

MEDICIÓN DE LA FLEXIBILIDAD EN MANUFACTURA

PABLO CÉSAR MANYOMA*

RESUMEN

En este documento se hace un recorrido por la visión que se ha tenido en los últimos tiempos sobre la flexibilidad en manufactura. En primera instancia, se introduce el tema, estableciendo la base necesaria para entender la importancia de las estrategias empresariales y su impacto en las ventajas competitivas de cualquier organización. Luego se aclara la flexibilidad como estrategia del sistema de producción y la estructura interna que tiene este concepto. Teniendo bien definidos los anteriores elementos, se procede a identificar los tipos de flexibilidad y se muestran indicadores que de una u otra forma dan claridad de cómo puede medirse en los sistemas de producción. Por último, con ejemplos, se muestran claramente los diferentes elementos y algunos métodos de medición, que aportarán en la aplicación del concepto de flexibilidad en la manufactura colombiana.

PALABRAS CLAVE: flexibilidad en manufactura; indicadores de flexibilidad; empresas flexibles.

MEASURING OF MANUFACTURING FLEXIBILITY

ABSTRACT

This paper provides an overview of the accepted vision in recent times on the issue of flexibility in manufacturing. Firstly, the topic is introduced, establishing the basis for understanding the importance of corporate strategies and their impact on the competitive advantages of any organization. Then, we explain the flexibility as a strategy of the production system and the internal structure of this concept. Taking these elements well defined, we proceed to identify the types of flexibility and some indicators that explain how to measure in production systems. Finally, through examples, we show the different concepts and some methods of measurement, to contribute in the implementation of the concept of flexibility in the Colombian manufacturing.

KEYWORDS: manufacturing flexibility; indicators of flexibility; flexible firms.

* Ingeniero Industrial, Universidad Autónoma de Occidente; Magíster en Ingeniería, Universidad del Valle. Profesor, Escuela Ingeniería Industrial y Estadística, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Cali, Colombia. pablo.manyoma@correounivalle.edu.co

MEDIÇÃO DA FLEXIBILIDADE EM MANUFACTURA

RESUMO

Neste documento faz-se um percurso pela visão que se teve nos últimos tempos sobre a flexibilidade em manufatura. Em primeiro lugar introduz-se ao tema, estabelecendo a base necessária para entender a importância das estratégias empresariais e seu impacto nas vantagens competitivas de qualquer organização. Depois, clarifícase a flexibilidade como estratégia do sistema de produção e a estrutura interna que tem este conceito. Tendo bem definidos os anteriores elementos, se procede a identificar os tipos de flexibilidade e mostram-se indicadores que de una ou outra forma dão clareza de como pode ser medida nos sistemas de produção. Por último, com exemplos, mostram-se claramente os diferentes elementos e alguns métodos de medição, que contribuirão na aplicação do concepto de flexibilidade na manufatura colombiana.

PALAVRAS-CHAVE: flexibilidade em manufatura; indicadores de flexibilidade; empresas flexíveis.

1. INTRODUCCIÓN

La aparición de nuevos competidores globales, la convergencia de las industrias de alta tecnología, el aumento de la velocidad y el costo del desarrollo tecnológico hacen cada vez que el entorno sea más incierto para las organizaciones (Lloréns, Molina y Verdú, 2005).

En las últimas décadas, se ha intensificado la competencia, y los clientes son más exigentes que nunca. Se han incrementado la incertidumbre de la demanda y la variedad de productos, mientras se han reducido sus ciclos de vida. El desarrollo de instrumentos que permitan obtener una mejor adecuación de la oferta y la demanda ha llegado a ser un ingrediente clave para mantener la utilización de la capacidad instalada y altos niveles de servicio (Francas, Löhndorf y Minner, 2011).

La estrategia empresarial que contiene los propósitos fundamentales y los objetivos a largo plazo de la empresa hace posible la consecución de las particularidades nombradas. Se puede decir que las estrategias empresariales dirigen las energías, capacidades y recursos de la organización a la construcción de una ventaja competitiva sostenible a lo largo de una o más dimensiones de rendimiento.

Un gran soporte de la estrategia empresarial es el *sistema de producción* o de operaciones. En la

literatura hay una amplia lista de variables o prioridades competitivas que tienen como gran eje este sistema, con las cuales una empresa puede superar a sus competidores. En el ámbito mundial se han reconocido muchos elementos de competencia que se pueden centrar en cuatro situaciones básicas (Russell y Taylor, 2006): competencia por costo, por calidad, por velocidad (tiempo) y por flexibilidad.

A través de la última década se ha llegado al consenso de que el costo y la calidad son dos elementos fundamentales para la competitividad, pero que se quedan cortos a la hora de establecer indicadores de sensibilidad al mercado (velocidad y flexibilidad de respuesta, según D'Souza y Williams, 2000).

La flexibilidad es una propiedad complementaria de la productividad, y por ello las empresas necesitan encontrar el equilibrio entre estos dos elementos: ser productivos y flexibles al mismo tiempo (Bengtsson y Olhager, 2002).

La flexibilidad en la manufatura es un elemento importante de la estrategia de operaciones y ha sido propuesta para mitigar los efectos de los desafíos nombrados. Aunque la flexibilidad de operaciones es reconocida como importante, su valor no es fácil de demostrar (Hallgren y Olhager, 2009); incluso no se ha podido desarrollar un enfoque unificado de medición, a pesar de los amplios estudios



sobre la flexibilidad de los sistemas de fabricación (Wahab, Wu y Lee, 2008).

En este documento se identifican y se definen elementos que puedan medir la flexibilidad de un sistema de producción para luego utilizarse como factor de competitividad en cualquier empresa.

2. LA FLEXIBILIDAD COMO ESTRATEGIA

Frente a estos cambios relacionados, la empresa tiene que poseer algunos grados de flexibilidad, a fin de mantenerse competitiva y rentable, y por eso debe ser vista como una propiedad fundamental del sistema de manufactura (Lloréns, Molina y Verdú, 2005).

