

## **Comparación multiobjetivo de las reglas de prioridad en un sistema de control de la producción tipo drum-buffer-rope\* .**

**Pedro L. González Rodríguez<sup>1</sup>, José M. León Blanco<sup>1</sup>, Rafael Ruiz Usano<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Camino de los descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla. [pedroluis@esi.us.es](mailto:pedroluis@esi.us.es), [miguel@esi.us.es](mailto:miguel@esi.us.es), [usano@esi.us.es](mailto:usano@esi.us.es).

### **Resumen**

*TOC apareció en los años 80 y su funcionamiento se basa en la explotación las restricciones del sistema. TOC tiene una implementación a nivel operacional, conocida como el sistema DBR (Drum-Buffer-Rope) de control de la producción, el cual trata de sincronizar la entrada de los trabajos con el cuello de botella del sistema. En un entorno multiproducto el funcionamiento del sistema DBR está fuertemente afectado por las reglas de entrada empleadas en el buffer precedente al cuello de botella. Este tema ha sido tratado con anterioridad por algunos autores, pero no desde el punto de vista de la robustez de las soluciones en un entorno multiproducto. Nosotros lo abordamos aplicando métodos Taguchi. Los resultados muestran que, para los escenarios estudiados, los mejores resultados son obtenidos por las reglas de entrada basadas en la fecha de terminación.*

**Palabras clave:** Control de la producción, teoría de las restricciones, drum-buffer-rope, multiobjetivo, Taguchi.

### **1. Introducción**

El sistema DBR posee una fuerte relación entre el buffer precedente al cuello de botella y el mecanismo de control de entrada de trabajos en el sistema. Por tanto las reglas de prioridad en dicho buffer pueden jugar un papel muy importante en el funcionamiento global del sistema por lo que creemos importante realizar un estudio entre las reglas de prioridad más utilizadas para dicho buffer bajo diferentes condiciones de operación, con el objetivo de seleccionar la más robusta. Esto se realizará empleando la metodología de Taguchi de diseño robusto (ver Taguchi, 1986), ampliamente utilizada en problemas de selección desde el punto de vista de la robustez de los sistemas. Las condiciones de entorno estudiadas en el presente trabajo incluyen tiempos de set-up, averías de máquinas y desequilibrio de líneas. Por otra parte, hay que considerar que trabajos previos en este tema sólo han considerado una única característica como respuesta en la salida del sistema, mientras que es muy común en la práctica considerar varios objetivos, generalmente de carácter contrapuesto. En el presente trabajo se consideran tres características de funcionamiento del sistema: el nivel de servicio, el retraso medio y el inventario en proceso. Por ello, obtenemos el conjunto de soluciones eficientes de Pareto respecto las respuestas del sistema para cada experimento. Dicha frontera de Pareto se

---

\* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación con financiación procedente del Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto DPI2004-02902) y con cofinanciación proveniente del Fondo europeo de desarrollo regional (FEDER).

empleará para comparar la afinidad de cada regla de prioridad mediante el empleo de la distancia  $D_1R$  entre conjuntos de puntos (ver Hansen y Jaskiewicz 1998).

El resto del trabajo se organiza como sigue: en la sección 2 se describe brevemente el sistema DBR de control de la producción. La sección 3 describe las condiciones de experimentación, tales como la descripción de la línea, parámetros de simulación, reglas de prioridad, escenarios y medidas de funcionamiento del sistema. En la sección 4 se describe la metodología de diseño robusto de Taguchi, empleada para analizar los resultados de los experimentos. En la sección 5 se muestran los principales resultados de los experimentos. La última sección se dedica a obtener conclusiones y apuntar futuros trabajos de investigación.

