

## THE MANAGEMENT OF COMPLEXITY IN REMANUFACTURING PROCESSES

Salazar Ruiz, E.<sup>1</sup>; Arredondo Soto, K.<sup>2</sup>; Capuz Rizo, S.<sup>3</sup>; Pacheco Blanco, B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IT de Mexicali, <sup>2</sup> Universidad Autónoma de Baja California, <sup>3</sup> Universitat Politècnica de València

Remanufacturing is one of the strategies of end of life (EOL strategies for End Of Life) having greater recovery and aims to restore the product to a “like new” condition, offering the same quality and guarantee given for a new product. However, remanufacturing is the most complex in the reverse logistics activities. This communication seeks to recognize the factors involved in the process, which define its complexity and disseminate what is being done in remanufacturing companies to manage the complexity of the recovery system and analyze the application of some models that are currently used in measurement.

**Keywords:** *Remanufacturing; Measurement of the complexity; End of life*

## LA GESTIÓN DE LA COMPLEJIDAD EN LOS PROCESOS DE REMANUFACTURA

La remanufactura es una de las estrategias de fin de vida (estrategias EOL por las siglas en inglés de End Of Life) que presenta mayor recuperación y su objetivo es restaurar los productos a una condición de nuevos, ofreciendo la misma calidad y garantía dada para un producto nuevo. Sin embargo, la remanufactura es la actividad más compleja dentro de las actividades de logística inversa. La presente comunicación busca reconocer los factores que intervienen en el proceso; las cuales definen su complejidad, así como difundir qué se está haciendo en las empresas remanufacturadoras para gestionar la complejidad del sistema de recuperación y analizar la aplicación de algunos modelos que actualmente son utilizados en su medición.

**Palabras clave:** *Remanufactura; Medicion de complejidad; Fin de vida*

## 1. Introducción

La remanufactura se lleva a cabo como actividad industrial desde al menos cien años atrás en los Estados Unidos aunque no se conocía con ese nombre (Lund, 2010). Ijomah (2002) define la remanufactura como el proceso de retorno de un producto usado a una condición igual a la de uno nuevo, incluyendo la garantía. Actualmente, existen múltiples ejemplos de productos remanufacturados que pueden ser adquiridos a un precio desde 10 a 70 por ciento menor que su similar nuevo, teniendo la peculiaridad de que algunos tienen garantía de por vida. Algunos ejemplos de productos remanufacturados son: los cartuchos de tinta para impresoras y/o copiadoras, la industria de autopartes (arranques, amortiguadores, acumuladores de energía, balatas, entre otras), componentes de maquinaria pesada y turbinas industriales de gas.

La industria de la remanufactura incluye muchos sectores del mercado y proporciona importantes beneficios económicos, ambientales y sociales (Carter y Ellram 1998, Dowlatshahi 2000, Parkinson y Thompson 2003). Empresas exitosas de una variedad de industrias incluyen Dell, General Motors, Hewlett-Packard (HP), IBM, Kodak, y Xerox, entre otras, mismas que han adoptado la remanufactura de diferentes maneras (Deutsch 1998, Ginsburg 2001).

El problema es que la remanufactura es la red más compleja dentro de las actividades de logística inversa (Zhang, 2010). Existe un alto grado de incertidumbre en términos de a) cantidad, b) calidad y c) el periodo de tiempo en el que el consumidor efectuará el retorno. Los factores anteriormente mencionados hacen que la remanufactura sea un proceso más complejo que la manufactura convencional, ya que la planeación de la remanufactura se hace, en función de la disponibilidad del *core* (producto/componente base o núcleo sobre el que se realiza el proceso de remanufactura) y de las condiciones en las que retorna al proceso. Por lo tanto es de interés conocer la respuesta de las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo puede ser definido y modelado un sistema de remanufactura, tomando en cuenta sus factores estructurales y operacionales?
- ¿Qué aplicaciones se ha dado a la medición de la complejidad en manufactura, en función de modelos generados?
- ¿Cuáles son los efectos de la complejidad en el proceso?
- ¿Qué están haciendo las empresas para gestionar la complejidad del sistema de recuperación en el proceso de remanufactura?

## 2. Materiales y métodos

De acuerdo a la naturaleza del trabajo, su orientación fue dada por la investigación no experimental, con diseño transeccional de estudios exploratorios. La investigación exploratoria auxilió para alcanzar los objetivos, contribuyendo para la búsqueda de la información. Ya en la parte de procedimientos fue usada la investigación bibliográfica basado en el material ya publicado como libros, artículos y tesis.