Aunque se tenga claridad en los requisitos de flexibilidad, definirla no ha sido tan fácil y se ha venido notando con el tiempo la dificultad para construir un concepto que sea entendido por sí mismo. Entrelazando diferentes definiciones se puede establecer una visión del concepto desde las empresas:

La flexibilidad en manufactura es un concepto complejo y multidimensional que representa la habilidad o capacidad de un sistema de producción para adaptarse con éxito a las condiciones cambiantes del entorno, a las necesidades del proceso y de los clientes sin incurrir en grandes castigos de tiempo, esfuerzo, calidad, costo y desempeño (Upton, 1994).

La flexibilidad en manufactura mejora la habilidad de una organización para reaccionar frente a la demanda del cliente sin incurrir en tiempos y costos excesivos. El desarrollo de la flexibilidad en manufactura es deseable y crítico para algunas organizaciones, por tanto, explotar las capacidades de flexibilidad para conseguir niveles tangibles de resultados de rendimiento por medio de ejecuciones efectivas es cada vez más importante.

Para obtener el rendimiento competitivo ofrecido por la competencia de flexibilidad, una organización debe operar bien con respecto a las demandas del mercado y sus clientes (Russell y

Taylor, 2006). Algunas organizaciones manufactureras se refieren a esto como competencia de ejecución, siendo definida como la habilidad de una organización para convertir sus competencias flexibles en algo tangible. Una organización puede tener alta competencia de flexibilidad, pero baja competencia de ejecución, lo que podría obstruir su habilidad de alcanzar todo el potencial para aumentar el rendimiento competitivo.

Por ello, Narasimhan, Talluri y Das en 2004 desarrollaron un estudio, con un escenario de dos etapas, que fue utilizado para analizar la competencia de flexibilidad y de ejecución. Estas dos competencias tienen roles críticos y distintos en las diferentes etapas de explotación de las tecnologías avanzadas de fabricación y las estrategias de la cadena de suministro, para obtener ventajas competitivas. Mientras la competencia de flexibilidad determina si una organización puede transformar la tecnología y los recursos en capacidades flexibles, la competencia de ejecución permite la conversión de activos en ventajas competitivas específicas de una organización. Gerwin (1993) proporciona un marco contextual que une la flexibilidad de manufactura a los tipos específicos de incertidumbre externa y operacional, mediante mecanismos de estrategias manufactureras y métodos de entrega flexibles.

La figura 1 presenta el marco conceptual de Gerwin, mejorado con los conceptos de competencia de flexibilidad y ejecución. De aquí se puede inferir la gran importancia que tiene la flexibilidad a la hora de establecer una estrategia para el correcto funcionamiento de cualquier organización en el tiempo (Gerwin, 1993). Este marco conceptual establece, también, la definición de cuatro estrategias genéricas llamadas adaptación, redefinición, *banking* (espera) y reducción.

La adaptación representa el recorrido desde la incertidumbre hasta el requisito mismo de flexibilidad. En el argot estratégico la adaptación es una postura defensiva, ya que sólo pretende responder a los cambios ya dados por el medio ambiente.

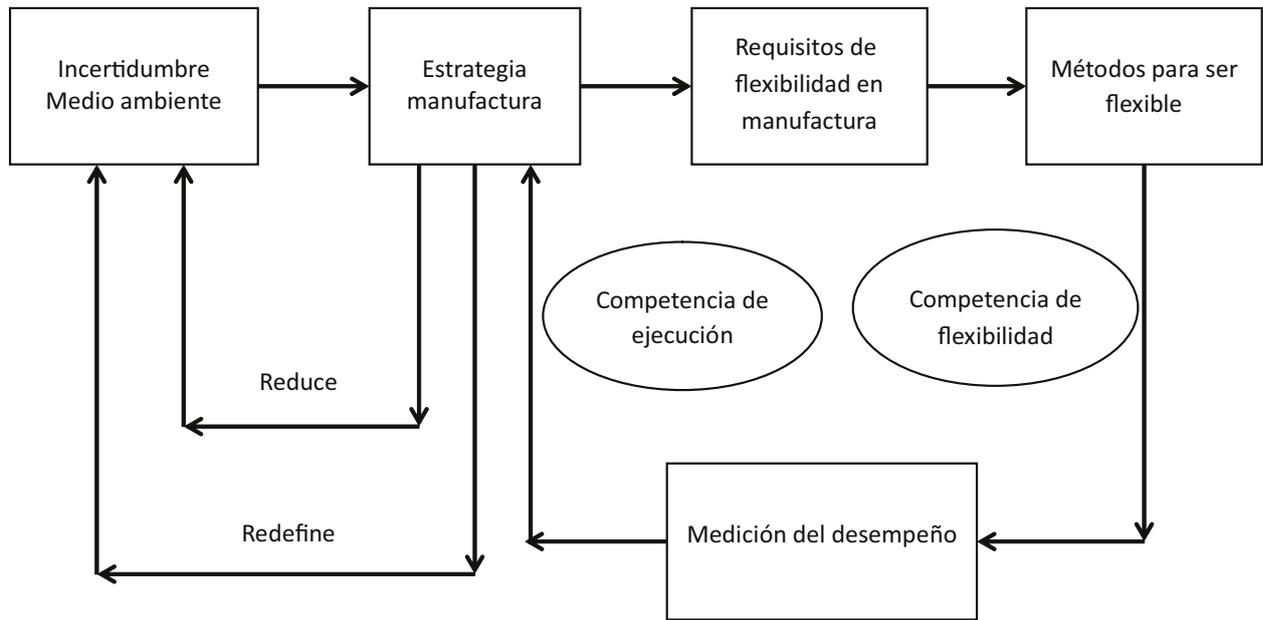


Figura 1. Marco conceptual (mejorado) de Gerwin (1993)

La redefinición busca, desde su postura proactiva, generar más variables de incertidumbre (un ejemplo característico son nuevos productos con más frecuencia) para los rivales de la organización proponente y así establecer ventajas competitivas poderosas.

Una organización puede decidir hacer *banking* de flexibilidad como una estrategia de espera para cuando encuentre futuras necesidades. En este sentido, la flexibilidad es una inversión que crea opciones para la compañía. Puede usarse de manera defensiva para adaptarse a un cambio dramático en las condiciones de mercado; pero también una “reserva” de flexibilidad puede ser empleada de forma proactiva para redefinir condiciones de competencia.

