

# Sistemas de Manufactura Biológica SMB para el mejoramiento de la productividad

Ivone Andrea Otálora Guerrero   Diana Cristina Ramírez Martínez   Oscar Fernando Castellanos Domínguez

[iaotalorag@unal.edu.co](mailto:iaotalorag@unal.edu.co)

[dcramirez@unal.edu.co](mailto:dcramirez@unal.edu.co)

[ofcastellanosd@unal.edu.co](mailto:ofcastellanosd@unal.edu.co)

Grupo de Investigación y Desarrollo en Gestión, Productividad y Competitividad BioGestión  
Universidad Nacional de Colombia

**Palabras clave:** sistemas de manufactura, elementos biológicos, productividad, pertinencia

## Resumen

El aumento de la productividad, como medida del uso más eficiente y racional de los recursos productivos, debe implicar prácticas estratégicas mediante sistemas de manufactura con características que permitan enfrentar el nuevo entorno fortaleciendo la gestión de la innovación hacia organizaciones más productivas. Este artículo relaciona la aplicación de conceptos biológicos en los sistemas de manufactura con la perspectiva en el aumento de la productividad. Inicialmente, se plantea el concepto de productividad y los factores internos y externos que la afectan; posteriormente se realiza una descripción de la evolución de los sistemas de manufactura, desde los tradicionales hasta los emergentes en los que se incluyen los sistemas biológicos de manufactura (SMB); finalmente se plantea una correlación que permite dar enfoque a posibles soluciones pertinentes para enfrentar los cambios en el ambiente dentro del contexto de países en desarrollo como los latino-iberoamericanos.

## Abstract

Increased productivity as a measure of efficient and rational use of productive resources. It must involve strategic practices by manufacturing systems with features that allow them to face the new environment by strengthening innovation management towards more productive organizations. This article relates to the application of biological concepts in manufacturing systems on an increasing productivity view. Initially, there is the concept of productivity and internal and external factors that affect it. Then there is a description of the manufacturing systems evolution from traditional to emerging which include manufacturing biological systems (SMB ) and finally arises a correlation which allows to approach relevant solutions to address changes in the environment within the context of developing countries like the Latin American.

## Introducción

La productividad se define como la relación entre el valor de venta de las unidades producidas en un periodo de tiempo, y los insumos utilizados para llevar a cabo la producción; lo que en otras palabras, es el beneficio obtenido del manejo de los recursos, sean estos financieros, humanos, tecnológicos o de otra índole, representados en unidades

físicas. En el actual entorno caracterizado por la rivalidad de precios y la incertidumbre en las decisiones, entre otros, el mejoramiento de la productividad se convierte en un elemento clave para la sostenibilidad de las empresas, pues su medición permite disminuir los riesgos en las decisiones, eliminar las ineficiencias, lograr una mejor posición con respecto a los competidores e incrementar la relación costo-beneficio en la organización. En este sentido, se han desarrollado a lo largo del tiempo varios métodos de fabricación con diferentes objetivos, entre ellos, el incremento del factor de la productividad.

Para clasificar estos sistemas de manufactura se observa que Saadat, Tan y Owliya (1994) ya hacían mención al uso de conceptos en relación con nuevos paradigmas de fabricación, llamados sistemas de fabricación emergentes, que se diferenciaban de los sistemas tradicionales de fabricación, pues estaban creados para responder de forma efectiva a los cambios del entorno. Según Paulo Leitao *et al.* (2011), los sistemas de manufactura tradicionales son centralizados y con estructuras rígidas, y no tienen suficiente flexibilidad para hacer frente con modularidad, flexibilidad, robustez y reconfiguración al nuevo entorno variable. El mismo autor indica que los nuevos paradigmas proponen sistemas de fabricación autónomos y adaptativos, que puedan responder rápida y correctamente a los cambios externos con capacidades inherentes, por lo que no necesitan la intervención de agentes externos para su adaptación al cambio. Hoda *et al.* (2008) comparten la visión de Leitao y además añaden que estos nuevos paradigmas permiten perfeccionar los objetivos y responder de manera eficaz a las demandas cambiantes.

Los sistemas de manufactura evolucionan hacia características que les permita enfrentar este nuevo entorno fortaleciendo la innovación hacia organizaciones más productivas y por ende más competitivas; como es el caso de los sistemas biológicos de manufactura (SBM) cuya idea central es la aplicación de conceptos como la autoorganización, el auto-crecimiento y la evolución, traídos de la biología para enfrentar los contextos actuales variables, cuyas posibles aplicaciones y efecto en la productividad se propone identificar en este artículo. Para ello, se conceptualiza la productividad y los factores que la afectan a nivel interno y externo, posteriormente se establecen como antecedentes los sistemas de manufactura tradicionales y se dan a conocer los sistemas de manufactura emergentes, entre los que se encuentran los sistemas de manufactura con aplicación de elementos biológicos, permitiendo dar enfoque a posibles soluciones pertinentes para enfrentar los cambios en el ambiente en el contexto de países en desarrollo como los latino-iberoamericanos en donde pueden convertirse en un elemento clave en pro del incremento de la productividad.

## **1. El concepto de productividad**

La productividad es de importancia relevante pues su medición y control implica el uso más eficiente y racional de los recursos productivos, es así como desde el punto de vista macroeconómico es uno de los determinantes de la rentabilidad de la empresa y de su éxito en el mercado competitivo y además tiene una relación directa con el bienestar de la población, en particular con los niveles de ingreso real y empleo, convirtiéndose en uno de los determinantes de la calidad de vida de los habitantes de un país (Colmenares, 2007) y de la competitividad internacional de una nación mediante el incremento de la capacidad productiva y del entorno general al mejorar el producto, la eficacia y los salarios, entre otros, sin desmejorar algún otro indicador (Jáuregui, 2000). Al respecto, Sharpe (2002) menciona que el aumento de la productividad es el recurso más importante del crecimiento

a largo plazo de la economía convirtiéndose en uno de los factores más relevantes para aumentar el nivel de vida definido como el aumento del PIB per cápita.