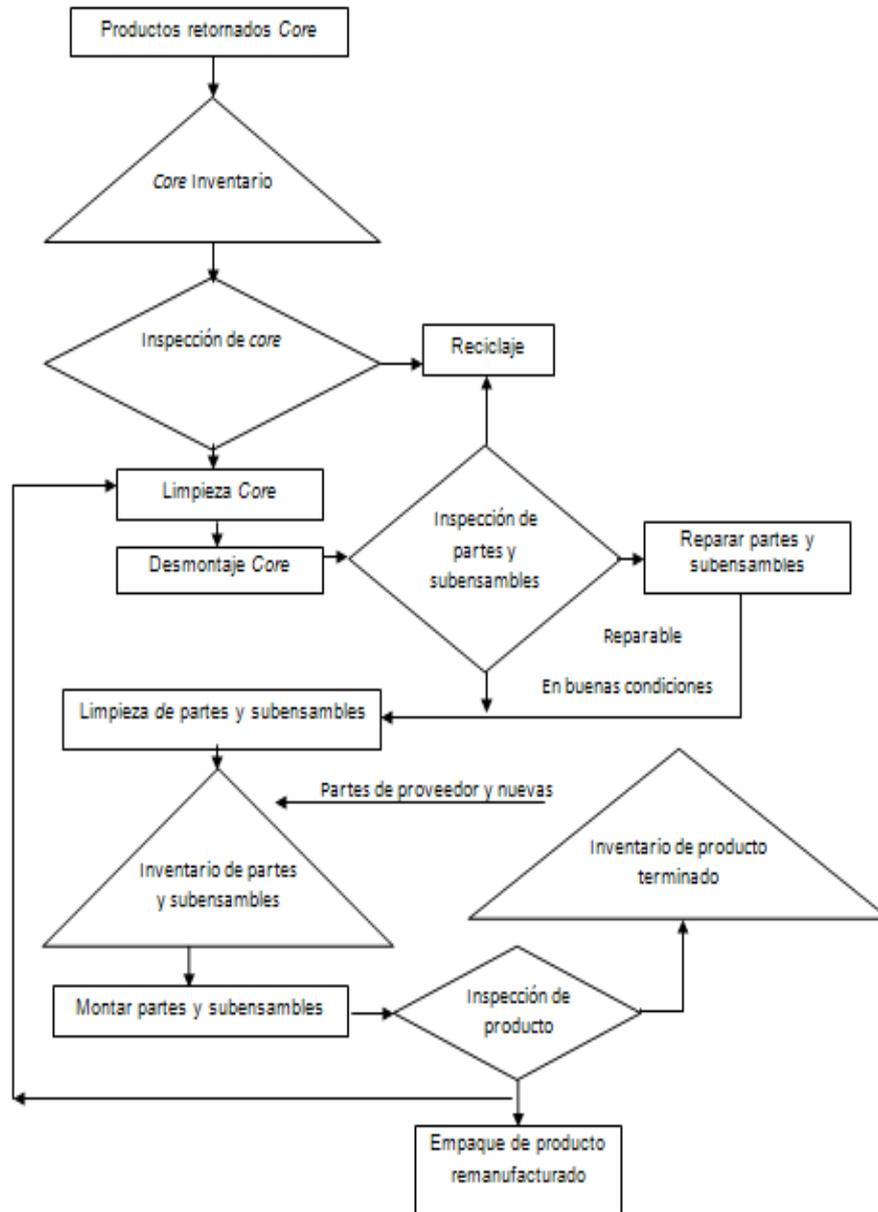
Primero se busca reconocer los factores críticos del proceso de recuperación de productos para remanufactura, lo cual define su complejidad. Posteriormente, se pretende investigar que están haciendo las empresas remanufacturadoras para gestionar la complejidad y hacer una revisión general de modelos existentes para medirla, que han sido utilizados y/o que podrían ser adaptados exitosamente.

## 2.1 Revisión de literatura

### Remanufactura

La remanufactura consiste en una serie de actividades (clasificación, inspección, desensamble, limpieza, reproceso y re ensamble) destinadas a regresar un componente o producto desechado a sus especificaciones originales de diseño, logrando así, darle una segunda vida útil, ofreciendo a los clientes garantía de nuevo a un precio mucho menor.

Figura 1 Proceso de Remanufactura

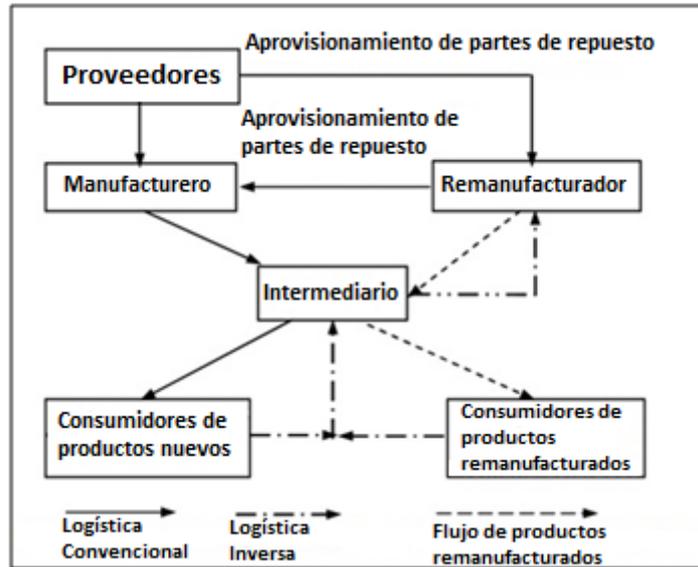


Fuente: Ilgin y Gupta, 2012.

Los pasos a seguir en el proceso de remanufactura pueden variar dependiendo del tipo de producto a ser remanufacturado. La Figura 1 muestra los pasos más comúnmente aplicados en la industria remanufacturera. Es importante resaltar que el proceso de reparación de partes y sub ensambles puede abarcar una secuencia de operaciones adicional, más

compleja de lo que parece en la Figura 1 en el diagrama de proceso. Las actividades desarrolladas en el proceso integran la complejidad interna de recuperación. La Figura 2 muestra el flujo de material en el proceso de recuperación y actores intervinientes en el proceso. La red logística formada por las actividades de remanufactura integra la complejidad externa en el proceso.