La reducción no está basada en el uso de la flexibilidad, pero afecta directamente lo que pueda suceder con ella. En la figura 1 se puede apreciar que, desde la estrategia que se proponga, se puede

reducir la incertidumbre del medio ambiente, implicando esto a los requisitos de la flexibilidad. Por ejemplo, los contratos a largo plazo con consumidores y proveedores.

Incrementar los niveles de competencia de flexibilidad es un factor determinante entre organizaciones exitosas y menos exitosas; de forma similar, la competencia de ejecución distingue organizaciones que pueden transformar con eficiencia resultados de flexibilidad en resultados de rendimiento.

Por último, la flexibilidad hace parte de la estrategia empresarial y como tal requiere inversiones que redunden en los objetivos trazados por las organizaciones. No se puede pasar por alto esta necesidad, y por ello existen métodos para medirla: opciones reales (Bengtsson, 2001) y decisiones multiobjetivos (He, Chen y Xu, 2011), entre otras. Este documento reconoce esa necesidad, pero no la tiene como su alcance.



3. TIPOS DE FLEXIBILIDAD

El impacto competitivo de la flexibilidad es bien reconocido. Sin embargo, los directivos y académicos han señalado la falta de indicadores adecuados para medirla, así como la necesidad de comprender mejor las relaciones entre los diferentes tipos de flexibilidad (Koste, Malhotra y Sharma, 2004).

Al realizar una revisión bibliográfica sobre el tema, se puede concluir que hay un consenso frente a lo que podrían llamarse dimensiones de flexibilidad entre los principales proponentes de estas divisiones (Suárez, Cusumano y Fine, 1996; Koste y Malhotra, 1999; Vokurka y O'Leary-Kelly, 2000; Chang *et al.*, 2006). Estos tipos de flexibilidad han sido objeto de investigación en las últimas décadas. A continuación se presenta una breve descripción de las principales dimensiones.

3.1 Flexibilidad en volumen

Esta dimensión representa la habilidad para cambiar el nivel de salida (incremento o decremento) de un proceso de manufactura, adaptándose al cambio en las fluctuaciones de demanda agregada.

Puede ser medida por la tasa entre la variación media del volumen de producto y la capacidad máxima de producción. En esta dimensión el tiempo requerido para el cambio de nivel es el principal proveedor de los diferentes indicadores, que van desde el costo de producción hasta la rentabilidad misma del sistema.

3.2 Flexibilidad en producto

Aquí se hace indispensable reconocer tres tipos de componentes:

Flexibilidad en variedad (mezcla, mix). Representa la habilidad del sistema de manufactura para producir un número determinado de diferentes productos. Puede ser medida como la relación entre el número de partes hechas por el sistema en un determinado período y su capacidad de ejecución.

Flexibilidad en nuevos productos o flexibilidad en diseño. Vista como el número y la variedad de nuevos productos que pueden introducirse en la producción normal, en función del tiempo y del costo.

Flexibilidad en modificación. Medida por el número de cambios en el diseño de los productos en un determinado período.

3.3 Flexibilidad en máquina, equipos, herramientas

Es el número y la variedad de operaciones que una máquina puede ejecutar. También puede entenderse como la facilidad de cambio para procesar un determinado número de partes. Se mide como el tiempo necesario o requerido para hacer los cambios y pasar de un estado a otro. Estas transiciones también pueden evaluarse por medio del tiempo perdido de producción o el desperdicio atribuido a los cambios.

3.4 Flexibilidad en manejo de materiales

Representa la habilidad del sistema de transporte interno para entregar efectivamente y en etapas apropiadas el material requerido durante el proceso de manufactura. Se dice también que es el número de caminos existentes entre los centros de procesos y la variedad de materiales que pueden ser transportados por estos caminos.

En esta flexibilidad deben medirse el tiempo y costo de transferencia de material y el número de partes movidas, entre otras componentes, como posibles indicadores de desempeño.

3.5 Flexibilidad de ruta (o ruteo)

Muy ligado a la anterior dimensión se encuentra este tipo de flexibilidad, definida como la capacidad que tiene una planta para fabricar un producto a través de varias rutas (centros de trabajo o máquinas) alternas en la misma instalación. Existen

múltiples actividades asociadas a esta decisión de flexibilidad, las cuales se pueden agrupar en actividades de diseño y selección de rutas, convirtiéndolo en un problema táctico, y en control de esas rutas, lo que lo convierte en un problema operacional (Das y Nagendra, 1997).

Los diferentes recursos asociados, tales como máquinas, herramientas y personas, por lo general, hacen que la implementación de una ruta sea más o menos costosa. Si los recursos asociados para todas las rutas posibles es el mismo, entonces la decisión es trivial, ya que todas las rutas se pueden implementar sin costo adicional. Por el contrario, cuando el costo de estos recursos es muy alto, sólo una ruta se puede implementar. Entre estos dos extremos se encuentran todas las posibilidades de la flexibilidad de ruta.

3.6 Flexibilidad laboral

Es la capacidad de cambiar el número de trabajadores, las tareas realizadas por ellos y sus responsabilidades alternas. El concepto de usar una fuerza de trabajo multifuncional se logra mediante la formación de operarios capaces de realizar diferentes tareas (Gong y Hu, 2008). El número de tareas (y la diferencia entre ellas) que un trabajador desempeñe o pueda desempeñar constituyen el núcleo de este tipo de flexibilidad.

Los procesos de selección y las políticas administrativas pueden afectar el grado de la flexibilidad laboral, que de igual manera está muy ligada con la forma organizacional que compone al sistema. Por esto en algunos casos se habla de flexibilidad organizacional como una dimensión más y se establece la necesidad de identificar con claridad los elementos componentes, tales como individuos, grupos tecnológicos, celdas de manufactura, funciones matriciales y jerarquías tradicionales, entre otros.

Estos tipos de flexibilidad tienen diferentes impactos en las organizaciones, que pueden depender del nivel en el cual actúen. Georgoulis *et al.* (2009) establecen que flexibilidades como la de volumen y

producto fácilmente se correlacionan con todos los niveles de la compañía, desde el puesto de trabajo (máquinas y personas), pasando por la línea de operación hasta la red final de la cual la empresa haga parte.

