

Trabajo Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de
Empresas

Estudio y análisis de la programación de la
producción con criterios de sostenibilidad.
Desarrollo de una propuesta de investigación

Autor: Miguel Pascual de la Pisa

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

**Dep. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

**Estudio y análisis de la programación de la
producción con criterios de sostenibilidad.
Desarrollo de una propuesta de investigación**

Autor:

Miguel Pascual de la Pisa

Tutor:

Ignacio Eguía Salinas

Profesor Titular

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

«Sustainable development is the pathway to the future we want for all. It offers a framework to generate economic growth, achieve social justice, exercise environmental stewardship and strengthen governance».

Ban Ki-moon
(Secretario General de las Naciones Unidas)

Trabajo Fin de Máster: Estudio y análisis de la programación de la producción con criterios de sostenibilidad. Desarrollo de una propuesta de investigación

Autor: Miguel Pascual de la Pisa

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal



ÍNDICES Y ACRÓNIMOS

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL TRABAJO	1
1.1.	INTRODUCCIÓN.	2
1.2.	OBJETO DEL TRABAJO.	4
1.3.	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.	5
CAPÍTULO 2	LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE	6
2.1.	INTRODUCCIÓN.	7
2.2.	FABRICACIÓN SOSTENIBLE.....	7
2.3.	TENDENCIAS Y NECESIDADES.	10
2.4.	APLICACIONES DE LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE.	12
2.5.	PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES SOSTENIBLES.	12
2.6.	INDICADORES PARA LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE.	14
CAPÍTULO 3	REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	24
3.1.	INTRODUCCIÓN.	25
3.2.	SINGLE MACHINE.	25
3.3.	PARALLEL MACHINE.	31
3.4.	FLOW SHOP.....	34
3.5.	JOB SHOP.....	41
3.6.	SISTEMAS FLEXIBLES.	47
3.7.	SISTEMAS CELULARES.	54
3.8.	SISTEMAS RECONFIGURABLES.	58
CAPÍTULO 4	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	60
4.1.	INTRODUCCIÓN.	61
4.2.	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.	63
4.3.	PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN.	67
4.3.1	<i>Objetivos específicos.</i>	68
4.3.2	<i>Metodología.</i>	69
4.3.3	<i>Plan de trabajo.</i>	71
4.3.4	<i>Impacto esperado de los resultados de la propuesta.</i>	72
4.4.	PROPUESTA DE CASO DE ESTUDIO.....	72
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES	74
5.1.	PUBLICACIONES.....	76
CAPÍTULO 6	REFERENCIAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: MARCO TEÓRICO DE LA SOSTENIBILIDAD.....	2
FIGURA 2: INTEGRACIÓN DE LOS PARADIGMAS DE FABRICACIÓN.....	3
FIGURA 3: SISTEMA DE FABRICACIÓN SOSTENIBLE.....	4
FIGURA 4: INDICADORES BÁSICOS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE.....	7
FIGURA 5: COMBINACIÓN DE LOS TRES PILARES DE LA SOSTENIBILIDAD.....	10
FIGURA 6: INTEGRACIÓN DE LA TRIPLE BOTTOM LINE EN EL ÁMBITO DE LA FABRICACIÓN.....	10
FIGURA 7: EVOLUCIÓN DE LOS PARADIGMAS DE FABRICACIÓN.....	10
FIGURA 8: PROCESO DE CREACIÓN DE INDICADORES E ÍNDICES.....	18
FIGURA 9: REPOSITORIO DE INDICADORES DEL NIST.....	20
FIGURA 10: REPOSITORIO DE INDICADORES DEL GRI.....	20
FIGURA 11: REPOSITORIO DE INDICADORES DEL UNCSO.....	21
FIGURA 12: REPOSITORIO DE INDICADORES DEL ICHIME.....	21
FIGURA 13: ESQUEMA DE UN SISTEMA SINGLE MACHINE.....	25
FIGURA 14: ESTADOS DE LA MÁQUINA Y TRANSICIÓN ENTRE ELLOS.....	28
FIGURA 15: ESQUEMA DE UN SISTEMA DE MÁQUINAS EN PARALELO.....	31
FIGURA 16: ESQUEMA DE UN SISTEMA FLOW SHOP.....	34
FIGURA 17: CASO PRÁCTICO, PLACA DE HIERRO FUNDIDO CON RANURAS.....	35
FIGURA 18: ESQUEMA DEL SISTEMA PROPUESTO EN EL CASO DE ESTUDIO.....	40
FIGURA 19: ESQUEMA DEL SISTEMA JOB SHOP.....	41
FIGURA 20: ESQUEMA DE FMS, DISTRIBUCIÓN DE CAMPO ABIERTO.....	47
FIGURA 21: TOPOLOGÍA DEL SISTEMAS USANDO EN EL CASO PRÁCTICO.....	51
FIGURA 22: FAMILIA DE PRODUCTOS CONSIDERADOS EN EL CASO PRÁCTICO.....	52
FIGURA 23: ESQUEMA DE LOS CMS, DIFERENCIA ENTRE ORGANIZACIÓN PRO PROCESO Y CELULAR.....	54
FIGURA 24: ESQUEMA DE LOS RMS.....	58
FIGURA 25: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR SISTEMAS DE FABRICACIÓN.....	63
FIGURA 26: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR AÑO DE PUBLICACIÓN.....	63
FIGURA 27: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR OBJETIVO.....	64
FIGURA 28: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR ESTRATEGIA EMPLEADA.....	64
FIGURA 29: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR HEURÍSTICA EMPLEADA.....	65
FIGURA 30: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR CASO DE ESTUDIO.....	65
FIGURA 31: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR RESULTADOS PRESENTADOS.....	66
FIGURA 32: NÚMERO DE ARTÍCULOS POR COMPARACIÓN EMPLEADA.....	66
FIGURA 33: CASO DE ESTUDIO PROPUESTO, ESQUEMA.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: INDICADORES ECONÓMICOS	16
TABLA 2: INDICADORES MEDIOAMBIENTALES.....	16
TABLA 3: INDICADORES SOCIALES.....	17
TABLA 4: MÉTODOS PARA CALCULAR INDICADORES COMPUESTOS	19
TABLA 5: MÉTRICAS PARA LOS PROCESOS DE MECANIZADO	22
TABLA 6: INDICADORES SOSTENIBLES PARA LA DIMENSIÓN SOCIAL.....	23
TABLA 7: PARÁMETROS DE BÚSQUEDA.	25
TABLA 8: CARACTERÍSTICAS DE LOS PROBLEMAS DE ESTUDIO.....	56
TABLA 9: CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DEDICADOS, FLEXIBLES Y RECONFIGURABLES.	59
TABLA 10: CLASIFICACIÓN DE ARTÍCULOS POR SISTEMAS Y OBJETIVO.....	62

