por ejemplo, A_MC_2_n*_k* describe el escenario donde se ha elegido maximizar la disponibilidad mientras se minimiza el coste de mantenimiento del sistema (perfil A_MC, en este ejemplo³ con $w_a = 3$, $w_{mc} = -1$, $w_{fr} = 0$, y $w_{mi} = 0$), donde la acción de MC dura un promedio de 2 días (frente a sólo 1 día de la acción de MP), y donde la política de mantenimiento utilizada está basada en la edad del sistema de producción (n) y en el nivel de inventario (k), conforme a la sección 2.2.2.

Todos los escenarios tendrán igual valor de la demanda ($N(60,20)$), y de los siguientes parámetros: MPR : 100 ud/día, L : 5 días, α : 0.5, β_S : 1 día⁻¹, β_{SL} : 1 día⁻¹, PT : 1 día, TI : 40 días, AD : 60 uds/día, e idénticas condiciones iniciales. Sin embargo, otra serie de parámetros dependerán de cada escenario.; w_a, w_{mc}, w_{fr} y w_{mi} pueden cambiar de acuerdo al perfil de la dirección de mantenimiento que se considere en cada caso; CT cambiará de acuerdo al tiempo requerido para realizar una intervención de MC que se asuma en cada escenario; y n , N , k , y K dependerán de la política de mantenimiento que se evalúa en cada momento, y se obtendrán para cada escenario particular, y como resultado de la optimización utilizando el método Powell.

Para los resultados de la tabla 1, el límite de almacenamiento nunca se alcanza ($K=500$). Por lo tanto, la producción nunca para con motivo de esta limitación, si bien se puede alcanzar la limitación en tasa de producción ($MPR=100$ unidades/día) más frecuentemente. La utilización del sistema es prácticamente igual a su disponibilidad para cualquier escenario. Las actividades de mantenimiento pararán al sistema, para forzarlo luego en su trabajo si quiere conseguir el objetivo marcado. Los resultados muestran la importancia del criterio de optimalidad a la hora de seleccionar los valores de los parámetros de la política de mantenimiento. Este factor parece ser más importante que la propia política de mantenimiento, especialmente en aquellos casos en los que el mantenimiento correctivo tiene un mayor impacto negativo ($CT=10$).

ESCENARIO	PESOS DE LA FUNCIÓN OBJETIVO $w_a, w_{mc}, w_{fr}, w_{mi}$	RESULTADOS OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS $n^*, N^* \text{ \&/or } k^*$	RESULTADOS OPTIMIZACIÓN DE						
			SL	FR	U	A	MI	MC	
CORRECTIVE_2 ⁴			99	100	93	93	10	19	
A_MC_2_n*	3,-1,0,0	15	99	100	92	92	11	13	
A_MC_2_n*,k*	3,-1,0,0	15,5	99	100	92	92	11	13	
A_MC_2_n*,N*,k*	3,-1,0,0	15,35,5	99	100	92	92	11	13	
F_MI_2_n*	0,0,3,-1	11	99	100	91	91	11	11	
F_MI_2_n*,k*	0,0,3,-1	11,5	99	100	91	91	11	11	
F_MI_2_n*,N*,k*	0,0,3,-1	11,40,5	99	100	91	91	11	11	
CORRECTIVE_10			82	85	63	63	19	100	
A_MC_10_n*	3,-1,0,0	3	91	91	70	70	14	43	
A_MC_10_n*,k*	3,-1,0,0	4,5	91	92	72	72	14	44	
A_MC_10_n,N,k	3,-1,0,0	4,35,5	91	92	72	72	14	44	
F_MI_10_n*	0,0,3,-1	1	92	97	65	65	7	14	
F_MI_10_n*,k*	0,0,3,-1	1,28	93	98	66	66	8	14	
F_MI_10_n*,N*,k*	0,0,3,-1	1,40,28	93	98	66	66	8	14	

³ Observese que w_a , y w_{mc} , podrían tomar distintos valores dentro del mismo tipo de dirección de mantenimiento seleccionado (por ejemplo: $w_a=1$, $w_{mc}=-1$, en este caso el decisor daría igual importancia a maximizar la disponibilidad que a minimizar el coste de mantenimiento), en este artículo presentamos un caso particular, donde el decisor da tres veces más importancia a maximizar la disponibilidad que a minimizar el coste.