4. ELEMENTOS BÁSICOS DE LA FLEXIBILIDAD

Mientras que muchas dimensiones diferentes de flexibilidad han sido identificadas y siguen siendo relacionadas en la literatura, las investigaciones previas indican que el dominio de cualquier dimensión de la flexibilidad está compuesto de tres elementos: el rango (número y heterogeneidad), la movilidad y la uniformidad (Koste, Malhotra y Sharma, 2004).

Diversos autores (Zhang, Vonderembse y Lim, 2003) que afrontan la problemática aquí abordada están de acuerdo en definir elementos indispensables, para pensar en una medición posterior mediante indicadores.

- *Rango.* Está definido como el número de diferentes posiciones u opciones flexibles que pueden ser logradas por una dimensión o tipo de flexibilidad. Esto incluye no sólo el número de opciones, sino también la diferenciación (heterogeneidad) que entre ellas exista. Los ejemplos más característicos aquí son: rango de tamaños, rango de volúmenes y rango de productos.
- *Movilidad.* Representa la facilidad con la cual la organización se mueve de un estado a otro, dentro del rango demarcado. La facilidad del movimiento es evaluada por la interrelación del tiempo y del costo, y se es más flexible cuando se incurre en pequeñas penalizaciones en las transiciones que estén realizándose. En esto de las penalizaciones o castigos por las transiciones se pueden incluir el tiempo (*setup*) y el costo de producción, el esfuerzo de programación (tiempo administrativo) y el desperdicio o reprocesos atribuidos a la transición.



- *Uniformidad.* Capta la similitud de las medidas del desempeño (salidas) que se establezcan dentro del rango. Esto implica que al utilizar diferentes medidas (eficiencia, productividad, calidad, tiempos de proceso, etc.) el desempeño no debe variar (en grandes cantidades) con la posición ocupada en el rango establecido. La uniformidad se debe conservar, es decir, no se pueden presentar “valles y picos” al mismo tiempo.

La flexibilidad se puede ver desde muchos puntos de vista (dimensiones), pero los dos más citados por la literatura son: flexibilidad de volumen y flexibilidad de mezcla de productos (Bengtsson y Olhager, 2002; Francas, Löhndorf y Minner, 2011). Precisamente, este documento se centra en la medición de estas dos dimensiones, como el principal objeto de estudio.

5. MEDICIÓN DE LA FLEXIBILIDAD DE VOLUMEN

5.1 Generalidades

El principal objetivo estratégico de la flexibilidad de volumen es ayudar a hacer frente a la incertidumbre en la demanda. Esta flexibilidad permite a cualquier organización ajustar (hacia arriba o hacia abajo) el volumen de la producción, generando una respuesta eficaz a los clientes, con una mínima interrupción en el flujo de operaciones (Jack y Raturi, 2002).

No importa la dimensión de flexibilidad de que se trate, siempre se podrán identificar sus tres elementos básicos, que permitirán un mayor acercamiento (basado en Koste y Malhotra, 1999).

Rango. La flexibilidad de volumen puede ser medida por la curva de costo. Si la curva tiene forma de U, con la parte inferior plana y larga, es vista como flexible, porque allí hay un amplio rango de volúmenes de producción con pequeñas diferencias en costos. En la medición del rango, debe considerarse

la capacidad efectiva del sistema que puede sostenerse económicamente bajo condiciones normales, en lugar del diseño o la capacidad máxima. Este enfoque involucra la determinación de los niveles de producción en los cuales la organización puede operar con rentabilidad, por tanto, puede concluirse que el elemento rango-número (R-N) está definido por ese volumen de producción. La heterogeneidad de los cambios de volumen (R-H) indica si los cambios en el volumen pueden ser atribuidos sólo a algunos productos o a toda la línea de productos. Para un cambio similar en el volumen de producción, una organización que puede cambiar solamente por una parte es menos flexible con respecto a R-H que una segunda organización que puede cambiar el volumen de producción para toda su línea de productos.

Movilidad. Una medida aquí es el costo de manufactura constante por unidad sobre diferentes niveles de producción. Dos enfoques sugeridos: uno es el tiempo requerido para duplicar la producción de un sistema en un período dado, y el otro es el costo de duplicar la producción del sistema. En conclusión, el tiempo requerido para aumentar o reducir el volumen de producción mide el elemento movilidad.

Uniformidad. Los costos de producción y los niveles de calidad proveen una medida de uniformidad.

5.2 Ejemplo de medición de flexibilidad de volumen basado en la curva de costo unitario

Una organización posee dos líneas de ensamble con características similares; en cada una de estas líneas se produce el mismo tipo de producto en diferentes cantidades, según la demanda del mercado. La empresa desea saber cuál de las líneas posee menos flexibilidad de volumen, con el fin de reemplazarla por una más eficiente. Para ello se analizó el comportamiento del costo unitario de producción en cada línea, durante los últimos 24 meses. Los datos recopilados en este período se muestran en las tablas 1 y 2.

Luego se evaluaron los datos con regresión lineal y cuadrática, para analizar el comportamiento del costo unitario (en pesos colombianos de 2008) con respecto al volumen, en ambas líneas de producción.

Tabla 1. Costo unitario de producción en la línea I

Tamaño de lote			132	
Año	Mes	Número de lotes	Volumen	Costo unitario COP de 2008
año 1	Enero	18	2.376	165.879
	Febrero	20	2.640	133.233
	Marzo	23	3.036	112.563
	Abril	28	3.696	150.315
	Mayo	27	3.564	140.654
	Junio	22	2.904	114.893
	Julio	19	2.508	142.369
	Agosto	20	2.640	137.451
	Septiembre	25	3.300	122.289
	Octubre	23	3.036	115.230
	Noviembre	28	3.696	153.796
	Diciembre	17	2.244	175.647
año 2	Enero	20	2.640	142.316
	Febrero	19	2.508	159.872
	Marzo	20	2.640	138.961
	Abril	31	4.092	184.217
	Mayo	33	4.356	206.487
	Junio	24	3.168	119.562
	Julio	21	2.772	120.112
	Agosto	18	2.376	169.256
	Septiembre	27	3.564	136.427
	Octubre	29	3.828	159.523
	Noviembre	33	4.356	208.405
	Diciembre	18	2.376	167.421