## **2. El sistema DBR de control de la producción**

El sistema de control de la producción DBR se deriva de la teoría de las restricciones, TOC, introducido por Goldratt durante los años 80 (ver por ejemplo Goldratt y Cox, 1984). Esta metodología fue el resultado de estudios previos y el desarrollo del software de planificación de la producción conocido como OPT (Optimized Production Technology). Actualmente los conceptos de TOC se han abierto al campo de la dirección de la producción, siendo dicha extensión conocida como TP (Thinking Process) (ver Goldratt 1990 y 1994). Un gran número de compañías han aplicado TOC exitosamente. En Mabin y Balderstone (2000) se muestra una revisión de ochenta y dos compañías que han aplicado TOC.

TOC es implementado a nivel operacional por medio del sistema de control de la producción DBR. El sistema DBR se compone de tres elementos: drum, buffer y rope (tambor, amortiguador y cuerda). Goldratt y Cox (1984) muestran que la estación con menor capacidad gobierna la tasa de salida del sistema entero. Esta estación se conoce como “drum” o CCR (Capacity Constraint Resource). El mecanismo de control de trabajos de una línea es denominado “rope”, y se basa en la máxima utilización de la estación del cuello de botella. Finalmente “buffer” representa el periodo de tiempo anterior a ser procesado un determinado trabajo desde que llega al cuello de botella hasta que este es procesado. Una descripción detallada del sistema de control de la producción DBR se puede encontrar en Goldratt y Cox (1984), Goldratt y Fox (1986), Schragenheim y Ronen (1990) o Spencer y Cox (1995).

## **3. Descripción de los experimentos**

Nuestro estudio se centra en una línea formada por cinco estaciones en tándem. Cada estación se compone de un buffer de entrada y una máquina. Consideramos dos tipos diferentes de trabajos, A y B, los cuales comparten el mismo cuello de botella en un entorno del tipo contra pedido. Cada buffer sigue una regla de prioridad del tipo FCFS (First Come First Served), según las recomendaciones de Umble y Srikanth (1990), con la excepción del buffer del CCR, el cual puede seguir diferentes reglas de prioridad. El sistema DBR implementado es el mismo descrito en Lambrecht y Segart (1990), Ramsay *et al.* (1990) o Gilland (2002), es decir, manteniendo constante el WIP máximo aguas arriba del CCR y estableciendo individualmente tarjetas kanban para cada trabajo (regla de entrada M-Closed).

### **3.1. Descripción de la línea y parámetros de simulación**

En nuestro estudio consideramos para todas las estaciones, excepto para el cuello de botella, tiempos de proceso exponencialmente distribuidos con media 3 unidades de tiempo para los trabajos de tipo A y con media 2.5 para los trabajos de tipo B. Con respecto a la estación

cuello de botella consideramos escenarios equilibrados y desequilibrados. Para los escenarios equilibrados, los tiempos de proceso de la estación cuello de botella son los mismos que para el resto de estaciones. Para los escenarios desequilibrados, consideramos dos grados de desequilibrado,  $DI$ , en la línea.

La tabla 1 muestra la media de los tiempos de proceso para el cuello de botella en los escenarios equilibrados y desequilibrados.

Tabla 1. Tiempos de proceso para el cuello de botella

Tipo de trabajo	Escenarios equilibrados	Escenarios desequilibrados	
		$DI$	
		0.15	0.5
A	3	3.45	4.50
B	2.5	2.88	3.75

Los valores seleccionados para  $DI$  están dentro de los límites empleados comúnmente en la literatura (ver por ejemplo Villeda *et al.*, 1988 ó Yavuz y Satir, 1995). El tiempo medio de proceso es ahora calculado en la estación cuello de botella empleando la expresión del  $DI$  (ver Meral y Erkip 1991 para detalles sobre su cálculo).