El término productividad fue mencionado por primera vez en 1766 por Quesnay quien se refirió a la obtención de la mayor satisfacción con el menor gasto como una regla fundamental de conducta; posteriormente David Ricardo en 1973 relacionó la productividad con la competitividad de los países a nivel internacional (Martínez, 2006). Por otra parte, en 1950 la Organización para la Cooperación Económica Europea (OCEE) define la productividad como: el cociente que se obtiene al dividir la producción, por uno de los factores de producción como la mano de obra, el capital y la materia prima, entre otros, por lo que se puede hablar de la productividad del capital, de la inversión o de la materia prima según el divisor de la relación. Más recientemente, Andrew Sharpe (2002) define la productividad como la relación entre los *output* (bienes y servicios) y los *inputs* de recursos, humanos y no humanos, usados en el proceso de producción que se expresa normalmente como una relación, ambos deben ser medidos en volúmenes físicos. Mientras que la EPA (European Productivity Agency) conceptualiza: “La productividad es el grado de utilización efectiva de cada elemento de producción. Es sobre todo una actitud mental. Busca la constante mejora de lo que existe ya (...). Requiere esfuerzos continuados para adaptar las actividades económicas a las condiciones cambiantes y aplicar nuevas técnicas y métodos. Es la firme creencia del progreso humano”. Llevando un poco más allá al término como el resultado del equilibrio entre cantidad, calidad y coste de producción obtenida, con respecto a estas nuevas concepciones sobre la productividad, también se ha concluido que la acumulación de conocimiento y la internacionalización de las empresas puede generar aumento en la productividad (Merino, 2012).

Hannula (2002) hace una recopilación de los tres enfoques de la productividad y su incidencia en los procesos de medición, los cuales son: la productividad total, la productividad de los factores y la productividad parcial. La productividad total es el concepto de productividad más completo y el más usado a nivel de empresa, ya que se define como la relación entre el total de salidas y entradas en la producción. Estos enfoques generalmente se miden en unidades monetarias y no se mide como una unidad estática sino como un cambio o delta en el tiempo. La productividad de los factores es el concepto más común a nivel macroeconómico y también es llamada productividad del valor agregado, se define como la razón entre la producción neta a la que también se le conoce como valor agregado de producción y la suma de los insumos de trabajo y de capital expresadas en unidades monetarias deflactadas. Finalmente, la productividad parcial es la proporción entre la producción y la entrada de un solo factor que puede ser trabajo, capital, material o energía.

Es así como la productividad se puede definir como la relación entre el valor de venta de las unidades producidas en un periodo de tiempo, generalmente un año, y los insumos (humanos, tecnológicos, energéticos, de capital, materiales...) utilizados para llevar a cabo la producción; lo que en otras palabras, es el beneficio obtenido del manejo de los recursos, sean estos financieros, humanos, tecnológicos o de otra índole, representados en unidades físicas; sin embargo, la productividad no se limita al aumento en el número de unidades producidas, ya que un aumento en este número, sin el mejoramiento de los procesos que le permitan disminuir el denominador de la relación no se expresará como una variación significativa al medirla.

## **2. Factores internos y externos que afectan la productividad**

La productividad tiene como componentes a la eficiencia técnica, definida como la comparación entre la producción observada y sus valores óptimos, la eficiencia de escala, es decir, producir bajo una escala adecuada y al cambio tecnológico referido a la introducción de nuevas tecnologías (Guerrero & Rivera, 2009). Por lo tanto, este factor puede variar tanto por la eficiencia del proceso productivo, asociado a factores internos, las tecnologías existentes o el entorno en el que se produce (González & Urdaneta, 2007). Como medio de análisis del posible impacto de los sistemas emergentes de manufactura con aplicación de elementos biológicos se deben tener en cuenta los factores tanto internos como externos que influyen en la variación de la productividad para correlacionarlos con los efectos esperados al trasladarse de un sistema de manufactura tradicional a uno biológico.

## 2.1. Factores internos

Se caracterizan porque pueden controlarse o modificarse desde la empresa (ver Figura 1); estos se refieren principalmente a aspectos humanos, ya sea de los trabajadores o de la administración, y a métodos de producción. Sumanth (1990) identifica en esta categoría **la investigación y desarrollo**, es decir, si sus resultados son efectivos para el incremento de la producción, mejorar el método de trabajo, dar valor agregado a los productos existentes o crear productos o procesos de alto valor agregado, **la utilización del capital o la inversión** sobre la cual se espera se tenga el mayor retorno posible, **la vida de la planta y el equipo** que se refiere a la antigüedad de los equipos que se están usando en los procesos productivos, los cuales se pueden contrarrestar con prácticas como el mantenimiento preventivo, **la ética del trabajo** que el autor define como la diferencia entre las horas que se trabajan realmente y las horas que se pagan, **la resistencia de los trabajadores** a adoptar nuevos mecanismos para mejorar la productividad y **la administración** que comprende actividades como la planeación, el ajuste de funciones, instrucciones, disponibilidad de herramientas, actividades de logística, supervisión y estrategia.

A estos factores se agregan el **nivel de calificación y experiencia de la fuerza de trabajo**, pues diferentes trabajos empíricos afirman la existencia de una relación positiva entre la calidad de los recursos humanos y su productividad y la **adecuada medición** de la productividad que evite errores estadísticos (Martínez, 2006).

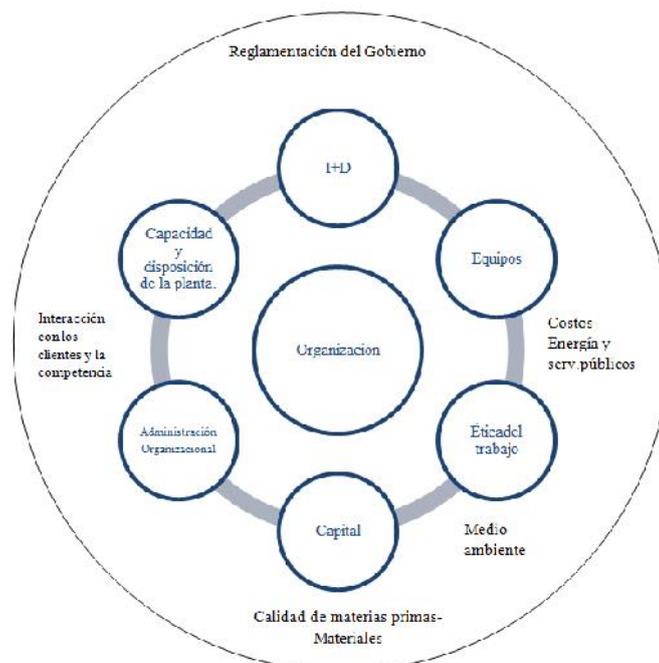
Otros factores internos mencionados por la literatura son el uso de la **capacidad de la planta** debido a que un nivel de producción por debajo o por encima del nivel óptimo afecta negativamente la productividad y la **disposición de las máquinas** que evitan desplazamientos innecesarios tanto de materiales como de mano de obra que tiene en cuenta también el almacenamiento. Finalmente, otros factores que se mencionan con frecuencia se pueden categorizar como **organizacionales**, en los cuales se encuentra el aprendizaje organizativo, técnicas de gestión que comprenden la simplificación de los métodos de trabajo y la reducción de pérdidas y las medidas adoptadas por la organización para mantener y mejorar las relaciones laborales como la delegación y la descentralización de la autoridad y las técnicas y condiciones de trabajo (Velásquez, Rodríguez, & Guaita, 2012) (Kumar, 2011).