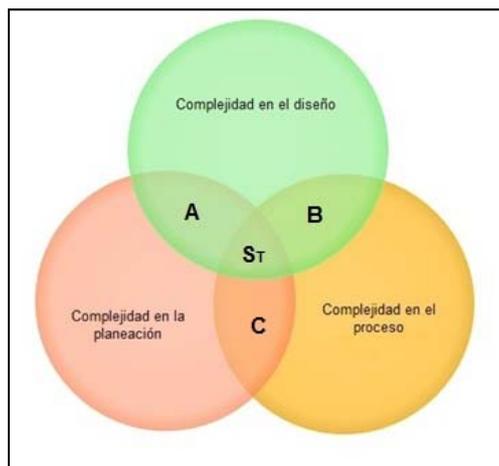
**Figura 2 Modelo Logístico de una Cadena de Suministros de Ciclo Cerrado incluyendo Remanufactura**



Fuente: Jukun, 2008.

La remanufactura de un producto desarrolla operaciones concernientes al diseño, la planeación y el proceso, entonces el trabajo desarrollado para llevar a cabo la remanufactura conlleva la aplicación de cada una de las herramientas que naturalmente se utilizan en los sistemas de manufactura convencionales. La complejidad generada en las actividades de remanufactura puede describirse con el diagrama mostrado en la Figura 3.

**Figura 3 Complejidad total en el sistema de remanufactura**



Fuente: Creación propia.

$$S_{TR} = S_D + S_P + S_O$$

**Ecuación (1)**

Donde:

STR = Complejidad total en el sistema de remanufactura.

SD = En la complejidad del diseño intervienen: el diseño del producto, de las cadenas de suministro de ciclo cerrado (desarrollo de redes con modelos estocásticos, determinísticos y de consideraciones simultáneas de redes y diseño del producto), en la elección del producto y en la evaluación de las instalaciones a utilizar en el proceso de remanufactura. La mayoría de las investigaciones realizadas en el área de diseño para remanufactura se enfocan al producto y a las redes logísticas inversas.

SP = La complejidad de las actividades de planeación considera: pronósticos, secuenciamiento del trabajo, administración de inventarios (modelos de inventarios determinísticos y probabilísticos), planeación y control de la producción, costeo, mecanismos de control, administración bajo incertidumbre, administración en la adquisición de productos, evaluación de proveedores y de medidas de desempeño.

SO = La complejidad del proceso tiene relación con las actividades de desensamble (programación, secuenciamiento, balanceo de línea, automatización, sistema de despiece ordenado, ergonomía), limpieza, inspección, desarrollo y re ensamblaje.

Intercepción entre la complejidad del diseño y la complejidad de las actividades de planeación (A), hace referencia a los proyectos de desarrollo de productos o *upgrade*. La intercepción entre la complejidad del diseño y la complejidad del proceso (B), se interpreta como la relación de la elección del proceso de remanufactura en función del diseño, la profundidad y amplitud del BOM (*Bill Of Materials*) y los componentes estándar; y en la intercepción entre la complejidad de las actividades de planeación y la complejidad del proceso (C), intervienen la mezcla de productos, proporción de la mezcla y el número de componentes.

Es notorio que las actividades de remanufactura generan información de manera continua, por lo que medir la incertidumbre total involucrada requiere de un análisis exhaustivo, por lo tanto, un modelo que incluya todas las variables resultaría muy costoso para desarrollarlo y tomaría mucho tiempo la obtención de información. Debido a esto, es conveniente realizar un análisis individual de los subsistemas y elementos que conforman el sistema de remanufactura y determinar los factores críticos en la recuperación.

Clottey y Benton (2010) identifican como un problema importante de los remanufacturadores el asegurar un suministro suficiente de *core* para apoyar las operaciones de remanufactura. El abastecimiento de *core* es un conjunto de actividades complejas que requieren una coordinación minuciosa para evitar la acumulación incontrolada de inventario base o la escasez, que conduciría a niveles inaceptables de servicio al cliente. Sin embargo, existe una falta de confianza en los pronósticos que generalmente realiza la alta gerencia y son a corto plazo. Las actividades de planeación y control se llevan a cabo con métodos manuales, por lo que el uso de técnicas estadísticas y matemáticas representa un área de oportunidad en los procesos de remanufactura.

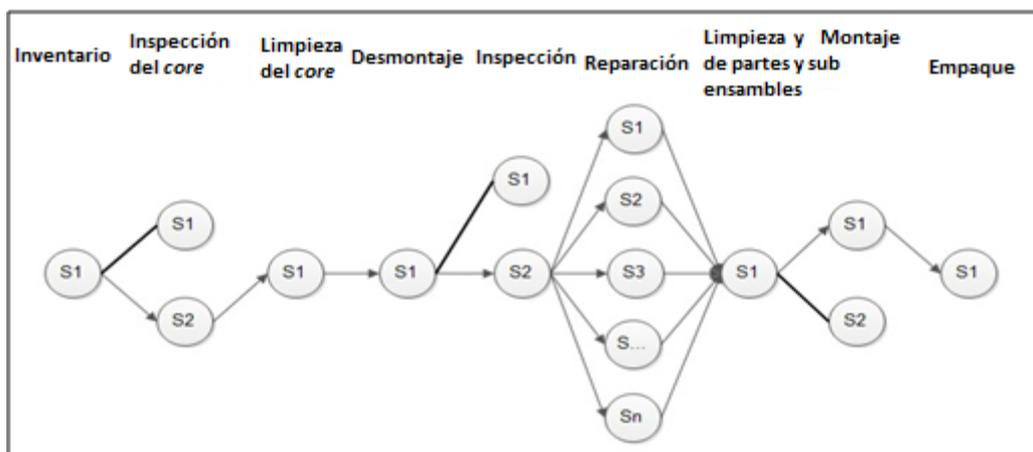
La calidad con la que llega un *core* al proceso no es uniforme, esto genera incertidumbre en el momento de decidir el conjunto de operaciones que se aplicarán en cada caso. Algunos autores han utilizado el término niveles de calidad para clasificar las condiciones de aceptación o rechazo de un *core* (Mezghani y Loukil, 2011). Otros autores consideran solo dos categorías: buenos y malos; donde el *core* bueno se trata con el mismo proceso y el malo es rescatado con procesos alternos (Bakal y Akcali, 2006), y diferentes costos de remanufactura dependiendo de la calidad de arribo del *core* (Galbreth y Blackburn, 2006).