Adicionalmente consideramos averías y tiempos de set-up en ciertos escenarios. Estos sólo se consideran para la estación del cuello de botella, debido a que las fluctuaciones en la estación cuello de botella tendrán una mayor influencia en el funcionamiento del sistema más que la misma fluctuación en otras estaciones (ver por ejemplo Fry *et al.* 1992). Los parámetros de las averías son: el tiempo entre averías,  $MTBF$  (Mean Time Between Fails), distribuido exponencialmente con media 100 y el tiempo de reparación  $MTTR$  (Mean Time To Repair), el cual sigue una distribución erlang de media 8 y parámetro característico igual a 2. Para los escenarios donde se han considerado la existencia de tiempos de set-up, se establece un tiempo de set-up determinístico de 3 unidades de tiempo cada vez que un nuevo tipo de trabajo tiene que ser procesado en el cuello de botella. Finalmente es necesario establecer las fechas de terminación de los trabajos. Para ello empleamos la expresión conocida como  $TWK$ , Total Work Content, (ver por ejemplo Chakravorty 2001 ó Blackstone *et al.* 1982).

Para las simulaciones empleamos un horizonte de simulación de 30 000 unidades de tiempo. Para obtener valores promedios se realizan 30 replicados de cada escenario y cada regla de prioridad. Tanto el horizonte de simulación como el número de replicados han sido obtenidos mediante un estudio previo.

### 3.2. Reglas de prioridad

Uno de los principales estudios sobre reglas de prioridad fue realizado por Montazeri y Van Wassenhove (1990), en el que se indica la dificultad de obtener resultados generales aplicables a cada topología de producción, debido a que ninguna regla funciona mejor que las otras para todas las medidas de funcionamiento. En nuestro estudio nos centramos en las denominadas “reglas de prioridad simples” (ver categoría *I.a* de la clasificación aportada por Panwalkar e Iskander 1997) aplicadas en el cuello de botella, ya que no es factible comparar todas las reglas conocidas en un único trabajo (en la revisión de Panwalkar e Iskander 1997, se clasificaron ciento trece reglas de prioridad diferentes). Por ello hemos seleccionado ocho reglas de prioridad para ser comparadas. La selección ha sido realizada teniendo en cuenta numerosas referencias sobre reglas de prioridad en general (ver por ejemplo Panwalkar e

Iskander 1977, Blackstone *et al.* 1982 ó Chang *et al.* 1996) y también aquellas que se han centrado en la influencia sobre el funcionamiento de los sistemas DBR (ver por ejemplo Schragenheim y Ronen, 1990, Daniel y Guide, 1997 o Chakravorty, 2001). Finalmente hemos tenido en cuenta el trabajo de Fry *et al.* (1992) el cual discute la influencia de los tiempos de set-up en los cuellos de botella.

Las reglas que van a ser comparadas aparecen referenciadas en la bibliografía anterior y son: la SPT (Shortest Processing Time), LPT (Longest Processing Time), SI Truncated (SI Truncado) EDD (Earliest Due Date), CR (Critical Ratio), NSUT (No Set-Up Time), FCFS (First Come First Served) y SRO (Select in Random Order).

### 3.3. Escenarios

En nuestro análisis consideramos dos escenarios diferentes, dependiendo de la ausencia o existencia de tiempos de set-up (escenarios A y B, respectivamente). Para cada escenario consideramos dos parámetros diferentes para el grado de desequilibrio, *DI* (Degree of imbalance) y la existencia de averías de máquinas, considerando todas las posibles combinaciones, según se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Experimentos para cada regla de prioridad y escenario

Experimento	Averías	<i>DI</i>
1	<i>NO</i>	0.15
2	<i>SI</i>	0.15
3	<i>NO</i>	0.50
4	<i>SI</i>	0.50

### 3.4. Medidas de funcionamiento

Para estudiar el funcionamiento del sistema tenemos en cuenta tres medidas distintas: el nivel de servicio medio,  $\overline{SL}$ , calculado como el porcentaje de trabajos finalizados a tiempo (ver por ejemplo Hopp y Spearman, 1996), el retraso medio,  $\overline{L}$ , calculado como la cantidad media de tiempo en el que un trabajo excede su fecha límite de terminación y el inventario medio en proceso,  $\overline{WIP}$ , es decir la cantidad media de trabajos en la línea (ver por ejemplo Chang *et al.*, 1996). En cada tratamiento se han tenido en cuenta tanto el valor medio como un intervalo de confianza del 99% para las medidas.