## 2.2. Factores externos

Se refieren al contexto en el cual interactúa la empresa, pero no tiene injerencia, por lo que es necesario desarrollar estrategias para aprovechar las oportunidades y enfrentar las amenazas (ver Figura 1). En esta categoría Sumant (1990) identificó la **reglamentación**

**del gobierno**, en donde se ubica legislación del trabajo, los aranceles y demás leyes fiscales, que al ser excesivas pueden causar retrasos, incertidumbre y desactivar la inversión, seguidas por la administración pública e infraestructura (Pedraza, 2007). En estudios empíricos para Estados Unidos se encontraron además el incremento de **los costos de energía**, se toma la energía como referente de los servicios públicos pues esta es la que más tiende a variar pues depende generalmente del precio del petróleo, y otras materias primas el cual tiene un efecto negativo sobre la productividad, la regulación ambiental y política de demanda (Martínez, 2006). Por su parte, Velásquez, Rodríguez y Guaita (2012) hace un análisis de diversos autores y plantea un modelo en el que coincide en afirmar que uno de los factores es la reglamentación del gobierno pero añade que también se encuentra la situación política, social y económica de la región y la interacción con los clientes, la competencia y el medio ambiente.

Por otra parte, en una revisión de la literatura llevada a cabo por Pedraza (2007) se encontró que los factores externos que se han mencionados de forma más frecuente en la bibliografía son las leyes y reglamentación del gobiernos, los recursos naturales, la competencia, la influencia de los sindicatos, puesto que la cooperación entre los trabajadores y la administración de la empresa es la principal razón para el crecimiento de la productividad, la calidad de las materias primas y los materiales y el medio ambiente.



**Figura 1. Factores internos y externos que afectan la productividad de una empresa.**

### 3. Sistemas Tradicionales de Manufactura

Hasta el siglo XX, la única forma que se conocía para la producción de bienes era la artesanal (*craft manufacturing*). En este método de fabricación, aún no era posible hablar de sistemas de manufactura, pues se utilizaba un artesano que según sus habilidades llevaba a cabo una producción contra pedido. Se caracterizaba por que las empresas se ubicaban cerca de las grandes ciudades, y varias piezas se producían en pequeños talleres para posteriormente ser ensambladas, la producción es coordinada en su totalidad por el

dueño de la fábrica y es el quien maneja la relación con los proveedores y clientes, la maquinaria para la producción es la misma para diferentes productos, los volúmenes de producción son pequeños, los lotes son muy variables y la producción presenta altos costos (Gola & Swic, 2010).

Posteriormente, los sistemas de manufactura evolucionan hacia los sistemas de manufactura dedicados (DMS- *manufacturing dedicated systems*), los cuales tienen su fundamento en la producción en masa de Henry Ford, quien se basó en la analogía hombre-máquina de Taylor y su modelo T (primer automóvil de producción masiva). Los DMS aparecen generalmente en dos formas: i) de producción continua, en la cual se estiman las demandas del producto, mediante una proyección de ventas, para obtener como resultado un programa maestro de producción que se ajusta mediante inventarios e históricos de demandas, este sistema se caracteriza por tener entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) constantes; y de producción intermitente (*batch*) en las que las instalaciones de producción son lo suficientemente flexibles para manejar una amplia variedad de productos y tamaños, los lotes de producción son pequeños y las entradas y salidas son variables (Adam, 1983); en la producción en masa de Ford aparecen conceptos como el balanceo de líneas y el flujo y manejo de materiales (Hon, 2005). Es así como para estos avances tempranos en manufactura, los sistemas se pueden tomar, desde una sola máquina o estación de trabajo, como en el modelo Peklenik (1971) hasta la fabricación en célula en donde se necesitan varias máquinas para lograr las características deseadas en un producto, y estas se distribuyen en planta teniendo en cuenta su similitud o la familia de piezas, este modelo fue presentado por Mitrofanov, y ha sido reforzado por investigadores en clasificación y codificación (Hon, 2005)

Posteriormente, en los años 60's se presentan dos desarrollos paralelos: i) Los sistemas de manufactura flexible, que son un grupo de máquinas y herramientas controladas por un sistema central e interconectadas (Gola & Swic, 2010), en donde la flexibilidad operativa se evidencia en la capacidad de fabricar numerosas piezas con diferentes diseños en pequeñas cantidades y de forma rápida (Warnecke & Steinhilper, 1988); el primero de estos sistemas se introdujo en Inglaterra en 1960, y fue llamado "system24" (Greenwood, 1988) y ii) El paradigma de fabricación de Toyota, "justo a tiempo" (*just in time* (JIT)) (Schonberger, 2007) esta filosofía fue desarrollada por esta compañía y sus proveedores entre los 50's y 60's, pero sólo se dio a conocer al occidente a finales de los 70's, al publicarse en 1977 por Sugimori *et al*, se basa en el entrenamiento del recurso humano al rotarlo en las líneas de producción, en la fabricación de pequeños lotes de producción, minimización de tiempos muertos, obstáculos y desorden, dar importancia a las relaciones con los proveedores, el mantenimiento preventivo, la optimización del transporte y manejo de inventarios, para lo cual utiliza herramientas como: tarjetas Kanban, las cinco S y los cinco porqués, entre otros.