El periodo de tiempo en que arribarán los componentes no es un problema para un remanufacturador que es el fabricante original del equipo, debido a que tiene un estudio

previo del análisis de ciclo de vida del producto, lo conoce y por ende puede hasta negociar con los clientes el regreso de los componentes. No así en el caso de los remanufacturadores independientes, pues no tienen información relevante de la zona de clientes que les permita hacer un pronóstico confiable.

Procesos y estados posibles. El proceso de remanufactura está integrado por sub-procesos, donde cada uno al realizarse la operación, puede resultar tener diferentes estados, los cuales tienen una ocurrencia probabilística. De tal manera que, cada pieza al ingresar en el proceso, según la ruta que siga y los estados probables en cada estación de trabajo, tiene su propio nivel de complejidad. De acuerdo con los estudios para la medición de la complejidad de Frizelle et al., Calinescu et al. y Sivadasan et al. (2000, 1998, 2002), es posible calcular el nivel de complejidad en las actividades de manufactura basándose en la entropía de Shanon (1948) y tomando en cuenta su comportamiento probabilístico. La Figura 4 muestra los estados posibles dentro del proceso de remanufactura.

**Figura 4 Estados posibles en el proceso de remanufactura**



Fuente: Creación propia

### **Gestión de la complejidad en operaciones de recuperación en las remanufacturadoras**

Según Argyris (1978,1990) el éxito de toda organización está supeditado a una adecuación entre las decisiones adoptadas por la misma y la naturaleza de los problemas a los que se enfrenta, así mismo, afirma la existencia de un bucle de realimentación entre la complejidad y la incertidumbre de los problemas, y la racionalidad de las decisiones, y que a mayor complejidad, menor racionalidad y, a menor racionalidad, mayor complejidad e incertidumbre. Las compañías manufactureras están cambiando la manera en la que abordan la complejidad en sus operaciones, convirtiendo al aprendizaje organizacional (Senge, 1993), en el elemento capaz de utilizar los propios problemas de la organización, como elemento, a la vez reductor de los límites a la racionalidad, y multiplicador de las habilidades de decisión y de la racionalidad de las mismas, lo que en última instancia contribuirá a reducir la gravedad de los futuros problemas de la organización. Sin embargo, todo este aprendizaje requiere pasar a otro nivel de madurez, en el cual muy pocas compañías están participando.

Las compañías remanufacturadoras como grupo se están enfocando en aplicar filosofías y herramientas de calidad que les permita simplificar sus operaciones, algunas de estas son Seis Sigma, Manufactura Esbelta, TRIZ, Matriz Pugh, QFD, Modularización y AMEF; herramientas que les permita tomar decisiones lo más acertadamente posible. Se ha trabajado en otras herramientas y métodos, el problema es que no son utilizadas en la industria debido a que no son holísticos y algunas veces son subjetivos; algunos ejemplos

son: Métricos para en el Diseño para Remanufactura (Brass y Hammond, 1996; Amezcua et al 1995), Selección de sujetadores y conexiones (Shu y Flowers, 1991), RemPro matrix (Sundin, 2004) y REPRO2, (Zwolinski et al, 2006). Matsumoto y Umeda (2012) afirman que las empresas remanufacturadoras están involucrándose más a fin de reducir la complejidad en sus operaciones, por ejemplo, están participando en las actividades de recolección y creando nuevos canales incluso en los puntos de venta. Las empresas también están dedicando recursos al área de diseño para remanufactura, la renovación constante de los procesos y; al desarrollo y acumulación del *know how* (saber cómo). La falta de confianza del cliente en los productos remanufacturados genera incertidumbre en la planeación por lo que las empresas también han invertido recursos en fortalecer el nivel en el control de la calidad y los vínculos con los clientes que permita incrementar el reconocimiento de los productos remanufacturados por parte de los clientes en el servicio de post venta.

### **Modelos para la medición de la complejidad**

Hinegardner y Engelberg (1983) sugieren lo que tal vez es la medida más simple de complejidad, al referirse al número de partes diferentes, en verdad, el número de elementos puede dar una idea de la complejidad, pero puede dejar de lado lo que es quizás más importante: "organización" y "niveles de organización" (Smith, 1990).

La entropía de Shannon (1948) puede ser vista como la dificultad de adivinar un mensaje que pasa por un canal dado el rango de posibles mensajes. La idea es que lo más difícil es adivinar la información que da un mensaje. No se pretendía como una medida de la complejidad, pero se ha utilizado como tal por autores posteriores [(Frizelle, 1996), (Efstathiou et al, 2002), (Sivadasan, 2004), (Isik, 2010), (Battini y Persona, 2007), (Ramoni y Zhang, 2012)].