La experimentación se ha realizado desde un punto de vista multiobjetivo. Por ello los objetivos son la maximización del nivel de servicio, la minimización del retraso medio y la minimización del inventario medio en proceso, obteniéndose dichas medidas de manera independiente para cada tipo de trabajo. Para cada escenario comparamos el funcionamiento de cada reglas de prioridad comparando las fronteras de las soluciones eficientes en cada caso. Respecto las fronteras de Pareto hay que indicar que han sido obtenidas teniendo en cuenta los valores medios y sus correspondientes intervalos de confianza, de la misma manera que en Chang y Yih 1994. Para comparar la calidad de los diferentes conjuntos no dominados obtenidos en cada experimento y para cada regla de prioridad hemos empleado la distancia  $D_1R$  (ver Hansen y Jaszkiwicz, 1998). Medimos la distancia  $D_1R$  como estimación de la distancia de un conjunto de soluciones hacia el conjunto de soluciones eficientes. Mientras menor sea esta más cerca estará del conjunto de soluciones eficientes.

#### 4. Robustez según Taguchi

La selección entre las diferentes reglas consideradas en la sección anterior se realiza como un problema de robustez desde el punto de vista de Taguchi. Para ello se consideran el grado de desequilibrio,  $DI$  y las averías de las máquinas como factores de ruido, mientras que la distancia  $D_1R$  puede considerarse como la característica de calidad o respuesta. De esta manera aglutinamos todas las respuestas en una sola medida. Como tratamos de minimizar la respuesta empleamos la siguiente expresión (1), ver Taguchi (1986):

$$\eta = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_1 R_i^2 \right) \quad (1)$$

donde:

$\eta$  es la relación señal-ruido (en decibelios)

$n$  es el número de experimentos (4 en este caso)

$D_1 R_i$  es la respuesta para un determinado tratamiento

La relación señal-ruido se calcula para cada sistema bajo diferentes factores de ruido. Desde el punto de vista de Taguchi un sistema será mejor, más robusto, cuanto mayor sea la relación señal-ruido.

#### 5. Resultados

Para todos los experimentos se ha llevado a cabo una búsqueda exhaustiva en el espacio total de soluciones, calculando los valores medios de la distancia  $D_1R$  para cada regla de prioridad. Los valores cercanos a cero significan que el sistema obtiene resultados cercanos a las soluciones óptimas de Pareto. Adicionalmente la varianza es también calculada. Finalmente se calcula la relación señal ruido (ver sección 4) cuya expresión tiene en cuenta los valores medios y los efectos de la varianza. A continuación se muestran los resultados así obtenidos para los diferentes escenarios.

##### 5.1. Escenario A (No considera tiempos de set-up)

En este escenario no se consideran tiempos de set-up. Por tanto, la regla *NSUT* no se incluye en las comparaciones, ya que es solamente aplicable a escenarios que consideran tiempos de set-up. Los resultados se resumen en la tabla 3. Las columnas 1 a 4 muestran los valores medios de la distancia  $D_1R$ , la columna 5 muestra la varianza de las distancias  $D_1R$ , mientras que la columna 6 muestra los resultados de la relación señal-ruido.

Tabla 3. Resultados en el escenario A

		Factores de ruido				Var	S/N
		Averías <i>DI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>		
Regal de prioridad	FCFS	0.0283	0.1480	0.4091	0.5790	0.0621	8.8165
	SPT	0.0277	0.1135	0.7844	1.1680	0.2991	3.0252
	LPT	0.0390	0.1877	0.5473	0.6285	0.0799	7.3796
	EDD	0.0153	0.0344	0.0579	0.0715	0.0006	26.0721

CR	0.0103	0.0360	0.0586	0.1011	0.0015	24.2431
SRO	0.0415	0.1672	0.3989	0.4660	0.0393	9.9358
SI Truncated	0.0124	0.0998	0.3018	0.3484	0.0258	12.5457

La figura 1 muestra la distancia  $D_1R$ . Se puede observar que CR y EDD son las reglas con menos distancia  $D_1R$  para todos los experimentos en el escenario A. También se puede observar que la regla SPT alcanza valores alejados de las soluciones óptimas de Pareto en aquellas situaciones en las que se considera un alto grado de desequilibrio  $DI$ .