Estos métodos de producción introdujeron en el panorama al concepto de calidad, de tal forma que en los años 70's y hasta los 80's, basados en filosofías japonesas, se dio paso a métodos de fabricación como: los círculos de calidad (*quality control* (QC)), basados primordialmente en el control de la calidad en diferentes puntos de la operación (Abbott & Eckstein, 1981) (Ingle, 1982); la gestión de la calidad, en donde es muy reconocido el método Ishikawa, quien propone siete herramientas básicas de procesos y mejora de la calidad, entre ellos, el diagrama que lleva su nombre o de espina de pescado (Ishikawa, 1985); el método Kaizen que se basa en la mejora continua, en donde el sistema de producción se adapta o se renueva de acuerdo con los cambios de producto, se debe

mantener el mismo o mejor rendimiento mediante la supervisión continua y el mantenimiento de las condiciones de producción (Halevi, 2001); *Quality Function Deployment* (QFD) o la casa de la calidad, es una de las primeras aproximaciones formales a lo que se conoce comúnmente como “la voz del cliente”, mientras que el costo de calidad se refiere al costo de la no calidad, es decir, cuantificar cifras como costos de oportunidad, desperdicios, reprocesos y pérdida de clientes (Schonberger R, 2007); Gestión de la calidad total (*Total Quality Management* (TQM)), el objetivo principal de este método es la satisfacción del cliente, entendido este como interno y externo, introduce conceptos como: 1. Los productos incluyen bienes y servicios. 2. El trabajo en grupos interdisciplinarios para la mejora. 3. La eliminación de actividades que no añaden valor (Halevi, 2001).

En los años 90's, basados también en filosofía japonesa, surgieron diversas posturas conceptuales referentes a la producción como: 1. La reingeniería (Hammer, 1990), fundamentada en el rediseño de los procesos, simplificando y eliminando, para dar paso a la automatización, sin embargo, infortunadamente en algunos contextos este se convirtió en una excusa para el despido de personal, por lo que después de un tiempo su acogida e investigación fue mínima (Davenport, 1996), 2. Manufactura esbelta: (*Lean manufacturing*) se basa en diagramas de flujo que permiten mapear las rutas para la producción, además utiliza herramientas de mejoramiento continuo, satisfacción del cliente y trabajo en equipo para eliminar desechos (residuos), disminuir inventarios y entregar a tiempo, 3. Six sigma: es una innovación de Motorola, se fundamenta en el mejoramiento de las estadísticas mediante grupos de trabajo, en donde hay una jerarquización dependiendo de la experticia del personal, 4. Gestión colaborativa de la cadena de suministro (*supply chain managment*), este método permite el manejo de inventarios en forma conjunta entre los proveedores, la fábrica y los distribuidores, compartiendo información, para prever los cambios tecnológicos y 5. *World-class manufacturing* que se basa en el principio de la competencia mundial, para esto el método se divide en tres áreas: gestión, calidad y producción, por lo que toma herramientas de otras metodología para mejorar la eficacia del sistema. (Halevi, 2001) (Schonberger, 2007).

#### **4. Sistemas de Manufactura emergente.**

En la década de los 90's, debido a los rápidos cambios tecnológicos y la disminución en el ciclo de vida de los productos, que comenzaba a suscitarse, aparecen los sistemas reconfigurables de manufactura (*Reconfigurable Manufacturing Systems* (RMS)) propuestos en 1999 por Koren y sus colaboradores en el Centro de Investigación en Ingeniería de Sistemas de Fabricación Reconfigurable de la Universidad de Michigan. Los RMS son sistemas que tienen una estructura ajustable debido a que están diseñados con base en la demanda del mercado y pueden ser fácilmente modificados dependiendo de las necesidades de producción y la familia de productos. Según Saadat y Owliya (1994), este tipo de sistemas presentan dos ejes centrales el uso de máquinas modulares y de sistemas abiertos de control. Es así, como la mayor parte de la investigación realizada en RMS considera la reconfiguración de los sistemas a partir de la automatización de máquinas modulares que se pueden desmontar y volver a configurar para producir diversos productos o procesos. Los sistemas de fabricación reconfigurables y algunas variaciones de los sistemas de manufactura flexibles, en las cuales se incluye automatización o sistemas de control computarizados, son considerados los primeros sistemas de fabricación emergentes.

Los anteriores antecedentes se representan de manera gráfica en la Figura 2.

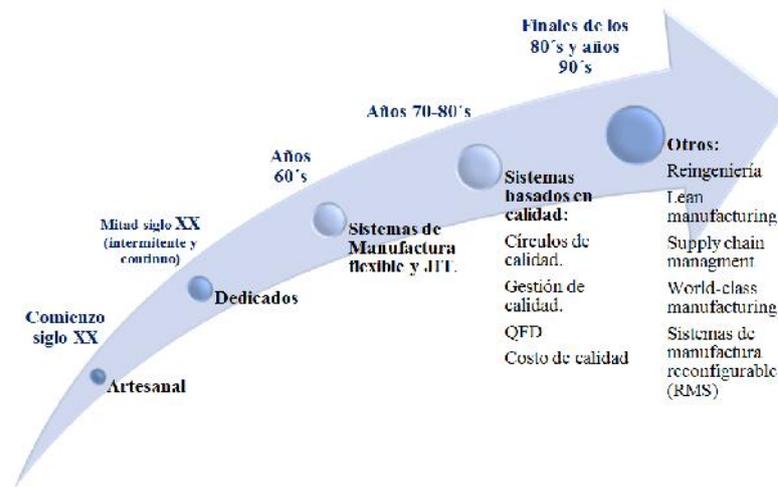


Figura 2. Evolución en línea de tiempo de los sistemas tradicionales de manufactura.

#### 4.1. Sistemas de Manufactura con aplicación de elementos biológicos

En ambientes de gestión de la producción en países desarrollados es posible encontrar desarrollos **innovadores**, como por ejemplo, la aplicación de elementos biológicos a los mismos, lo que plantea un reto para las economías emergentes, en donde se evidencia en su mayoría la aplicación de sistemas de manufactura tradicionales. Posterior a los sistemas de manufactura reconfigurables, se adoptó el paradigma de la aplicación de elementos biológicos a los sistemas de producción. Las principales características que se le atribuyen a los sistemas de manufactura con elementos biológicos son la **auto-organización** (*Self organization*): esta característica se refiere a sistemas que necesitan poca supervisión y control, poseen módulos independientes y autónomos que cooperan de manera inteligente para adaptarse rápidamente a las fluctuaciones del entorno; es la contraparte de las estructura jerárquicas y es llamado hetárquico, en donde se prohíben las jerarquías, se compone de estaciones de trabajo y las ordenes son negociadas entre las partes (Hammer, 1990).