En 1985 Yao introdujo el concepto de direccionamiento flexible entrópico para Sistemas de Manufactura Flexibles (FMS Flexible Manufacturing Systems), desarrollado tiempo después por Yao y Pei (1990). Su enfoque se basa en la idea de que un FMS consta de dos módulos básicos: materiales y de información. A partir de estos módulos, Yao introduce un concepto de teoría de la información, enrutamiento o direccionamiento a la entropía, que mide la flexibilidad de enrutamiento. Sharit, (1987) por su parte, utiliza la entropía para evaluar el desempeño humano de control y supervisión en Sistemas de Manufactura Flexible (FMS). FMS fueron considerados particularmente atractivos para este trabajo debido a su complejidad combinatoria, que a su vez determina una reducción en el nivel de predicción del estado del sistema como una función de los eventos del sistema. El concepto de entropía fue utilizada como un medio explicativo de los hallazgos más importantes del estudio.

Se ha utilizado también una medida estática de complejidad, basada en la medición de la entropía para la programación de la mezcla de tareas (Frizelle, Woodcock 1994; Calinescu et al 1997). Karp y Ronen (1992) desarrollaron una aproximación que incluye una fórmula para la determinación de ubicaciones basada en la medición de la entropía. Deshmukh, Talavage y Barash (1993, 1992 y 1998) desarrollaron un marco analítico para evaluar la complejidad estática de los sistemas de manufactura basado en la entropía, el entorno de la manufactura es considerado mediante la representación de un sistema discreto de manufactura de partes, con varios tipos de piezas mecanizadas o formadas simultáneamente en el sistema. Fujimoto et al. (2003) introdujeron una medida de complejidad basada en la estructura del producto utilizando las diferentes etapas de planeación del proceso. ElMaraghya et al. (2005) aplicaron la función de la entropía para cuantificar la complejidad de sistemas de manufactura y sus configuraciones con ejemplos de procesos de máquinas. Guenov (2002) utiliza los fundamentos del diseño arquitectónico y entropía para introducir un métrico para el sistema de diseño mediante una comparación de alternativas basada en los costos, valor, funcionamiento y riesgo técnico o complejidad.

Sivadasan et al. (1999) realizan un proyecto en colaboración con la iniciativa privada del Reino Unido para medir la complejidad y modelar el flujo de información en sus límites, destacan los obstáculos para la integración de la cadena de suministros y evalúan su severidad mediante la medición relativa de la complejidad utilizando un método basado en la entropía. Wu et al (2002) trabajaron en: “*A Simulation Study on Supply Chain Complexity in Manufacturing Industry*”, y hace mención de la complejidad desarrollada por Frizelle para sistemas de manufactura. En 2004, Sivadasan et al. realizan un trabajo titulado: “*A methodology for measuring complexity in the supply chain*”, en él describen una metodología basada en la entropía para la medición y análisis de la información y complejidad material a través de las interfaces de la organización.

Daria Battini y Alessandro Persona (2007) desarrollaron la investigación: “*Towards a use of network analysis: quantifying the complexity of Supply Chain Networks*”, cuyo objetivo fue cuantificar la complejidad y el nivel de organización de una red industrial trabajando en el desarrollo de *Supply Chain Network Analysis* [SCNA]. En 2010 Filiz Isik realiza un estudio para extender las dos fórmulas (complejidad estructural y operacional) cimentadas en la medida de entropía de Shanon para evaluar la complejidad de las cadenas de suministros; y en 2011 desarrolló: “*Complexity in Supply Chains: A New Approach to Quantitative Measurement of the Supply-Chain-Complexity*”, en él determina que la gestión de la complejidad para manufactura en las empresas, es absolutamente necesaria para poder competir de manera global. Con el fin de gestionar la complejidad de manera efectiva y eficiente se recomienda que la complejidad debe determinarse, medirse, analizarse, reducirse y hasta evitarse. Sin embargo, Isik (2010) propone que no es suficiente para analizar la complejidad, que tiene que ser considerado que cada estado tiene su propio nivel de complejidad..

En 2012, Song Zhu y Yong Xu realizaron el estudio: “*Complexity Measure of Supply Chain Networks*”, donde utilizaron el método entropía de la información para medir y analizar la complejidad de las cadenas de suministros. En 2012 también, Ramoni realiza un trabajo titulado “*An entropy-based metric for product remanufacturability*”, en el que desarrolla un métrico para cuantificar la remanufacturabilidad incorporada en un nuevo producto en sus diferentes etapas de diseño, tomando en cuenta que el diseño de los productos se ha vuelto cada vez más complejo y sus efectos en la remanufactura.

### 3. Resultados y discusión

Los sistemas de manufactura son complejos, ya que son impredecibles y tienen complicadas estructuras y comportamientos (Casti, 1979). Literatura previa ha determinado tres elementos que se pueden utilizar para medir la complejidad: numerosidad, complejidad y estados.

La complejidad en remanufactura puede entenderse al definir primero un sistema de manufactura convencional; para posteriormente redefinir el término en el ámbito de remanufactura con sus características específicas. La complejidad en manufactura consiste en la complejidad tanto interna como externa. La complejidad interna es causada por los elementos del sistema de manufactura en virtud de la gestión del control, por ejemplo, la calidad del diseño del sistema, diseño de instalaciones y diseño de productos. La complejidad externa se relaciona con el impacto en el sistema de gestión mediante acciones ajenas al control, por ejemplo la demanda del cliente.