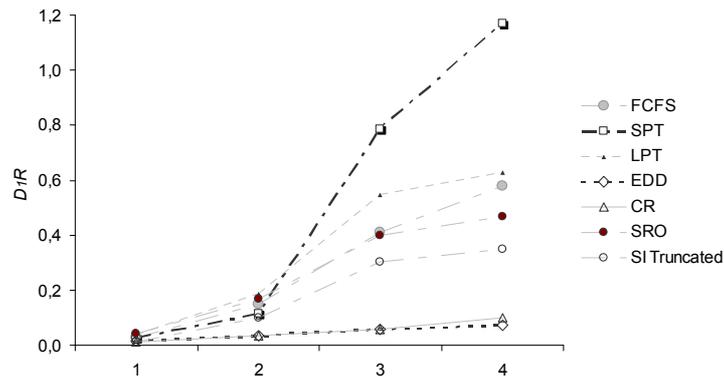


Figura 1. Distancia  $D_1R$  en el escenario A.

La figura 2 muestra la varianza de los valores de las distancias  $D_1R$ . Se puede observar que no hay una gran variabilidad para los experimentos en las reglas estudiadas, por debajo de 0.1, con la excepción de la regla SPT, cuya variabilidad es superior al resto de las reglas (498 veces mayor que la regla EDD).

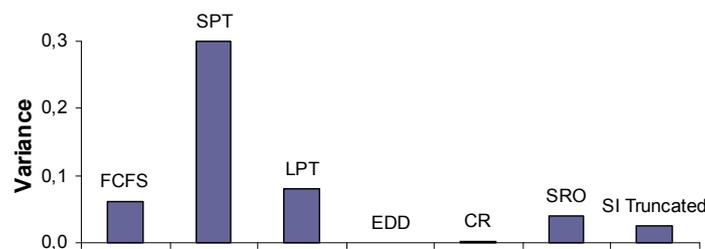


Figura 2. Varianza de la distancia  $D_1R$  en el escenario A.

La figura 3 muestra el valor de la relación señal-ruido de Taguchi. Los mayores valores son alcanzados por las reglas EDD y CR. El peor valor es obtenido por la regla SPT. Las reglas FCFS, LPT, SRO y SI Truncated alcanzan valores similares.

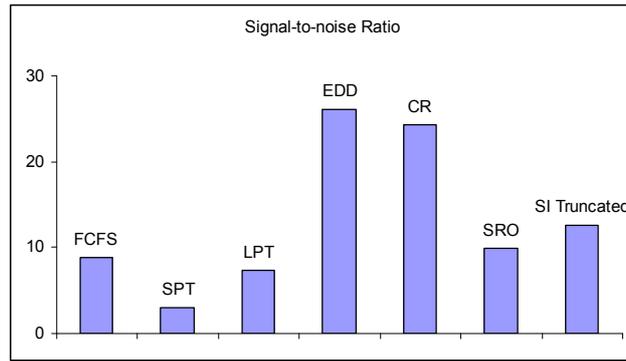


Figura 3. Relación señal-ruido en el escenario A

Como resumen de los resultados se puede concluir que los mejores resultados son alcanzados por la regla EDD, seguido de la regla CR. Por el contrario, el peor resultado es obtenido por la regla SPT. También hay que tener en cuenta que el resto de reglas obtiene resultados similares, alcanzando resultados similares a la selección aleatoria (regla SRO).