Tabla 1. Resultados para medidores cuando no hay limitación de inventario (K=500 unidades)

Los resultados que se presentan en la tabla 2 se han obtenido para simulaciones con una capacidad máxima de inventario (K) de 100 unidades, y con una tasa de producción máxima (MPR) de 100 unidades/día. Estas circunstancias fuerzan al sistema a trabajar en condiciones más duras. Las restricciones de inventario de producto terminado, que actúan en muchas ocasiones, son la causa principal de la diferencia entre disponibilidad y utilización en la mayoría de los casos.

ESCENARIO	PESOS DE LA FUNCIÓN OBJETIVO $W_a, W_{mc}, W_{fr}, W_{mi}$	RESULTADOS OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS $n^*, N^* \text{ &/or } k^*$	SL	FR	U	A	MI	MC
			CORRECTIVE_2_10			75	77	47
A_MC_2_10_n*	3,-1,0,0	16	74	78	47	95	100	11
A_MC_2_10_n*,k*	3,-1,0,0	10,54	75	78	47	95	100	8
A_MC_2_10_n*,N*,k*	3,-1,0,0	9,35,48	75	78	47	95	100	6
F_TI_2_10_n*	0,0,3,-1	1	83	89	55	68	57	8
F_TI_2_10_n*,k*	0,0,3,-1	1,1	83	89	55	68	57	8
F_TI_2_10_n*,N*,k*	0,0,3,-1	1,10,1	83	89	55	68	57	8
CORRECTIVE_10_10			66	69	41	68	99	92
A_MC_10_10_n*	3,-1,0,0	7	69	73	44	80	100	47
A_MC_10_10_n*,k*	3,-1,0,0	5,33	71	74	45	87	100	27
A_MC_10_10_n,N,k	3,-1,0,0	3,23,28	70	74	44	87	100	27
F_TI_10_10_n*	0,0,3,-1	1	83	89	55	68	57	14
F_TI_10_10_n*,k*	0,0,3,-1	1,1	83	89	55	68	57	14
F_TI_10_10_n*,N*,k*	0,0,3,-1	1,1,40	83	89	55	68	57	14

Tabla 2. Resultados mapa medidores cuando hay limitación de capacidad de inventario (K=100)

En la tabla 2 puede apreciarse como cuando existen este tipo de condiciones de operación, la correcta elección del criterio de optimalidad es realmente importante. Para CT=10, el perfil FR_MI ofrece mejores resultados incluso para medidores que no están incluidos dentro de la función objetivo del perfil (esto sucede con MC, a sabiendas de que MC está en la función objetivo del perfil A_MC y no en la del perfil FR_MI) como consecuencia de la correcta selección de los parámetros. Si bien los valores para la disponibilidad son mejores en el perfil A_MC, que para cualquier política considerando el perfil FR_MI, la utilización del sistema es mucho mejor que la disponibilidad cuando el criterio de optimalidad utilizado para seleccionar los parámetros de cada política esta basado en medidas operacionales globales.

5. Conclusiones

Este artículo estudia el impacto de las políticas de mantenimiento, y del criterio de optimalidad elegido para la selección de los parámetros que caracterizan a esas políticas, en la operación de un sistema de producción con tasa de producción y capacidad de inventario final limitadas. Aunque ambos factores impactan en el funcionamiento del sistema, los resultados presentados indican que la selección de un criterio adecuado de optimalidad, para la obtención de los valores de los parámetros que caracterizan a la política de mantenimiento, es un aspecto crítico. Los resultados empíricos muestran igualmente la importancia de basar este criterio de optimalidad en medidores operacionales globales, más que en medidores locales de mantenimiento. Este factor, es de gran importancia conforme el sistema presenta mayores limitaciones en la capacidad de producción y de almacenamiento. Investigaciones futuras podrían explorar los beneficios relativos de los diferentes criterios de optimalidad para

⁴ CORRECTIVE_2 , significa que sólo se realiza mantenimiento correctivo y que CT=2.

problemas industriales específicos, o también podrían considerar criterios técnicos particulares respecto al diseño de la política de mantenimiento adecuada para ciertos equipos. Un ejemplo podría ser la consideración de la fiabilidad del sistema de producción como otro criterio de optimalidad, que podría ser ponderado convenientemente si se desea aumentar los tiempos de ciclo de mantenimiento. Otra posibilidad sería estudiar la sensibilidad del sistema a las limitaciones en la tasa de producción, etc.