La siguiente característica hace referencia a **la agilidad**, entendida esta como la habilidad de la compañía de funcionar rentablemente en un ambiente competitivo e impredecible, mediante cambios según las oportunidades, a esta característica se asocian atributos clave como la adaptabilidad, la reactividad, la robustez y la transformación del conocimiento (Hon, 2005). Efstathiou, Calinescu & Huataca (2001) proponen a la **complejidad** de fabricación como un elemento característico del sistema que integra varios aspectos fundamentales del entorno como el tamaño, la variedad, la simultaneidad, los objetivos, la información, la variabilidad, la incertidumbre, el control, el costo y el valor. Mientras Leitao, Barbosa, & Trentesaux(2012) adiciona a estas características **la autoconfiguración** entendida como la capacidad de adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes mediante la adición, eliminación o modificación de entidades sobre la marcha, sin interrumpir la producción y **la auto-sanación** (*Self-healing*) que permite diagnosticar

desviaciones debidas a condiciones inesperadas y actuar de forma proactiva para normalizarlas estas desviaciones.

Finalmente, entre los principales atributos que comparten los sistemas de manufactura con aplicación de elementos biológicos se encuentra la **flexibilidad** que en general es la capacidad de un sistema para responder a posibles cambios internos o externos que afectan la generación de valor, de manera oportuna y rentable. Así, la flexibilidad de un sistema de ingeniería es la facilidad con la que este responde a la incertidumbre, la cual puede generar riesgos u oportunidades, manteniendo o aumentando su rentabilidad (Gola & Swic, 2010).

#### **4.1.1. Sistemas de manufactura que incorporan algunos elementos biológicos**

- ***Multi-Agent Systems (MAS)*** (Wooldridge, 2002).

Este sistema de manufactura se basa en agentes, los cuales en un sistema multiagente tienen varias características fundamentales como la autonomía, la visión local del sistema, que hace que deban trabajar de forma cooperativa y la descentralización, pues no hay un agente de control designado, si no que la suma de las sinergias del sistema de agentes da como resultado el control o el entendimiento del sistema. Normalmente las definiciones de estos sistemas se refieren a *software* pero pueden ser también robots, seres humanos o equipos humanos. Sus características principales son modularidad, flexibilidad, resistencia y adaptación, pueden presentar problemas llamados de miopía, pues los agentes no tienen una visión global del sistema.

- ***Holonic Manufacturing Systems (HMS)***.

Este sistema de manufactura se basa en la configuración en holones, según Arauzo *et al* (2002) el consorcio del HMS desarrolló la siguiente definición de holón: bloque autónomo y cooperativo de un sistema de fabricación que transforma, transporta, almacena y/o valida información. Un holón puede ser también una parte física del proceso. Esta misma entidad define al sistema de fabricación holónico (HMS): holarquía<sup>1</sup> que integra el conjunto de actividades de fabricación desde el aprovisionamiento hasta la comercialización pasando por el diseño y la producción. Sobre este sistema de fabricación Bongaerst (1998), obtuvo resultados experimentales positivos, donde el paradigma se presenta como una alternativa a los sistemas de control de la fabricación, para adaptarse a los actuales requisitos del mercado. Más recientemente Leitao y Restivo (2008) aplicaron este paradigma para resolver el problema de programación en la industria creando un nuevo algoritmo que permite la rápida reconfiguración de los sistemas de manufactura, a partir de la coordinación entre las entidades (holones), consiguiendo códigos de programación más sencillos y ágiles.

- ***Sistemas de fabricación Fractal (FMS)***.

Este concepto fue inicialmente introducido por Warnecke en 1993 en Alemania es un sistema de reconfiguración en el que cada unidad en una organización se considera como un fractal y presta servicios a otras unidades, cada fractal tiene una estructura interna que puede estar organizada de una forma distinta, pero son similares al verse desde un punto de vista externo (Baykasoglu, 2001)

- ***Genetic Manufacturing System (GMS)***.

---

<sup>1</sup> Conjunto de holones que pueden cooperar para alcanzar una meta o un objetivo. La holarquía define las reglas básicas para la cooperación de los holones limitando su autonomía.

Propuesto por Brussel en 1995, se basa en la clasificación de la información almacenada como en los sistemas vivos en dos tipos ADN que incluye los datos de los productos y equipos de fabricación y la información BN-tipo (brain neural) se compone de las reglas para llevar a cabo procesos (Park & Tran , 2010).

#### **4.1.2. Sistemas biológicos de manufactura (*Biologic Manufacturing Systems (BMS)*).**

Es uno de los enfoques más conocidos para tratar de afrontar las perturbaciones internas y externas de los entornos de producción, propuestos por Ueda, Vaario, & Ohkura (1997) en Japón, su idea central es la aplicación de conceptos como la autoorganización, el auto-crecimiento y la evolución, traídos de la biología para poder enfrentar los cambios en los ambientes de la manufactura. El objetivo era desarrollar un sistema flexible para un entorno dinámico en lugar de una configuración óptima para un entorno estático. En un trabajo anterior Ueda en 1992, establece como bases de estos sistemas a la auto-organización, la aparición de redes en la cadena de Suministro (cliente, distribuidor, productor, y proveedores) y la racionalidad limitada que se refiere a una característica propia de los seres humanos, donde se mezcla la emocionalidad y la racionalidad en la toma de decisiones (Uedaa, Kitob, & Fujii, 2006). Un BMS ideal debe tener como características: 1. Autonomía: organización interna propia enfocada a la estrategia global, 2. Reconocimiento: capacidad de entender el objetivo global, 3. Percepción: el conocimiento de las condiciones locales y del entorno, 4. Aprendizaje: adquirir nuevos conocimientos para la creación de nuevas reglas y estrategias, 5. Espontaneidad: acciones espontáneas de reacción ante la turbulencia y 6. Cooperación: grupos interdisciplinarios (Hon, 2005).