## 5.2. Escenario B (Considera tiempos de set-up)

Los resultados se resumen en la tabla 4. Las columnas 1 a 4 muestran los valores medios de la distancia  $D_1R$ , la columna 5 muestra la varianza de las distancias  $D_1R$ , mientras que la columna 6 muestra los resultados de la relación señal-ruido.

Tabla 4. Resultados en el escenario B

		Factores de ruido					
		<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>		
Averías		<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>Var</i>	<i>S/N</i>
<i>DI</i>		0.15	0.15	0.50	0.50		
Reglas de prioridad	FCFS	0.7718	0.9862	1.1442	1.4626	0.0846	-0.9835
	SPT	1.4692	2.0717	3.7327	4.4813	1.9737	-10.0503
	LPT	0.5687	0.7451	1.0501	1.3892	0.1299	0.0975
	EDD	0.0351	0.1503	0.1083	0.5439	0.0520	10.8174
	CR	0.0517	0.2350	0.1503	0.7317	0.0915	8.1257
	SRO	0.5658	0.8565	1.2183	1.5407	0.1803	-0.8917
	NSUT	0.5201	0.3948	0.4070	0.4227	0.0033	7.1518
	SI Truncated	0.7071	0.6556	1.1121	1.1307	0.0650	0.6486

La figura 4 muestra la distancia  $D_1R$ . Los valores cercanos al cero indican que el sistema opera cerca de las soluciones óptimas de Pareto. Se puede observar que las reglas CR, EDD y NSUT son las reglas con menor distancia  $D_1R$  para todos los experimentos en el escenario B. También se puede observar que la regla SPT alcanza los valores más alejados de las soluciones óptimas de Pareto, debido al grado de desequilibrio,  $DI$ .

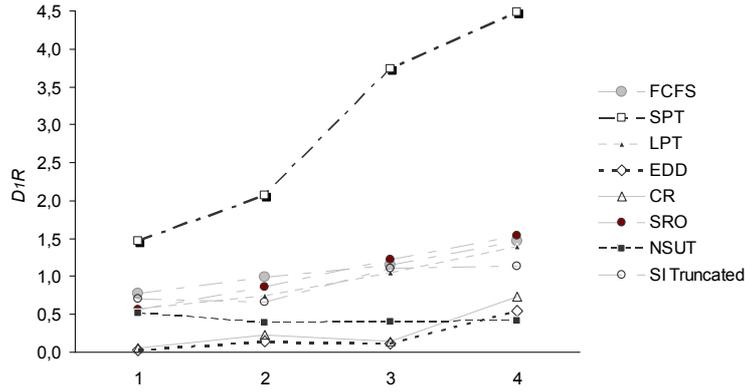


Figura 4. Distancia  $D_1R$  en el escenario B.

La figura 5 muestra que la varianza de los valores de  $D_1R$  como medida de dispersión. Se observa que no hay grandes diferencias entre las reglas estudiadas, con la excepción de la regla SPT, cuya variabilidad es superior al resto (38 veces superior a la varianza de la regla EDD).

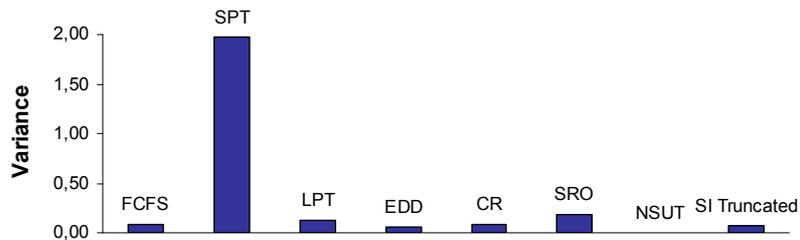


Figura 5. Varianza de la distancia  $D_1R$  en el escenario B.

La figura 6 muestra la relación señal-ruido descrita en la sección 4 con el objeto de obtener una medida de la robustez del sistema afectado por los factores de ruido descritos en la sección 4. Los valores más altos han sido obtenidos por las reglas EDD, CR y NSUT. De nuevo, el peor caso es obtenido por la regla SPT. Las reglas FCFS, LPT, SRO y SI Truncated alcanzan valores similares.