6. Agradecimientos

Agradecemos a Antonio Sánchez Herguedas, co-autor del trabajo original, por admitir que se presentase este trabajo al CIO2002 en su forma actual por exigencias de ADINGOR y de la organización del congreso.

7. Referencias bibliográficas

- Abboud, N.E. 2001. *A discrete-time Markov production-inventory model with machine breakdowns. Computers and Industrial Engineering.* 39. 95-107.
- Aucamp, D.C., Barringer, R.L. 1987. A table for the calculation of safety stock. *Journal of Operations Management.* 7 (1&2). October. 153-163.
- Buzacott, J.A., Shanthikumar, J.G. 1993. *Stochastic models of manufacturing systems.* Englewood Cliffs. NJ. Prentice-Hall.
- Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K., Simichi-Levy, D., 1999. The bullwhip effect: managerial insights on the impact of forecasting and information on variability in a supply chain. *Quantitative models for supply chain management.* International Series in Operations Research & Management Science, 17, Ed. Mayur, Ganeshan & Magazine. 419-439.
- Coleman, B.J.. 2000. Determining the correct service level target. *Production and Inventory management Journal.* 41(2), 19-23.
- Dohi, T., Kaio, N., Osaki, S. 2000. Basic preventive maintenance policies and their variations. *Maintenance Modeling and Optimization.* Ben-Daya, Duffuaa and Raouf Editors. Kluwer Academic Publishers. 155-183.
- Evers, P.T., 1999. The effect of lead times on safety stocks. *Production and Inventory Management Journal.* 40 (2), 6-10.
- Gharbi, A., Kenne, J.P. 2000. Production and preventive maintenance rates control for a manufacturing system: An experimental design approach. *International Journal of Production economics.* 65. 275-287.
- Kenne, J.P., Gharbi, A. Boukas, E.K. 1997. Control policy simulation based on machine age in a failure prone-machine, one-product manufacturing system. *International Journal of Production Research.* 35. 1431-1445.
- Hopp, W.J. Pati, N., Jones, P.C. 1989. Optimal inventory control in a reduction flow system with failures. *International Journal of Production Research.* 27. 1367-1384.
- Liu, B., Cao, J. 1999. Analysis of a production-inventory system with machine breakdowns and shutdowns. *Computers and Operations Research.* 26. 73-91.
- Makridakis, S., Wheelwright, S., Hyndman, R., 1998. *Forecasting methods and applications.* John Wiley and Sons, New York, NY.
- Meller, R.D., Kimb, D.S. 1996. The impact of preventive maintenance on system cost and buffer size. *European Journal of Operational Research.* 95 (3). 577-591.
- Meyer, R.R., Rothkopf, M.H., Smith, S.A. 1979. Reliability and inventory in a production-storage system. *Management Science.* 25. 799-807.

- Moinzadeh, K., Aggarwal, P. 1997. Analysis of a production/inventory system subject to random disruptions. *Management Science*. 43. 1577-1588.
- Posner, M.J.M., Berg, M. 1989. Analysis of a production-inventory system with unreliable production facility. *Operations Research Letters*. 8. 339-345.
- Powell, M.J.D.1964. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Computer Journal*. 7(2). 155-62.
- Powell, M.J.D.1968. On the calculation of orthogonal vectors. *Computer Journal*. 11(2). 302-304.
- Sanders, N. R. 1994. Forecasting practices in United-States corporations. Survey results. *Interfaces*. 24(2), 92-100.
- Simon, J.T., Hopp, W.J. 1995. Throughput and average inventory in discrete balanced assembly systems. *IIE Transactions*, 267, 368-373.
- Sterman, J. D., 1989. Modeling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science*, 35(3), 321-339.
- Tersine, R.J., 1994. *Principles of Inventory and Materials management*. 4th. Edition. Englewood Cliffs. NJ. Prentice-Hall.
- Tversky, A., Kahneman D., 1974. Judgement under uncertainty. heuristics and biases. *Science*, 185, 1124-1131.
- Van der Duyn Schouten, F.A., Vanneste, S.G., 1995. Maintenance optimization of a production system with buffer capacity. *European Journal of Operations Research*. 82. 323-338.
- Wijngaard, J. 1979. The effect of interstage buffer storage on the output of two unreliable production units in series, with different production rates. *AIIE Transactions*. 11. 42-47.