Como se mencionó anteriormente, en países desarrollados estos paradigmas han venido siendo aplicados por lo que en el año 2009 Jiménez y sus colaboradores llevaron a cabo un **ejercicio cuantitativo** que permite observar la tendencia en la investigación en el paradigma biológico, con el objetivo de entender cómo es posible aplicar los elementos biológicos en contextos en vía de desarrollo, para lo cual se utilizaron ecuaciones de búsqueda, con términos como autoorganización, autoaprendizaje, evolución, inteligencia, computación biológica y desarrollo tecnológico determinándose que las principales temáticas se encuentran enfocadas a la aplicación de conceptos biológicos y de técnicas denominadas inteligentes en la fabricación de bienes, entre las cuales se encuentran los algoritmos genéticos y las redes neuronales artificiales en procesos de manufactura. Este estudio permite observar la tendencia de los elementos aplicados desde la biología hacia la computación y la manufactura, donde los artículos sobre algoritmos genéticos y redes neuronales se enfocan hacia la optimización y surge una nueva tendencia de manufactura en célula.

Se encontró que las instituciones que han aportado más a la investigación del paradigma biológico son la Universidad de Kobe en Japón, a la cual pertenecen los autores con la mayor cantidad de registros Ueda, Fujii, Ohkura, Vaario y Hatono, en esta institución se han desarrollado trabajos sobre los sistemas biológicos de manufactura a través de su modelamiento organismos vivos. Las investigaciones más relevantes en esta temática fueron llevadas a cabo por Ueda (1998), Ueda *et al.* (1997; 2000; 2001; 2002; 2007), Fujii *et al.* (2003; 2004), Ohkura y Ueda (1996), Vaario *et al.* (1996a; 1996b; 1997) y Vaario y Ueda (1998), además se destacan la división Manufacturing Science & Technology, de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), en Australia, a la cual pertenecen Tharumarajah, Wells y Nemes. Por otra parte, los investigadores Maione y Naso (2001; 2002; 2003; 2004), del Politécnico Di Bari, de

Italia, trabajan en conjunto en un tema denominado agentes inteligentes autónomos, en sistemas heterárquicos (en red) de manufactura. Así mismo, Ren *et ál.* (1997; 1999), Leitao *et ál.* (2000) y Cheraghi *et ál.* (2004) han escrito artículos relacionados con modelos inspirados en la autoorganización para proveer a los sistemas de manufactura integrados por computador un desarrollo continuo y una capacidad de adaptación al ambiente, entre otros, pues se hace referencia a muchos más autores en ramas como el diseño basado en elementos biológicos, sistemas de manufactura con características de flexibilidad y otros.

Por otra parte Leitao, Barbosa, & Trentesaux (2012), llevan a cabo una recopilación de las aplicaciones de los elementos biológicos para resolver problemas complejos de ingeniería, principalmente, en la manufactura como el ensamble, la optimización de la disposición de la planta, la programación de la producción el control de la producción y la cadena de suministro encontrando trabajos puntuales que involucran soluciones inspiradas en el comportamiento de las hormigas y las abejas la autoorganización y otros elementos biológicos, que se han utilizado para optimizar los diseños de las máquinas, resolver problemas de planificación y asignación de tareas, ruteo, detección de fallas y balances de carga en la maquinaria, generación y evaluación de planes de montaje y distribución de recursos, entre otros.

Para el contexto de países en vía de desarrollo, se han llevado a cabo exploraciones de las aplicaciones de los conceptos biológicos a diferentes campos: Montoya (2010) hace una aproximación biológica a los mecanismos de integración empresarial, en este menciona que las organizaciones, en comparación con los organismos pueden ser entendidas como seres vivos y ecosistemas. Por su parte, Jiménez y sus colaboradores (2009) llevan a cabo un análisis de las tendencias y los aportes de los atributos de la vida al desarrollo tecnológico, donde destacan lo relacionado con el proceso de fabricación al cual se le atribuyen características de los seres vivos como la autonomía, el autoaprendizaje, la autoorganización, la adaptación y la inteligencia. Se observa entonces, cómo muchos de los autores citados en este documento han desarrollado conceptos como los sistemas biológicos de manufactura, la manufactura biónica y la manufactura inteligente. En este mismo trabajo se concluye: “resulta sorprendente el hallazgo sobre la importancia que en países desarrollados se le ha dado a este tema y los avances reportados tanto en investigación como en soluciones de aplicación industrial, evidenciadas a través de patentes, lo cual debe motivar a grupos de investigación en países con economías emergentes para profundizar en este análisis”. A este respecto llama la atención que en la literatura especializada tanto en artículos como en patentes es casi nulo el aporte de autores e instituciones de origen hispanoamericano. Por lo anterior, se identifica como reto evidente para las escuelas de ingeniería en la región el llevar a cabo procesos de investigación tecnológica y generación de técnicas que tomen como base los fundamentos biológicos para impactar positivamente los procesos productivos y el desarrollo tecnológico para el incremento de la productividad y la competitividad.

Particularmente, en Colombia Rivas (2002) hace una aproximación sobre los nuevos paradigmas organizacionales, incluyendo la organización celular de la que dice parte de la idea que en una organización celular existen unidades autónomas que pueden actuar solas o en conjunto con las demás para crear mecanismos más complejos y además concluye sobre los nuevos paradigmas de las organizaciones que se caracterizan por establecer una ruptura con los principios clásicos de la organización como la formalización, la centralización y la estandarización, y dar paso a la coordinación y la cooperación como nuevas competencias centrales para dar respuesta a las oportunidades de negocio mediante

configuraciones orgánicas mutables. También se encuentran referencias principalmente de aproximaciones a la aplicación de elementos biológicos en las ciencias de la computación; por ejemplo, Ortiz & Rojas (1998) utilizan los fundamentos biológicos para desarrollar la teoría de la computación con ADN; otro ejemplo más reciente lo presentan Gómez y Maldonado (2011), quienes presentan a los sistemas bio-inspirados como una solución teórica para los sistemas computacionales complejos. Sin embargo, no se evidencia una aplicación de los elementos de la biología a los sistemas de manufactura colombianos.

## **5. Reflexiones sobre la pertinencia de los SMB para el mejoramiento de la producción en países en vía de desarrollo**

Al abordar los SMB como alternativas para el mejoramiento de la productividad se evidencian ventajas al aplicar a la manufactura características propias de los sistemas vivos para responder de manera adecuada y en el tiempo propicio a los cambios en el entorno como las variaciones rápidas de tecnología, ciclos cortos de vida de los productos, entrada de competidores y personalización de la oferta que disminuyen la relación entre las ventas y los recursos, relación que es uno de los determinantes de la rentabilidad de la empresa y de su éxito y supervivencia en el mercado competitivo.