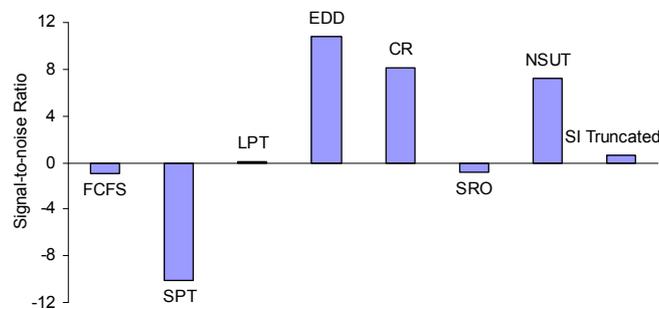


Figura 6. Relación señal-ruido para el escenario B.

Como resumen se puede decir que el uso de las reglas EDD, CR y NSUT tienen importantes ventajas respecto no considerar ninguna regla. Por el contrario, las reglas FCFS, LPT y SI Truncated funcionan de manera similar a la regla SRO, lo que significa que implementar estas reglas no es beneficioso en el escenario considerado. Finalmente decir que la regla SPT obtiene peores resultados que no considerar ninguna regla.

## 6. Conclusiones

El mecanismo de entrada en un sistema de control de la producción del tipo DBR se ve afectado en gran medida por las reglas de prioridad que operan en el CCR. En el presente trabajo se han estudiado una gran variedad de situaciones considerando diferentes grados de desequilibrio en la línea, averías de máquinas y tiempos de set-up. Para cada combinación obtenemos el conjunto de soluciones óptimas de Pareto por medio de una búsqueda exhaustiva en el espacio total de soluciones. Este conjunto de soluciones óptimas se usa para comparar el funcionamiento de las reglas de prioridad para cada escenario, por medio de la distancia  $D_1R$ , como medida de la calidad de las soluciones en entornos multiobjetivo. Cabe destacar el hecho de que el estudio se ha realizado desde un punto de vista multiobjetivo (considerando el nivel de servicio, el retraso medio y el inventario medio en proceso), lo cual contrasta con los estudios tradicionales habituales, los cuales tratan de alcanzar un cierto nivel de servicio con el menor inventario en proceso medio. Esta comparación multiobjetivo tiene en cuenta el espacio total de soluciones eficientes. Más aún, hemos obtenido el conjunto de soluciones óptimas de Pareto, lo cual contrasta con otros trabajos similares de algunos autores (ver por ejemplo Chakravorty 2001) los cuales consideran una capacidad fija en el buffer. Finalmente, para obtener conclusiones fiables se tienen en cuenta tres diferentes características de los resultados: el valor medio de la distancia  $D_1R$ , la varianza y la relación señal-ruido. Los resultados muestran que, para los escenarios estudiados, las reglas basadas en fechas de terminación alcanzan mejores resultados que el resto de reglas. Los peores resultados son alcanzados por la regla SPT. Es importante observar que para los escenarios que consideran tiempos de set-up, la regla NSUT puede ser también una alternativa interesante. Los resultados obtenidos son consistentes con aquellos obtenidos por Fry *et al.* (1992), los cuales indican que las reglas empleadas en el software OPT se basan en el equilibrio entre las fechas de terminación de los clientes evitando tiempos de set-up en el cuello de botella. Aunque hay algunos trabajos donde se recomienda las reglas FCFS y SPT para una gran variedad de situaciones (ver por ejemplo Blackstone *et al.*, 1982, Chang *et al.*, 1996 o Chakravorty, 2001), los experimentos revelan que la implementación de estas reglas pueden causar un funcionamiento ineficiente del sistema. En nuestro análisis hemos considerado solamente ocho reglas de prioridad. Futuros trabajos podrían extender el estudio a reglas de prioridad adicionales. Finalmente indicar que Chakravorty y Brian (2004) revelan que el sistema DBR es muy sensible al nivel de inventario en el primer buffer. La influencia de este aspecto podría ser estudiada en futuros trabajos.