Deshmukh et al. (1998) y Frizelle y Woodcock (1995) subdividen complejidad de manufactura en complejidad estática y dinámica, mientras que Filiz Isik (2010) la subdivide en estructural y operacional. La complejidad estática se refiere a la complejidad resultante de la estructura del sistema o diseño. La complejidad dinámica se deriva de la naturaleza

dinámica de los recursos del sistema que causa la incertidumbre de un sistema cuando se mueve a través del tiempo (Deshmukh et al., 1998).

**Tabla 2 Trabajos realizados en el área de Complejidad en Manufactura**

Yao (1985)	Introdujo el concepto de direccionamiento (enrutamiento) flexible entrópico para Sistemas de Manufactura Flexibles. Tomando en cuenta los módulos de materiales e información. Propone al menos reducir la entropía.
Sharit (1987)	Introdujo el concepto de direccionamiento (enrutamiento) flexible entrópico para Sistemas de Manufactura Flexibles. Tomando en cuenta los módulos de materiales e información. Propone al menos reducir la entropía.
Deshmuck, Talavage, Barash (1993, 1992, 1998)	Desarrollaron un marco analítico para evaluar la complejidad estática de los sistemas de manufactura basado en la entropía. Calcularon el número total de decisiones referente a la mezcla de partes, como un indicador de flexibilidad en el sistema.
Frizelle, Woodcock (1994); Calinescu et al (1992)	Desarrollaron la medida estática de la complejidad basada en la medición de la entropía para la programación de mezcla de tareas.
Karp y Ronen (1997)	Desarrollaron una aproximación que incluye una fórmula para la determinación de ubicaciones basada en la medición de la entropía.
Sivadasan <i>et al</i> (1999)	Realizan un estudio para medir la complejidad y modelar el flujo de información en sus límites, destacan los obstáculos para la integración de la cadena de suministros y evalúan su severidad mediante la medición relativa de la complejidad utilizando un método basado en la entropía.
Guenov (2002)	Utiliza los fundamentos del diseño arquitectónico y entropía para introducir un métrico para el sistema de diseño mediante una comparación de alternativas basada en los costos, valor, funcionamiento y riesgo técnico o complejidad.
Wu (2002)	Simula la metodología desarrollada por Frizelle (1994).
Fujimoto <i>et al</i> (2003)	Introdujeron una medida de complejidad basada en la estructura del producto utilizando las diferentes etapas de planeación del proceso.
Sivadasan <i>et al</i> (2004)	Realizan una metodología para medir la complejidad en la cadena de suministros, ciclo abierto.
EIMaraghya <i>et al</i> (2005)	Aplicaron la función de la entropía para cuantificar la complejidad de sistemas de manufactura y sus configuraciones con ejemplos de procesos de máquinas.
Battini y Persona (2007)	Cuantificaron la complejidad y el nivel de organización de una red industrial trabajando con el desarrollo de una red analítica de cadenas de suministros.
Filiz Isik (2010, 2011)	Realiza una extensión del trabajo de Shanon para evaluar la cadena de suministros mediante la complejidad estructural y estática.
Song Zhu y Yong Xu (2012)	Miden la complejidad de las cadenas de suministros ciclo abierto.
Ramoni (2012)	Desarrolla un métrico basado en la entropía para cuantificar la remanufacturabilidad incorporada en un nuevo producto en sus diferentes etapas de diseño, tomando en cuenta que el diseño de los productos se ha vuelto cada vez más complejo y toma bajo consideración sus efectos en la remanufactura.

Fuente: Creación Propia.

La complejidad dinámica incluiría aspectos de la complejidad de manufactura que tienen elementos que cambian de estados, como las averías en las máquinas. Sólo tres de los estudios anteriores ha intentado cuantificar una medida interna estática de la complejidad en manufactura (Frizelle y Woodcock, 1995; Deshmukh et al., 1998; e Isik, 2010). Frizelle y Woodcock (1995) y Deshmukh et al. (1998) proponen una entropía basado en la formulación de la complejidad en manufactura derivado de las investigaciones realizadas en el área de teoría de la información. Frizelle y Woodcock (1995) incorporan sólo algunos de los aspectos de la complejidad interna estática en manufactura que se han identificado en la literatura, ellos son: el número de máquinas, la mezcla de productos, y la relación de mezcla de productos. Deshmukh et al. (1998) realizan una formulación que captura más aspectos de la complejidad en manufactura que la de Frizelle y Woodcock (1995) ya que incorporan una medida de la mezcla de productos, relación de mezcla de productos, rutas, tiempos de proceso, y el número de máquinas. Sin embargo, su medida está dirigida únicamente a cuantificar la complejidad interna estática de los sistemas de fabricación flexibles, lo que limita su aplicabilidad.

A partir de investigaciones anteriores sobre la complejidad en manufactura (ver Tabla 2), se identificaron doce aspectos distintos de la complejidad interna estática en manufactura. Se trata de la mezcla de productos, relación en la mezcla de productos, el número de componentes, la complejidad del producto, la complejidad del proceso, la integración entre los procesos, el número de máquinas o recursos, rutas de fabricación, tiempo de procesamiento, distribución de la planta, el tiempo de puesta a punto, y el tamaño del lote. Algunos de estos aspectos de la complejidad se han estudiado de forma independiente en la investigación anterior. La medida en que la mezcla de producto crea complejidad ha mostrado algo de confusión en los resultados. Debido a que una mayor gama de productos aumenta el número de componentes y procesos en un sistema, aumenta la complejidad interna estática de manufactura y el rendimiento de la planta es afectado. Sin embargo, es confuso debido a que no necesariamente el incremento de la complejidad es malo. Considerando el crecimiento de una compañía, con el incremento en la demanda, es factible la diversificación de productos, lo que naturalmente requeriría de una cantidad de personal y equipo mayor y especializados, el crecimiento genera complejidad en el sistema productivo pero también beneficios, las empresas necesitan conocer hasta qué punto es conveniente limitar el crecimiento de la complejidad en su entorno, de manera que los beneficios no se vean colapsados por el control rígido de los niveles de complejidad.