Tabla 2. Costo unitario de producción en la línea II

Tamaño de lote			132	
Año	Mes	Número de lotes	Volumen	Costo unitario COP de 2008
año 1	Enero	19	2.508	215.150
	Febrero	21	2.772	128.725
	Marzo	23	3.036	103.526
	Abril	27	3.564	105.429
	Mayo	29	3.828	135.761
	Junio	24	3.168	86.537
	Julio	20	2.640	185.456
	Agosto	20	2.640	202.147
	Septiembre	28	3.696	121.364
	Octubre	25	3.300	95.214
	Noviembre	33	4.356	222.365
	Diciembre	20	2.640	204.518
año 2	Enero	20	2.640	201.003
	Febrero	22	2.904	115.697
	Marzo	21	2.772	150.017
	Abril	31	4.092	176.870
	Mayo	32	4.224	218.205
	Junio	23	3.036	95.214
	Julio	20	2.640	174.560
	Agosto	19	2.508	212.458
	Septiembre	30	3.960	157.589
	Octubre	31	4.092	179.999
	Noviembre	33	4.356	224.875
	Diciembre	21	2.772	146.874

Para los datos de la línea I la regresión lineal arroja un R^2 de 0,137, lo cual quiere decir que el costo unitario no se comporta linealmente, por el contrario, la regresión cuadrática arroja un R^2 de 0,923 y ello muestra que los datos se comportan polinomialmente. De manera similar ocurre para los datos de la línea II, donde para la regresión lineal se obtiene un R^2 de 0,09 y para la regresión cuadrática un R^2 de 0,913, indicando que estos datos también se comportan polinomialmente.

Como se puede apreciar en la figura 2 y como lo expresa la literatura, la flexibilidad varía en forma inversa a la curva del costo total promedio. Se puede observar como la curvatura de la línea II es más pronunciada que la de la línea I, por lo tanto, puede concluirse que la línea II posee menos flexibilidad de volumen que la línea I.

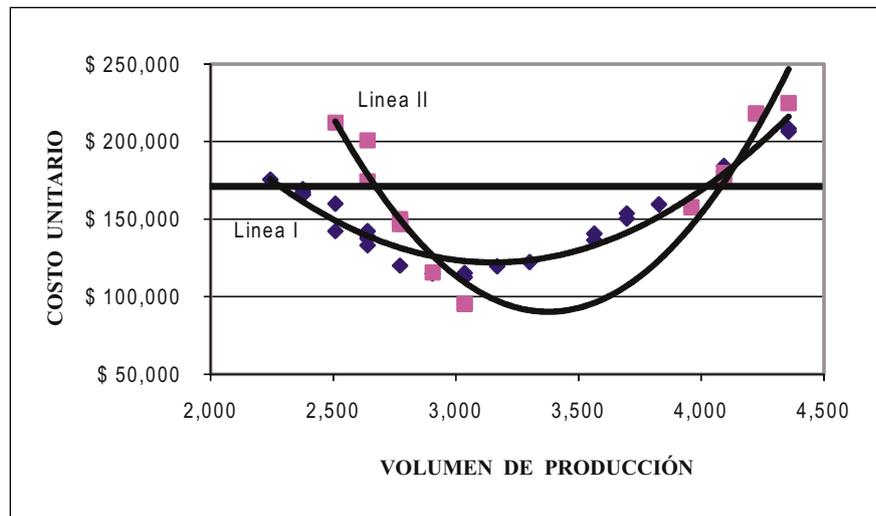


Figura 2. Comparación de la línea I y la línea II

Además, la figura 2 muestra que el rango de volumen limitado por el cruce de cada curva con el costo en el cual la empresa puede operar rentablemente (fijado en \$170.000) es más amplio para la línea I que para la línea II, es decir, que en la curva más plana el costo marginal crece más lento. A continuación se presenta numéricamente el rango de volúmenes de producción que posee pequeñas diferencias en costos para cada línea de producción, hallados mediante la solución de la ecuación cuadrática correspondiente (ver tabla 3). La línea I posee un rango de volumen más amplio en el cual la organización puede operar con rentabilidad.

6. MEDICIÓN DE LA FLEXIBILIDAD DE MEZCLA

6.1 Generalidades

Al igual que en la flexibilidad de volumen, en esta dimensión se hace importante identificar sus tres elementos básicos para una mayor claridad (basado en Koste y Malhotra, 1999).

Rango. El aspecto rango significa la extensión de la variedad de productos, es decir, la cantidad fabricada de diferentes productos por la organización así como también el grado de diferenciación de esos

Tabla 3. Rango de volumen de producción rentable

Línea	Ecuación	X ₁	X ₂	Rango
I	$0,0648X^2 - 408,6X + 766375$	2,294	4,011	1,717
II	$0,1578X^2 - 1069X + 1903404$	2,688	4,085	1,397



productos. El número de productos (R-N) provee una cantidad numérica estricta de los artículos finales fabricados por una organización. La heterogeneidad de productos (R-H) provee una percepción más amplia con respecto al rango de la flexibilidad de mezcla. Por ejemplo, en una organización que elabora 30 productos muy similares y otra que elabora 30 productos que son muy diferentes entre sí, el R-N es idéntico, pero como la última organización requiere un alto grado de destreza y pericia para crear su mezcla de producto, es por ello más flexible con respecto a R-H.

Movilidad. Los tiempos de alistamiento y el costo en el que se incurre para cambiar la mezcla de producto son las medidas de movilidad o capacidad de respuesta de este tipo de flexibilidad. Los indicadores que se pueden usar para medir este elemento de la flexibilidad de mezcla son el tiempo y el costo requerido para cambiar de una mezcla de producto a otra.

Uniformidad. La habilidad de la organización para mantener la calidad de producto y la productividad del sistema mientras fabrica una variedad de productos mide la uniformidad.