## Referencias

- Blackstone Jr. J. H.; Phillips, D. T.; Hogg, G. L. (1982). "A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations". *International Journal of Production Research*, Vol. 20, No. 1, pp. 27-45.
- Chakravorty, S.S. (2001). "An evaluation of the DBR control mechanism in a job shop environment". *Omega. The International Journal of Management Science*, Vol. 29, pp. 335-342.

- Chakravorty S. S.; Brian J. (2004). "The impact of free goods on the performance of drum-buffer-rope scheduling systems". *International Journal of Production Economics*, Vol. 95, No. 3, pp. 347-357.
- Chang, T.M.; Yih, Y. (1994). "Determining the number of kanbans and lotsizes in a generic kanban system: a simulated annealing approach". *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 8, pp. 1991-2004.
- Chang, Y.L.; Sueyoshi, T.; Sullivan, R. S. (1996). "Ranking dispatching rules by data envelopment analysis in a job shop environment". *IIE Transactions*, Vol. 28, pp. 631-642.
- Daniel, V.; Guide Jr., R. (1997). "Scheduling with priority dispatching rules y drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system". *International Journal of Production Economics*, Vol. 53, pp. 101-116.
- Fry, T. D.; Blackstone, J.H.; Cox, J.F. (1992). "An analysis and discussion of the optimized production technology software and its use". *Production and Operations Management Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 229-242.
- Goldratt, E.M.; Cox, J. (1984). *The Goal: An Ongoing Improvement Process*. North River Press, NY.
- Goldratt, E.M.; Fox, J. (1986). *The Race*. North River Press, NY.
- Goldratt, E. (1990). *What is This Thing Called Theory of Constraints and How Should it be Implemented*. North River Press, NY.
- Goldratt, E. (1994). *It's Not Luck*. Gower, England.
- Guide, V. D. R. (1996). "Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment". *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 1081-1091.
- Gilland, W. (2002). "A simulation study comparing performance of Conwip and bottleneck-based release rules". *Production Planning & Control*, Vol. 13, No. 2, pp. 211-219.
- Hansen, M. P.; Jaskiewicz, A. (1998). "Evaluating the quality of approximations to the non-dominated set". IMM Technical Report IMM-REP-1998-7.
- Hopp, W.J.; Spearman, M.L. (1996). *Factory Physics*. Irwin, Chicago.
- Lambrecht, M.; Segaert, A. (1990). "Buffer stock allocation and assembly type production lines". *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 10, No. 2, pp. 47-61.
- Mabin, V.; Balderstone, S. (2000). *The World of the Theory Of Constraints: A Review of the International Literature*. Sant Lucie Press/APICS Series of Constraints Management.
- Meral, S.; Erkip, N. (1991). "Simulation analysis of a JIT production line". *International Journal of Productions Economics*, Vol. 24, pp. 147-156.
- Panwalkar, S. S.; Iskander, W. (1977). "A survey of scheduling rules". *Operations Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 45-61.
- Ramsay, M.L.; Brown, S.; Tabibzadeh, K. (1990). "Push, pull and squeeze shop floor control with computer simulation". *Industrial Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 39-45.
- Schragenheim, E.; Ronen, B. (1990). "Drum-buffer-rope shop floor control". *Production and Inventory Management*, Vol. 31, No. 3, pp. 18-22.
- Spencer, M. S.; Cox, J. F. (1995). "Optimum production technology (OPT) and the theory of constraints (TOC): analysis and genealogy". *International Journal of Production Research*, Vol. 33, pp. 1495-1504.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*. White Plains, New York: Kraus International Publications.
- Umble, M.; Srikanth, M.L. (1990). *Synchronous Manufacturing: Principles for World Class Excellence*. South-Western Publishing, OH.