#### **4. Conclusiones y recomendaciones**

El desarrollo algo limitado e incompleto de las medidas cuantitativas de complejidad en manufactura deja un margen considerable para nuevas investigaciones. La literatura tiene aislado los aspectos relevantes de la complejidad interna estática en manufactura y por ende en remanufactura; de la cual hasta el momento no se han encontrado estudios salvo en el diseño del producto (Ramoni, 2012). Al utilizar la definición operativa de la complejidad en conjunción con estos aspectos de la complejidad en manufactura permitirá el desarrollo de una formulación más completa para determinar la complejidad interna estática en remanufactura.

#### **5. Referencias bibliográficas**

Amezquita, T. Hammond, R. Salazar, M. Brass, B. (1995). Characterizing the Remanufacturability of Engineering Systems, *Proceedings of ASME Advances in Design Automation*, Boston, pp, 271-8.

- Argyris, Ch. Schon, D. A. (1978). *Organizational Learning. A Theory of Action Perspective*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Argyris, Ch. (1990). *Overcoming Organizational Defenses. Facilitating Organizational Learning*, Allyn & Bacon, Prentice-Hall. Boston. [Traducido al castellano en *Cómo vencer las barreras organizativas*, Díaz de Santos, Madrid, 1993.]
- Bakal, I. Akcali, E. (2006). Effects of random yield in remanufacturing with Price-Sensitive Supply and Demand. *Productions Operations Management*. Vol. 15 (3). Pp. 407-420.
- Battini, D., Persona, A. and Allesina, S. (2007). Towards a use of network analysis: quantifying the complexity of Supply Chain Networks. *Int. J. Electronic Customer Relationship Management*, Vol. 1, No. 1, pp.75–90.
- Brass, B. Hammond, R. (1996). Towards Remanufacturing-Metrics for Assesing Remanufacturability. *1st International Workshop on Reuse*, Eindhoven, The Netherlands, pp. 35-52.
- Calinescu, A. Efstathiou, J. Schirn, J. Bermejo, J. (1998). Applying and assessing two methods for measuring complexity in manufacturing. *Journal of the Operational Research Society* (1998) 49, 723–733. doi:10.1057/palgrave.jors.2600554
- Carter, C. Ellram, L. (1998). Reverse Logistics: A Review of The Literature and Framework for Future Investigation. *Journal of Business Logistics*, Vol. 19 Nj 1.
- Casti, J.L. 1979. *Connectivity, complexity and catastrophe in Large-Scale systems*. John Wiley & Sons.
- Clotey, T. Benton, W. C. (2010). *Core Acquisitions Planning in the Automotive Parts Remanufacturing Industry*. (PhD Thesis, The Ohio State University). Recuperado desde [http://www.apra.org/News/Papers\\_Surveys/Core\\_Acquisitions\\_Planning.pdf](http://www.apra.org/News/Papers_Surveys/Core_Acquisitions_Planning.pdf)
- Deshmukh, A. V., J.J. Talavage and M. M. Barash. (1992). Characteristics of part mix complexity measure for manufacturing system., *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, New York, USA, Vol. 2, 1384-1389.
- Deshmukh, A.V. (1993). *Complexity and chaos in manufacturing systems*. (Ph.D. Thesis, Purdue University, USA.) Recuperado desde <http://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI9403676/> .
- Deshmukh, A.V., J.J. Talavage and M.M. Barash. (1998). Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity, *IIE Transactions*, Vol. 30, 645-655.
- Deutsch, C. (1998). Second Time Around, and Around; Remanufacturing Is Gaining Ground in Corporate America. Recuperado desde <http://www.nytimes.com/1998/07/14/business/second-time-around-around-remanufacturing-gaining-ground-corporate-america.html?pagewanted=all&src=pm>
- Dowlatshahi, S. (2000). Developing a Theory of Reverse Logistics. *Interfaces* 2000; 30(3): pp. 143-155.
- Efstathiou, J. Calinescu, A. Blackburn, G. (2002). A Web-based Expert System to Assess the Complexity of Manufacturing Organizations. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, 305-311.
- Elmaraghya HA, Kuzgunkayaa O, Urbanic R.J. (2005). Manufacturing Systems Configuration Complexity. *Annals of the CIRP* 54:445–448.
- Frizelle, G. D. M. and E. Woodcock. (1995). Measuring Complexity as an Aid to Developing Operational Strategy. *International Journal of Operations and Production Management* 15(5): 26-39.