Los sistemas de manufactura biológicos han tenido un alto impacto en países principalmente desarrollados, con el objetivo de aplicar a la manufactura características propias de los sistemas vivos, como el autoaprendizaje, la racionalidad limitada, el trabajo en redes o en enjambre, la flexibilidad, entre otros, para responder de manera adecuada y en el tiempo propicio a los cambios en el entorno; sin embargo, estos principios se han adaptado menos de lo esperado en situaciones laborales, principalmente porque la mayoría de industrias prefieren no ser la primeras en probar estos paradigmas en sus procesos o aplicar conceptos emergentes; por lo que uno de los retos es el de convencer a los industriales de las ventajas reales de utilizar sistemas basados en entidades simples, eficaces y adaptables como las que se observan en la naturaleza (Leitao, Barbosa, & Trentesaux 2012).

En las empresas de países en desarrollo generalmente no se evidencian aplicaciones de nuevos paradigmas de manufactura, pero sí investigaciones exploratorias que justifican la necesidad de cambios en las formas de producción que le permita a la organización el mejoramiento de su productividad en aspectos como el manejo adecuado del recurso humano, el capital, las materias primas, el aumento en los beneficios a largo plazo y por consiguiente su sostenibilidad en el mercado dando como resultado el incremento de este factor, para lo cual se debe dar paso a nuevas estructuras organizativas que sean capaces de lograr cambios sostenibles en el largo plazo, como los SMB que ven las organizaciones como un organismo vivo comprendiendo su relación con el medio que la rodea e impartiendo características propias de los seres vivos al aparato productivo.

En este contexto, la aplicación de los sistemas de manufactura biológicos podría permitirle a las empresas prepararse ante los factores externos que afectan la productividad como la interacción con los clientes y la competencia, pues al tener estructuras menos rígidas los trabajadores pueden tomar decisiones directas y evitar situaciones como la pérdida de cliente y las regulaciones del gobierno pues al actuar como un ser vivo la compañía puede reagruparse evitando la disminución de la productividad. En cuanto a los factores internos que afectan la productividad mecanismos como la evolución deben ayudar a que la investigación y desarrollo tengan como resultado nuevos procesos y productos que

maximicen el uso de los recursos y la racionalidad limitada propia de estos conceptos emergentes ayudará a que los aspectos organizativos referentes a las técnicas de administración y relaciones con los empleados sean más efectivas convirtiendo a la cooperación en un elemento central de la organización lo que según las teorías expuestas anteriormente es uno de los factores de éxito para el incremento de la productividad.

Con respecto a lo anterior, es necesario continuar con investigaciones y experiencias emprendedoras que permitan desarrollar modelos aplicables a las organizaciones en los que se obtenga la mejora en la productividad con base en la aplicación de sistemas de manufactura emergentes como lo son los que se fundamentan en conceptos biológicos.

## Referencias

ABBOTT, R., & ECKSTEIN, M. Quality Circles and Quality of Work Life. Milwaukee, WI.: American Society for Quality Control, 1981.

ADAM, E. Towards a typology of production and operations management systems. *Academy of Management Review*, v. 8, n.3, p.365-375, set 1983.

ARAÚZO, J. A., DE BENITO, J. J., & DEL OLMO, R. Sistemas de Fabricación Holónicos. II Conferencia de Ingeniería de Organización, p. 717-724, 5-6 de 09 de 2002.

BAYKASOGLU, A. The reconfiguration problem of manufacturing systems. *Journal of Polytechnic*, v.4, n.4, p. 69-80, set 2001.

BONGAERST, L. Integration of Scheduling and Control in Holonic Manufacturing Systems. Bélgica: Ph.D. Dissertation, K.U.Leuven, PMA Division, 1998.

CEQUEA, M., RODRIGUEZ, C., & NÚÑEZ, M. Los factores humanos que inciden en la productividad y sus dimensiones. 4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Donostia-San Sebastián, 2010.

COLMENARES, O. Medición de la productividad empresarial. Disponible en: <http://www.gestiopolis.com/economia/productividad-y-lamedicion-de-la-productividad.htm> [Accesado en enero del 2007], 2007.

DAVENPORT, T. (1996). The Fad that Forgot People. *Fast Company*, v.1, n.1, p. 77-74, set 1996.

DEMEESTER, L., EICHLER, K., & LOCH, C. (2003). What the biological cell can teach us about the future of manufacturing. Working Paper Series Organic Production Systems.

CALINESCU, A., EFSTATHIOU, J., & HUATUCA, L. (2001). Classes of complexity in manufacturing. Proc. National Conf. Manufacturing. Research, UK, p. 351-356.

GOLA, A., & SWIC, A. Directions of manufacturing system's evolution from the flexibility level point of view. Disponible en [http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk\\_pdf\\_2012/e021.pdf](http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2012/e021.pdf), p. 226-238, 2010.

GÓMEZ, A., & MALDONADO, C. Sistemas bio-inspirados: Un marco teórico para la ingeniería de sistemas complejos. Documento de investigación No. 112. Universidad del Rosario-Facultad de Administración, 2011.

GUERRERO, A., & RIVERA, C. México: cambio en la productividad total de los principales puertos de contenedores. *Revista de la CEPAL*, v.99, p.175-187, set 2009.

HALEVI, G. *Handbook of Production Management Methods*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

HAMMER, M. Reengineering work: don't automate, obliterate. *Harvard business review*, v. 68, p. 4104-112, set 1990.

HANNULA, M. Total productivity measurement based on partial productivity ratios. *International Journal of Production Economics*, v. 17, n.1, p. 57-67, set 2002.

HON, K. Performance and Evaluation of Manufacturing Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 54, n.2, p. 139-154, set 2005.

ILLERA, E. *Anatomía Y Fisiología De La Organización*. Bogotá: Universidad De La Salle, 1982.

INGLE, S. *Quality Circles Master Guide: Increasing Productivity with People Power*. Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1982.

ISHIKAWA, K. *What is total quality control? the Japanese way*. London, UK.: Prentice-Hall International, 1985.