ACRÓNIMOS

AMS	Advanced Manufacturing systems
CMS	Cellular Manufacturing system
DNS	Dynamical Neighborhood Search
EC	European Commission
FMS	Flexible Manufacturing System
GRI	Global Reporting Initiative
IChemE	Institute of Chemical Engineers
LCA	Life Cycle Assessment
LCSP	Lowell Center of Sustainable Production
NACFAM	National Council for Advanced Manufacturing
NIST	National Institute of Standards and Technology
OCDE	Organization for Economic Cooperation and Development
OCDE	Organization for Economic Cooperation and Development
RMS	Reconfigurable Manufacturing Systems
SFC	Sistemas de Fabricación Celulares
SFF	Sistemas de Fabricación Flexibles
SFR	Sistemas de Fabricación Reconfigurables
TFM	Trabajo Fin de Master
UNCED	United Nations Conference on Environment & Development
UNCSD	United Nations Commission on Sustainable Development
UNEP	United Nations Environment Programme
USDOC	United States Department of Commerce
VNS	Variable Neighbourhood Search
WCED	World Commission on Environment and Development



Capítulo 1
**INTRODUCCIÓN Y OBJETO
DEL TRABAJO**

1.1. Introducción.

La **sostenibilidad** se podría considerar un término de moda hoy en día, que se aplica a muchos ámbitos diferentes, siendo un factor cada vez más importante para la actividad humana que considera el desarrollo sostenible la clave del desarrollo humano.

Conseguir un **desarrollo** que sea **sostenible** es en general un reto complejo y desafiante, que involucra factores como tecnología e ingeniería, educación, economía, gestión medioambiental, salud y bienestar de las personas y comunidades donde viven y trabajan, deseos laborales y estrategias y políticas gubernamentales.