- Frizelle, G.(1996). Getting the measure of complexity. *Manufacturing Engineer*, 75. pp. 268-270. ISSN 0956-9944.
- Frizelle, G. McCarthy, I. Thierry, R. (2000). Complex Systems Theory: implications and promises for manufacturing organizations. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 2, Nos. 1–7, 2000: pp 559-579.
- Fujimoto, H. Ahmed, A. Iida, Y. Hanai, M. (2003), Assembly process design for managing manufacturing complexities because of product varieties. *Int J Flexible Manuf Syst* 15(4), 283-307.
- Galbret, M. Blackburn, J. (2006). Optimal Acquisition and Sorting Policies for Remanufacturing. *Production and Operations Management*. Vol. 15. Pp. 384-392.
- Ginsburg, J. (2001). Once is not enough. *Business Week* (16 April): 128B-128D
- Guenov, M.D. (2002). *Complexity and Cost Effective Measures for Systems Design*. (PhD Thesis Cranfield University, Cambridge).
- Hinegardner, R. and J. Engelberg. (1983) Biological Complexity, *Journal of Theoretical Biology* 104, 7-20.
- Ijomah, W.A. (2002). *Model-Based definition of the generic remanufacturing bussines process*. (PhD Thesis, The University of Plymouth).
- Ilgın, M. Gupta, S. (2012). *Remanufacturing: Modeling and Analysis*. CRC Press. Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4398-6307-7.
- Isik, F. 2010. An Entropy-Based Approach for Measuring Complexity in Supply Chains. *International Journal of Production Research*.
- Jukun, Y. Sheng, Z. Peizhi, C. (2008). Reverse Logistics Management for remanufacturing. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on*. Date: 12-14 Oct. 2008. E- ISSN 978-1-4244-2108-4. IEEE.
- Karp, A. and B. Ronen (1992) Improving shop floor control: An entropy model approach. *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 4, 923–938.
- Lund, R. T. HAUSER, W. M. (2010). Remanufacturing: An American perspective. Boston University. *International Conference on Responsive Manufacturing* on January 11, 2010 in Ningbo, China.
- Matsumoto, M. UMEDA, Y. (2011). An analysis of remanufacturing practices in Japan. Center for Service Research, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Umezono, Tsukuba, Japan, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita, Osaka, Japan. Recuperado desde <http://www.journalofremanufacturing.com/content/pdf/2210-4690-1-2.pdf>
- Mezghani, M.; Loukil, T. (2011). Remanufacturing planning with imprecise quality inputs through the Goal Programming and the satisfaction functions. *Logistics (LOGISTIQUA), 2011 4th International Conference on* , Vol., No., pp.122,125, May 31 2011-June 3 2011
- Parkinson, H. J., Thompson, G. (2003). Analysis and Taxonomy of Remanufacturing Industry Practice. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol.217, N°3, pp.243-256.

- Ramoni, M. Zhang, H.C. (2012). An entropy metric for product remanufacturability. *Journal of Remanufacturing* 2012, 2:2. Springer Open. Recuperado desde <http://www.journalofremanufacturing.com/content/2/1/2>
- Senge, P. M. (1993). *La Quinta Disciplina. El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Ediciones Juan Granica, S.A. Barcelona.
- Shanon, C.E., (1948), The Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 379-423.
- Sharit, J. (1987). The use of entropy in evaluating human supervisory control of a manufacturing system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 17, No. 5, 815–821.
- Shu, I. Flowers, W. (1999). Application of a Design For Remanufacture Framework to the selection of product life cycle and joining methods. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 15, 179-190.
- Sivadasan, S., Efstathiou, J., Frizelle, G., Shirazi, R., Calinescu, A. (1999). Information Complexity as a determining factor in the evolution of supply chains. *Proceedings Of International Workshop on emergent Synthesis*, 6-7 December 1999, Kobe University, Japan, pp. 237-242, Manufacturing Systems Research Group, Department of Engineering Science, University of Oxford, OX1 3PJ, Institute for Manufacturing, Department of Engineering, Mill Lane, University of Cambridge, CB2 1RX
- Sivadasan, S. Efstathiou, J. Frizelle, G. Shirazi, R. Calinescu, A. (2002). An information-theoretic methodology for measuring the operational complexity of supplier-customer systems. *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.22, No.1, pp.80-102.
- Sivadasan, S., Efstathiou, J., Frizelle, G., Shirazi, R., Calinescu, A. (2004). A methodology for measuring complexity in the supply chain. *Manufacturing Systems Research Group*, Department of Engineering Science, University of Oxford, OX1 3PJ, Institute for Manufacturing, Department of Engineering, Mill Lane, University of Cambridge, CB2 1RX.
- Smith, C.U.M. (1990). *Elements of Molecular Neurobiology*. Chichester. Wiley.
- Sundin, E. (2004). Product and Process Design for Successful Remanufacturing. PhD Thesis, Linkopings Universitet, Linkoping. Recuperado desde <http://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:20932>.
- Wu, Y., Frizelle, G., Ayril, L., Marsein, J., Van de Merwe, E., Zhou, D. (2002). A Simulation Study on Supply Chain Complexity in Manufacturing Industry. *Institute for Manufacturing, University of Cambridge, United Kingdom*.
- Yao, D.D. (1985). Material and information flows in flexible manufacturing systems. *Material Flow*, Vol. 2, 143–149.
- Yao, D.D. and F.F. Pei . (1990). Flexible parts routing in manufacturing systems, *IIE Transactions*, Vol. 22, No. 1, 48–55. DOI: 10.1080/07408179008964157
- Zhang, L. Wang, Z. Pan, X. Dong, T. (2010). Optimization Model for Remanufacturing Logistics Network with Fuzzy Parameters. *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010 International Conference on*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Jan 13, 2010.
- Zhu, S.; Xu, Y. (2012). Complexity measure of supply chain networks. *Control and Decision Conference (CCDC), 2012 24th Chinese* , vol., no., pp.2220,2224, 23-25 May 2012.

Zwolinski, P. López-Ontiveros, M. Brissaud, D. (2006). Integrated design of remanufacturable products based on product profiles. *Journal of Cleaner Production* 14, 1333-1345.