J.PEKLENIK. *Advances in manufacturing systems*. Pergamon Press, 1971.

JÁUREGUI, A. Productividad y competitividad. Algunas consideraciones . *Gestiópolis* .Disponible en <http://www.gestiopolis.com/canales/economia/articulos/no2/productividad%20y%20competitividad.htm>, 2000.

JIMÉNEZ, C., CASTELLANOS, O., & MONTOYA, L. (2009). Manufactura biológica e inteligente: atributos de la vida aplicados al desarrollo tecnológico. *Ingeniería e Investigación*, v.29, n.2, p. 127-134, set 2009.

KOREN , Y., HEISEL , U., JOVANE, F., MORIWAKI, T., PRITSCHOW , G., ULSOY, G., y otros. Reconfigurable Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP*, v.48, n.2, p. 527-540, set 1999.

KUMAR, S. Production and Productivity- Factors affecting productivity. *EnZineArticles.com*. Disponible en <http://ezinearticles.com/?Production-and-Productivity--Factors-Affecting-Productivity&id=6376981>, 2011.

LEITAO , P., & RESTIVO, F.A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v.24, n.5, p. 625-634, set 2008.

LEITAO, P., BARBOSA, J., & TRENTESAUX, D. Bio-inspired multy-agent systems for reconfigurable manufacturing systems. *Engenierring applications or artificial intelligence*, v.25, n.5, p.934-944, set 2012.

MARTÍNEZ, E., DÍAZ, J. J., & JARA-DÍAZ, S. Productivity and efficiency with discrete variables and quadratic cost function . *International Journal or Production Economics*, v.132, n.2, p. 251-257, set 2011.

- MARTÍNEZ, M. E. El concepto de la productividad en el análisis económico *Madrid. Universidad Complutense*, 2006.
- MAWSON, P., CARLAW, K. I., & MCLELLAN, N. Productivity measurement: Alternative approaches and estimates. New Zealand Treasury working paper 03/12, 2003.
- MCLELLAN, N. Measuring Productivity using the Index Number Approach: An Introduction. NEW ZEALAND TREASURY WORKING PAPER 04/05, 2004.
- MERINO, F. Firms internationalization and productivity growth. *Research in Economics*, v.66, n.4, p.349-354, set 2012.
- MONTOYA , R., CASTELLANOS , O., & MONTOYA, I. La Gerencia Genética: una metáfora biológica aplicada a la gestión de la Biotecnología. *Revista de Ciencias Administrativas y Sociales INNOVAR*, v.14, n.24, p. 93-104, set 2004.
- MONTOYA, L. Gestión de sistemas de integración empresarial desde una perspectiva biológica. Tesis de Grado para optar al título de Doctor en ciencias económicas-Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- MONTOYA, L., MONTOYA, I., & CASTELLANOS, O. Características de una aproximación biológica para el estudio de mecanismos de integración empresarial . XIV Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas-Monterrey, 2010.
- N.R.GREENWOOD. *Implementing Flexible Manufacturing Systems*. Macmillan Education, London, 1988.
- OECD. Measurement or aggregate and industry-level productivity growth. *Measuring productivity-OECD Manual*, 2001.
- OECD. *Measuring productivity-OECD Manual*. Measurement or aggregate and industry-level productivity growth. OECD, 2001.
- ORTIZ, E., & Rojas, C. Fundamentos de computación con ADN. *Ingeniería e investigación*, v. 40, p.25-44, set 1998.
- PARK, H.-S., & TRAN , N.-H. An intelligent manufacturing system with biological principles. *International journal of CAD/CAM*, v. 10, no 1, p.39-50, set 2010.
- PEDRAZA, O. H. Un enfoque sistémico sobre los factores determinantes de la productividad. Morelia, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2007.
- RIVAS, L. A. Nuevas formas de organización. . *Estudios Gerenciales*, 2002, v. 18, n. 82, p. 13-45, set 2002.
- RIVERA, H. Cambio estratégico para entornos turbulentos. *Facultad de ciencias económicas Investigación y Reflexión-Universidad del Rosario*, v.18, n.1, p.87-117, set 2010.
- SAADAT, M., & OWLIYA, M. Changes and disturbances in manufacturing systems: A comparison or emerging concepts. *Automation Congress*, p.1-6, 2008.
- SCHONBERGER, R. J. Japanese production management: An evolution with mixed success. *Journal of Operations Management*, v.25, n.2, p. 403-419, set 2007.

SHAPE, A. Productivity concepts, trends and prospects: an overview. The review of economic performance and social progress, v.2, p.29-56, set 2002.

SINGH, H., MOTWANI, J., & KUMAR, A. A review and analysis or the state-of-art research on productivity measurement. Industrial Management and data systems, v.100, n.5, p.234-241, set 2000.

SUGIMORI, Y., KUSUNOKI, K., CHO, F., & UCHIKAWA, S. Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect for human system. The International Journal of Production Research, v.15, n.6, p. 553-564, set 1977.

TOVAR, L. A. Nuevas Formas Organizacionales. Estudios Gerenciales-Icesi, v.18, n.82, p. 13-45, set 2002.

UEDA, K. Emergent synthesis approaches to biological manufacturing systems. Manufacturing Systems, 1992.

UEDA, K., KITO, T., & FUJII, N. (2006). Modeling Biological Manufacturing Systems with Bounded-Rational Agents. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 55, n.1, p. 469-472, set 2006.

UEDA, K., VAARIO, J., & OHKURA, K. Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 46, n. 1, p.343-372, set 1997.

UEDAA, K., KITOB, T., & FUJIIA, N. Modeling Biological Manufacturing Systems with Bounded-Rational Agents. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.55, n.1, p. 469–472, set 2006.

VELÁSQUEZ, Y., RODRIGUEZ, C., & GUAITA, W. (2012). Modelo de los factores que afectan la productividad. XVI Congreso de Ingeniería de la Organización. Vigo. Julio 18-20, 2012. ADINGOR. Asociación para el desarrollo de la Ingeniería de la Organización, p. 847-854,2012.

WARNECKE, H., & STEINHILPER, R. Flexible Manufacturing Systems: Proceeding of the 7th International Conference and 20th Annual IPA Conference, 13-14 September 1988. Stuttgart, West Germany: IFS Publication, 1998.

WOOLDRIDGE, M. An Introduction to Multi-Agent Systems. Liverpool, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2002.