La fabricación provee a la sociedad de bienes y servicios de primera necesidad, teniendo impacto dentro de la calidad de vida de las personas, así como, también sobre la económica mundial. La fabricación es responsable del 22% del Producto Interior Bruto de Europa, y el 70% de los trabajos en Europa están directa o indirectamente relacionados con la fabricación (EC, 2004). Se puede ver también que la fabricación tiene un gran efecto en el medioambiente, en forma de consumo de recursos (materias primas, energía, etc.), efecto invernadero, generación de desperdicios y emisiones.

Los tres aspectos resaltados anteriormente (economía, sociedad y medioambiente) son los tres pilares de la sostenibilidad, sobre los que la fabricación tiene un gran efecto, y es por lo que este trabajo gira en torno a la aplicación del desarrollo sostenible a la fabricación (Figura 1).

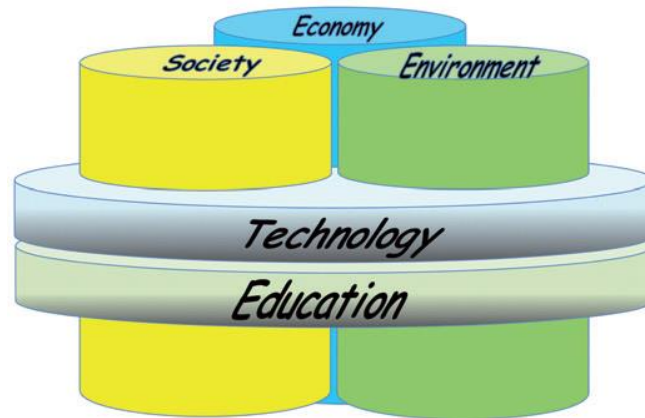


Figura 1: Marco teórico de la sostenibilidad (Garetti M. y Taisch M., 2012)

Dentro del mundo de la fabricación, se ha visto una evolución de la técnica y del enfoque usado, definiendo el concepto de **paradigmas de fabricación**. Estos se consideran como un conjunto de prácticas que definen una disciplina de fabricación durante un período de tiempo y que proporciona soluciones a los requisitos del cliente. Del análisis de requisitos del cliente, se diseñan unas estrategias para cumplir con ellos. Con el tiempo, las mejores prácticas se toman como referencias, creando lo que hemos definido como paradigma.

A través de la revisión de la evolución de los sistemas de fabricación se puede deducir la evolución de los paradigmas aplicados, hasta llegar al que nos interesa en este trabajo, la fabricación sostenible.

Anteriormente a 1960, predominaban los sistemas de fabricación dedicados o cadenas de montaje, donde se emplea el paradigma de **fabricación en masa**: grandes cantidades de un mismo producto a bajo coste y con la calidad requerida.

Entre 1960 y 1990, aparecen nuevas máquinas de fabricación por control numérico y la gestión de operaciones, que unido a una demanda de productos variados y de más calidad, hace necesaria una evolución en los sistemas de fabricación. Aparecen los sistemas de **fabricación flexibles**, posibilitados por las técnicas de fabricación japonesa *Lean Manufacturing, Mass Customization, Just in time o Total Quality Management* entre otras.

Desde 1990 nos encontramos en lo que podría llamarse la época del conocimiento, donde existe una gran demanda global de productos de alta calidad y personalizados, con tiempos de entrega lo más reducidos posibles, que requieren de sistemas de fabricación más ágiles y flexibles como son los sistemas de **fabricación celulares y reconfigurables**, apoyados por las técnicas de *fabricación ágiles, la empresa virtual y la ingeniería concurrente*.

Como se puede ver, cada sistema/paradigma ha ido respondiendo a la necesidad del momento: costes reducidos, variedad de productos o personalización. Las necesidades actuales giran en torno al reto del medioambiente, y como respuesta surge el paradigma de la **fabricación verde**, que engloba todo los aspectos anteriores, sumando el respeto por el medioambiente, apoyándose en técnicas como el *diseño para el medioambiente, la logística inversa o las estrategias para el final de la vida útil del producto (reciclado, reutilización y remanufactura)*.

Con la aplicación del enfoque hacia el desarrollo sostenible en la fabricación, surge un nuevo paradigma que engloba todos los anteriores: la **fabricación sostenible** (Figura 2). Se trata de fabricar de una forma eficiente en costes, calidad y adaptabilidad a la demanda, respetando el medio ambiente y considerando los aspectos sociales.