6.2 Indicador de Das-Nagendra

Para muchos fabricantes que persiguen la flexibilidad, el objetivo final es poder fabricar productos diferentes de modo simultáneo. Una medida simple de la flexibilidad de mezcla es el número de posibles productos que pueden hacerse sin grandes tiempos de alistamiento. Un mayor tiempo de alistamiento implica que las operaciones se afectan hasta el punto de que las instalaciones deben cerrarse o reconfigurarse (Das y Nagendra, 1993). La desventaja de tal medida es que no considera el rango de diferenciación entre los productos y la frecuencia con la cual ocurren los cambios.

El indicador que se expone a continuación se enfoca en el ensamble de productos, y por tanto, la diferenciación de productos se mide como una función de la composición del ensamble de cada producto (Das y Nagendra, 1993). La diferencia entre dos productos es la diferencia ponderada en el número de cada componente de ensamble usado en los dos productos, dividido por el número total de componentes usados. Ya que todos los componentes no son 100 % diferentes el uno del otro, la ponderación se emplea para indicar la diferencia percibida.

Sea Ω_{k_1, k_2} la diferencia entre dos componentes, entonces $\Omega_{k_1, k_2} = 0$ implica que no hay diferencia y $\Omega_{k_1, k_2} = 1$ implica una diferencia total entre componentes. No se propone un procedimiento estricto para derivar Ω_{k_1, k_2} , esto se deja a discreción de los encargados del sistema. Para derivar Ω_{k_1, k_2} pueden utilizarse factores tales como la diferencia en el requisito de herramientas, la diferencia en las destrezas requeridas en los trabajadores o la precisión de las máquinas, la diferencia de la naturaleza física de los componentes y la diferencia en los procedimientos de manejo, entre otros.

Para hallar la diferencia en los componentes de ensamble, es necesario también considerar los tamaños relativos de los productos. Por ejemplo, un motor de 6 cilindros es 1,5 veces mayor que un motor de 4 cilindros, por tanto, los componentes del motor pequeño se multiplican por 1,5 para estimar la diferencia. El factor 1,5 se denomina escala multiplicadora. El supuesto es que dos productos que son réplicas a escala de otros productos no tienen entre ellos ninguna diferencia relacionada con la flexibilidad. Las escalas multiplicadoras solo pueden ser usadas cuando hay escalas de relaciones definidas.

Sea DP_{c_1, c_2} la diferencia entre dos productos c_1 y c_2 , donde c_1 es el producto más grande, entonces:

$$DP_{c1,c2} = \frac{\sum_{k=1}^A \left| \beta_{c1,c2} U_{c1,k} - U_{c2,k} + \sum_{\substack{k2=1 \\ k2 \neq k}}^A \left((1 - \Omega_{k,k2}) (\beta_{c1,c2} U_{c1,k2} - U_{c2,k2}) \right) \right|}{\sum_{K=1}^A \left[U_{c1,k} + U_{c2,k} + \sum_{\substack{k2=1 \\ k2 \neq k}}^A \left((1 - \Omega_{k,k2}) (\beta_{c1,c2} U_{c1,k2} + U_{c2,k2}) \right) \right]} \quad (1)$$

Donde, $k = 1, \dots, A$ son los diferentes componentes usados en el ensamble de un producto.

$c = 1, \dots, C$ son los diferentes productos para ser fabricados.

$U_{c,k}$ = número de componentes k usados en el ensamble del producto c .

$\beta_{c1,c2}$ = escala multiplicadora entre el par de productos $c1$ y $c2$. $\beta_{c1,c2} \geq 1$.

La expresión $\beta_{c1,c2} U_{c1,k} - U_{c2,k}$ calcula las diferencias ponderadas entre los productos $c1$ y $c2$ para el componente k . Pero esta diferencia también debe calcular la similitud entre k y cualquier otro componente. La expresión $\sum_{\substack{k2=1 \\ k2 \neq k}}^A \left((1 - \Omega_{k,k2}) (\beta_{c1,c2} U_{c1,k2} - U_{c2,k2}) \right)$ se introduce con este propósito.

$DP_{c1,c2}$ toma valores entre 0 y 1, cuando dos productos no tienen componentes comunes y todos los $\Omega_{k1,k2} = 1$, entonces $DP_{c1,c2} = 1$. Cuando la similitud entre componentes se incrementa y $\Omega_{k1,k2}$ decrece, entonces $DP_{c1,c2}$ se aproxima a cero.

Sea $\gamma_{c1,c2}$ el número de veces que se produce un cambio del lote $c1$ al lote $c2$ en la secuencia de producción, tal que $\sum_{c1} \sum_{c2} (\gamma_{c1,c2}) = 1$.

La medida para flexibilidad de mezcla de producto es:

$$PFLX = \sum_{c1=1}^C \sum_{c2=1}^C (\gamma_{c1,c2} DP_{c1,c2}), c2 \neq c1 \quad (2)$$

PFLX es definida en el rango de 0 a 1, con PFLX = 1 se indica máxima flexibilidad. Cuando $\gamma_{c1,c2} = 0$ para todo $c1$ y $DP_{c1,c2} = 1$ para todo $c1$ y $c2$, entonces PFLX = 1. La medida anterior está claramente enfocada hacia el ensamble de productos, pero se puede modificar de manera apropiada para considerar otro tipo de productos.

6.3 Ejemplo de medición de la flexibilidad de mezcla basada en el indicador Das-Nagendra

Este ejemplo se basa en una línea de ensamble de motocicletas que produce para inventario y posee cuatro tipos de motocicletas: scooter, cub, sport y enduro.

- Motocicleta tipo scooter: Posee un sistema de cambios semiautomáticos, motor de 125 c.c. OHC 4 tiempos refrigerado por aire, chasis monobloque, suspensión trasera con brazo oscilante. Dimensiones (L x An x Al): 1.785 x 694 x 1.139 mm. Peso seco: 130 kg.
- Motocicleta tipo cub: Posee un motor de 125 c.c. OHC 4 tiempos refrigerado por aire, chasis monobloque, suspensión trasera de horquilla oscilante. Dimensiones (L x An x Al): 1.870 x 715 x 1.050 mm. Peso seco: 95 kg.
- Motocicleta tipo sport: Posee un motor de 100 c.c. OHC 4 tiempos refrigerado por aire, chasis cuna doble, suspensión trasera de horquilla oscilante ajustable. Dimensiones (L x An x Al): 1.965 x 720 x 1.045 mm. Peso seco: 107 kg.
- Motocicleta tipo enduro: Posee un motor de 250 c.c. OHC 4 tiempos refrigerado por aire, chasis cuna semidoble, suspensión trasera de Pro-link DHS. Dimensiones (L x An x Al): 2.147 x 845 x 1.203 mm. Peso seco: 134 kg.