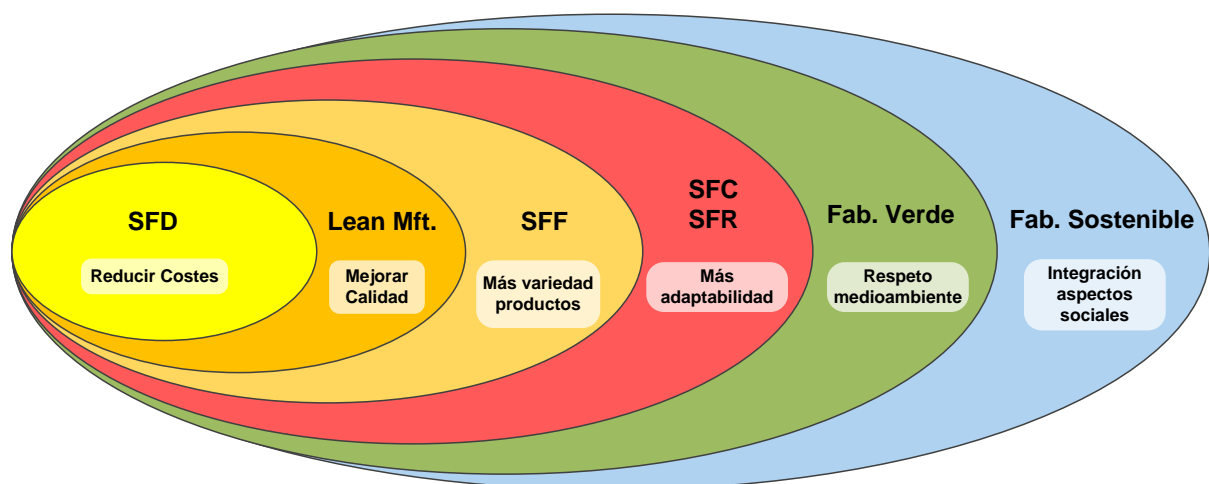


Figura 2: Integración de los paradigmas de fabricación (Ampliación de Eguía I., 2010-1).

De esta forma, con la introducción de este nuevo paradigma, los sistemas de fabricación tradicionales han de evolucionar hacia sistemas de fabricación sostenibles. Estos incorporan tareas que antes se consideraban fuera del sistema, como la gestión de los desperdicios y emisiones generadas, y la recuperación y reutilización de los productos al final de su vida útil. En la Figura 3, se puede ver como el sistema tradicional (enmarcado en azul oscuro) queda expandido mediante la consideración del ciclo de vida del producto incluyendo el uso (zona naranja) y la fabricación inversa (zona azul claro).