Para el ensamble de cada uno de esos tipos de motocicletas se requieren 100 a 200 componentes, pero en el presente ejemplo se usarán siete de los componentes más representativos para los cuatro tipos de motocicleta, a saber: motor, ruedas, tanque,

$\alpha\beta$



pro-link, dirección, amortiguadores traseros y tijera trasera.

En la tabla 4 se especifica el número de componentes utilizados para el ensamble de cada tipo de motocicleta y se indica si el componente va o no en el producto final.

Se debe tener en cuenta que estos componentes no son totalmente diferentes entre sí, por tanto, se debe hallar la diferencia ponderada entre ellos; la tabla 5 muestra la diferencia entre cada uno de los componentes. Esta ponderación se derivó teniendo en cuenta los siguientes criterios: propiedades físicas, destrezas requeridas en su manejo y herramientas necesarias para su ensamble en la motocicleta.

Por ejemplo, para el tanque y el pro-link se asignó una diferencia de 0,7, puesto que aunque no existe semejanza en sus propiedades físicas, su ensamble requiere las mismas habilidades por parte del operario, y ambos componentes hacen uso de una pistola neumática y un torquímetro para el ajuste de los tornillos que los aseguran a la motocicleta.

Como también es necesario considerar los tamaños relativos de las motocicletas para hallar la diferencia entre dos tipos de producto, se halló la escala multiplicadora β , la cual se derivó del peso en seco de cada moto, es decir, que para hallar, por ejemplo, la β para una motocicleta tipo cub y una de tipo scooter, se tomó el peso en seco de esta última

Tabla 4. Número de componentes k usados en el ensamble del producto c ($U_{c,k}$)

Tipo de moto	$U_{c,k}$						
	K = 1 Motor	2 Rueda	3 Tanque	4 Prolink	5 Dirección	6 Amortiguador	7 Tijera
Scooter (s)	1	2	1	1	1	0	0
Cub (c)	1	2	1	0	1	2	1
Sport (sp)	1	2	1	0	1	2	1
Enduro (e)	1	2	1	1	1	0	1

Tabla 5. Diferencia entre el componente $k1$ y el componente $k2$ ($\Omega_{k1,k2}$)

Componentes	$\Omega_{k,k2}$						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-	1	1	1	1	1	1
2	-	-	1	1	1	1	1
3	-	-	-	0,7	1	0,8	0,8
4	-	-	-	-	1	0,6	0,9
5	-	-	-	-	-	1	1
6	-	-	-	-	-	-	0,9
7	-	-	-	-	-	-	-

y se dividió entre el peso en seco de la primera, obteniéndose un valor de $\beta_{c,s} = 1,4$; ello significa que una scooter es 1,4 veces el tamaño de una cub. La tabla 6 muestra las escalas multiplicadoras entre los tipos de motocicletas.

Tabla 6. Escala multiplicadora ($\beta_{c1,c2}$)

$\beta_{c,s}$	1,37	$\beta_{s,e}$	1,03	$\beta_{c,e}$	1,41
$\beta_{sp,s}$	1,21	$\beta_{c,sp}$	1,13	$\beta_{sp,e}$	1,25

De la información anterior se puede calcular la diferencia entre cada uno de los tipos de motocicletas. El resultado de este cálculo se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Diferencia entre tipos de motocicletas ($DP_{c1,c2}$)

DPc,s	0,364	DPs,e	0,071	DPc,e	0,289
DPsp,s	0,281	DPc,sp	0,064	DPsp,e	0,121

Con los datos anteriores y suponiendo, en un mes específico, la secuencia de producción *SP-SP-E-SP-C-C-C-SP-SP-E-E-SP-SP-C-S-S-SP-SP-S-S-SP-S-S-C-C-C* se puede determinar para estos 29 lotes de motocicletas el indicador de flexibilidad de mezcla (PFLX).

Para el caso en particular, el PFLX tomaría un valor de 8,72%. Teniendo en cuenta que el indicador está definido en un rango de 0 a 1, donde 0 indica que no hay flexibilidad, un valor de 0,0872 puede considerarse demasiado bajo.

Es importante aclarar que los valores encontrados tienen una alta sensibilidad con todas las variables en las diferentes formulaciones expresadas.

7. CONCLUSIONES

La flexibilidad es lo que más aproxima una empresa al ambiente competitivo global, puesto que las condiciones determinantes de sus requisitos

están dadas por elementos como variabilidad de la demanda (aleatoria, estacional), ciclos de vida muy cortos de los productos y la tecnología, gran rango de productos, incremento de los consumidores (consumo masivo) y tiempos cortos de entrega.

Tanto como medir las dimensiones de flexibilidad en manufactura, se requiere tener una idea muy clara del costo de la inversión en flexibilidad. Dos conceptos que apuntan a lo mismo, pero son totalmente diferentes en su estructura; mientras que la primera intenta definir indicadores a cualquier tipo de flexibilidad, la segunda intentará medir la inversión en capacidad flexible que le permita protegerse contra la incertidumbre de la demanda.

Los medios para el desarrollo de la competencia por flexibilidad y ejecución deben ser delineados mediante términos claramente operables y específicos. Se espera que la competencia de flexibilidad aumente el rendimiento de una organización, en un mercado tan dinámico, pero en sí no puede garantizar un rendimiento competitivo superior.

Cualquiera que sea la estrategia de producción, es necesario pensar en que las funciones de este sistema son claves para el logro de la ventaja competitiva y que, además de desarrollar su estrategia integrada con la de la compañía, debe conectar sus decisiones con el resto de las áreas funcionales, pues sólo de esta forma se asegura una coordinación de esfuerzos para la consecución de objetivos comunes.

En recientes publicaciones (ver Oke, 2011) se establecen relaciones fundamentales entre la innovación y la flexibilidad en manufactura, planteando como hipótesis que la creación y desarrollo de nuevos productos deben ir de la mano con el incremento en el desempeño de dimensiones de flexibilidad como la mano de obra, maquinaria y mezcla de productos, entre otras.

Para medir la flexibilidad en manufactura, se han creado indicadores para sectores industriales específicos; desafortunadamente, estas mediciones no están diversificadas y son aplicables no más al sector donde fueron creadas. Es necesario generar



modelos analíticos sólidos que expliquen cada vez mejor las relaciones entre las diferentes dimensiones y la flexibilidad total del sistema, con el fin de comprender y emprender planes de mejoramiento de los indicadores que más afecten a la organización.

Para el caso específico planteado se requiere hacer supuestos fuertes para que tengan sentido algunos elementos de los indicadores, por ejemplo, en la medición de flexibilidad de mezcla se supone que los lotes de productos idénticos se liberan en la planta al mismo tiempo, por lo tanto, la planta experimenta un cambio cada vez que dos lotes subsecuentes son de diferentes productos.

Resulta de gran ayuda poder establecer muy bien las diferencias, tanto en elementos como en productos terminados, ya que son fundamentales para identificar las escalas multiplicadoras que determinarán el grado de flexibilidad de una línea de operaciones en relación con los productos ofrecidos.

REFERENCIAS

- Bengtsson, J. (2001). "Manufacturing flexibility and real options: A review". *International Journal of Production Economics*, vol. 74, No. 1-3 (December), pp. 213-224.
- Bengtsson, J. and Olhager, J. (2002). "The impact of the product mix on the value of flexibility". *The International Journal of Management Science*, vol. 30, No. 4 (August), pp. 265-273.
- Chang, S. C.; Yang, C. L.; Cheng, H. C. and Sheu, C. (2006). "Manufacturing flexibility and business strategy: An empirical study of small and medium sized firms". *International Journal of Production Economics*, vol. 83, No. 1 (January), pp. 13-26.
- Das, S. and Nagendra, P. (1993). "Investigations into the impact of flexibility on manufacturing performance". *International Journal Production Research*, vol. 31, No. 10 (December), pp. 2337-2354.
- Das, S. and Nagendra, P. (1997). "Selection of routes in a flexible manufacturing facility". *International Journal Production Economics*, vol. 48, No. 3 (January), pp. 237-247.
- D'Souza, D. and Williams, F. (2000). "Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions". *Journal of Operations Management*, vol. 18, No. 5 (August), pp. 577-593.
- Francas, D.; Löhndorf, N. and Minner, S. (2011). "Machine and labor flexibility in manufacturing networks". *International Journal Production Economics*, vol. 131, No. 1 (May), pp. 165-174.
- Georgoulas, K.; Papakostas, N.; Chryssolouris, G.; Stanev, S.; Krappe, H. and Ovtcharova, J. (2009). "Evaluation of flexibility for the effective change management of manufacturing organizations". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 25, No. 6 (December), pp. 888-893.
- Gerwin, D. (1993). "Manufacturing flexibility: A strategic perspective". *Management Science*, vol. 39, No. 4 (April), pp. 395-410.
- Gong, Z. and Hu, S. (2008). "An economic evaluation model of product mix flexibility". *The International Journal of Management Science*, vol. 36, No. 5 (October), pp. 852-864.
- Hallgren, M. and Olhager, J. (2009). "Flexibility configurations: Empirical analysis of volume and product mix flexibility". *The International Journal of Management Science*, vol. 37, No. 4 (August), pp. 746-756.
- He, P.; Chen, Z. and Xu, X. (2011). "On flexibility investment in manufacturing system: A multi-objective decision making method". *Expert Systems with Applications*, vol. 38, No. 9 (September), pp. 11813-11819.
- Jack, E. and Raturi, A. (2002). "Sources of volume flexibility and their impact on performance". *Journal of Operations Management*, vol. 20, No. 5 (September), pp. 519-548.
- Koste, L. and Malhotra, M. (1999). "A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility". *Journal of Operations Management*, vol. 18, No. 1 (December), pp. 75-93.
- Koste, L.; Malhotra, M. and Sharma, S. (2004). "Measuring dimensions of manufacturing flexibility". *Journal of Operations Management*, vol. 22, No. 2 (April), pp. 171-196.
- Lloréns, F. J.; Molina, L. M. and Verdú, A.J. (2005). "Flexibility of manufacturing systems, strategic change and performance". *International Journal Production Economics*, vol. 98, No. 3 (December), pp. 273-289.
- Narasimham, R.; Talluri, S. and Das, A. (2004). "Exploring flexibility and execution competencies of manufacturing firms". *Journal of Operations Management*, vol. 22, No. 1 (February); pp. 91-106.
- Oke, A. (2011) "Linking manufacturing flexibility to innovation performance in manufacturing". *International Journal of Production Economics*. In press, corrected proof, available online 14 September 2011. <http://dx.doc.org/101016/j.ijpe.2011.09.14>.

- Russell, R. S. and Taylor, B. W. *Operations management: Quality and competitiveness in a global environment*. 5th ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2006. 896 p.
- Suárez, F.; Cusumano, M. and Fine, C. (1996). "An empirical study of manufacturing flexibility in printed circuit board assembly". *Operations Research, Special issue on New Directions in Operations Management*, vol. 44, No. 1 (January-February), pp. 223-240.
- Upton, D. (1994). "The management of manufacturing flexibility". *California Management Review*. Winter 1994, pp. 72-89.
- Vokurka, R. and O'Leary-Kelly, S. (2000). "A review of empirical research on manufacturing flexibility". *Journal of Operations Management*, vol. 18, No. 4 (June), pp. 485-501.
- Wahab M.; Wu, D. and Lee, C. (2008). "A generic approach to measuring the machine flexibility of manufacturing systems". *European Journal of Operational Research*, vol. 186, No. 1 (April), pp. 137-149.
- Zhang, Q.; Vonderembse, M. and Lim J. (2003). "Manufacturing flexibility: Defining and analyzing relationships among competence, capability, and customer satisfaction". *Journal of Operations Management*, vol. 21, No. 2 (March), pp. 173-191.