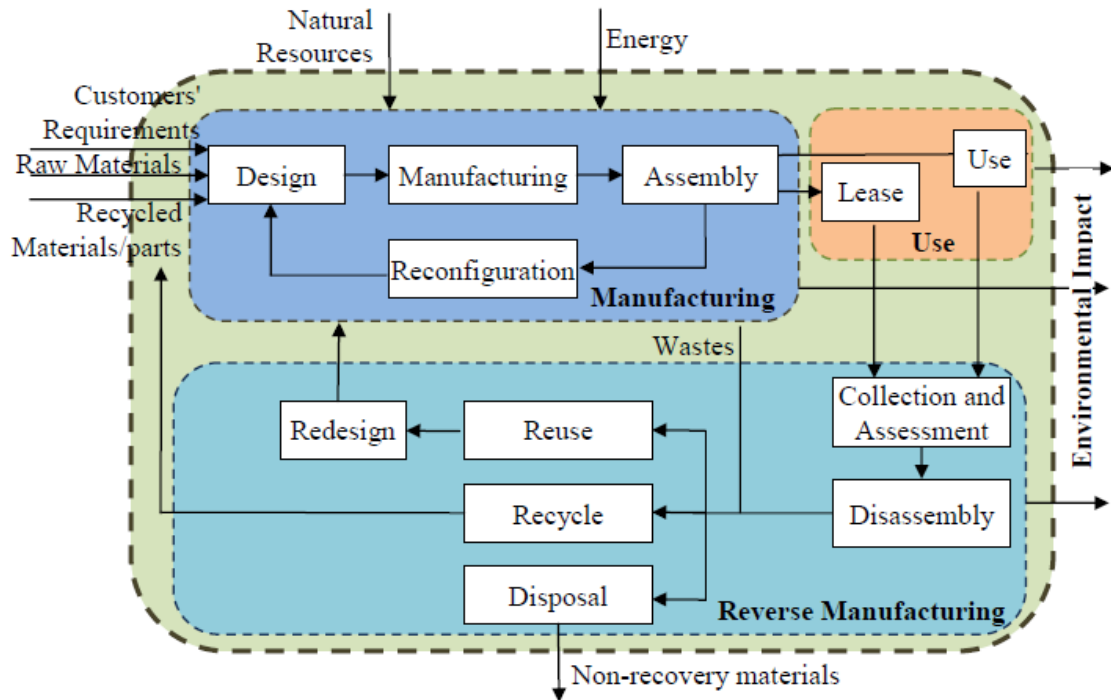


Figura 3: Sistema de fabricación sostenible (Bi Z., 2011)

Como se puede ver, el paso de un sistema de fabricación tradicional a uno sostenible implica la aplicación de muchas técnicas, necesarias de una mayor investigación. El presente trabajo se centrará en la fase de fabricación, en concreto, en las técnicas para hacer la producción más sostenible.

1.2. Objeto del Trabajo.

Este Trabajo Final de Máster (TFM) se centra en una revisión y análisis bibliográfico sobre la incorporación de aspectos sostenibles para la programación de la producción en sistemas de fabricación, con la finalidad de realizar una propuesta de investigación en dicho área.

Este nuevo enfoque sostenible considera además de los tradicionales criterios económicos, de calidad o temporales, nuevos criterios medioambientales, energéticos y sociales como parte de los estudios de programación de la producción.

A partir del análisis de las actuales líneas de investigación encontradas, se definirá una propuesta de estudio para abordar el problema y ampliar su aplicación.

A continuación, se enumeran los objetivos que se pretenden alcanzar en este TFM:

1. Análisis de las principales tendencias en la fabricación sostenible.
2. Análisis de las principales métricas empleadas en la cuantificación de los tres aspectos básicos de la sostenibilidad: económico, medioambiental y social.
3. Revisión y análisis del estado del arte de las aplicaciones de programación de la producción con criterios sostenibles en los principales sistemas de fabricación.
4. Definición de una propuesta de estudio y metodología de desarrollo, en base a las necesidades de investigación encontradas en el punto anterior.

1.3. Estructura de la memoria.

Este documento está dividido en 6 capítulos que van profundizando en el tema propuesto desde un nivel general a aplicaciones más concretas.

En el capítulo 1, se incluye una introducción general del trabajo, se definen los objetivos del TFM y la estructura del trabajo a modo de resumen del mismo.

El capítulo 2 trata la fabricación sostenible desde un punto de vista general, se definen las principales tendencias y las métricas más comunes usadas para su valoración.

El capítulo 3 es el centro de este TFM, y se describe con detalle cada uno de los artículos encontrados que considera algunos de los factores sostenibles de forma conjunta. Estos artículos están agrupados según los siguientes sistemas: una única máquina, dos máquinas en paralelo, *Flow Shop*, *Job Shop*, sistemas flexibles, sistemas celulares y sistemas reconfigurables. Al principio de cada categoría, se realiza una breve descripción de cada sistema para introducir el contexto de los diferentes artículos.

El capítulo 4 parte de la información del capítulo anterior, la analiza de forma cuantitativa, categorizando los diferentes aspectos en gráficas. A raíz de este análisis, se realiza una propuesta de estudio y metodología para su desarrollo, así como, se expone la hipótesis de un posible caso de estudio.

El capítulo 5 recoge las conclusiones del trabajo y las publicaciones científicas del autor del mismo relacionadas con el presente TFM.

Por último, en el capítulo 6 se referencian todos los artículos citados en el presente trabajo.



Capítulo 2

LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE

2.1. Introducción.

El término sostenible apareció por primera vez en los años 1987-1988 dentro de un informe de Naciones Unidas que incluía como objetivo el **desarrollo sostenible**: *“Satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas”* (WCED, 1987). Para conseguirlo, el concepto se basa en tres pilares: económico, social y medioambiental (Figura 4).

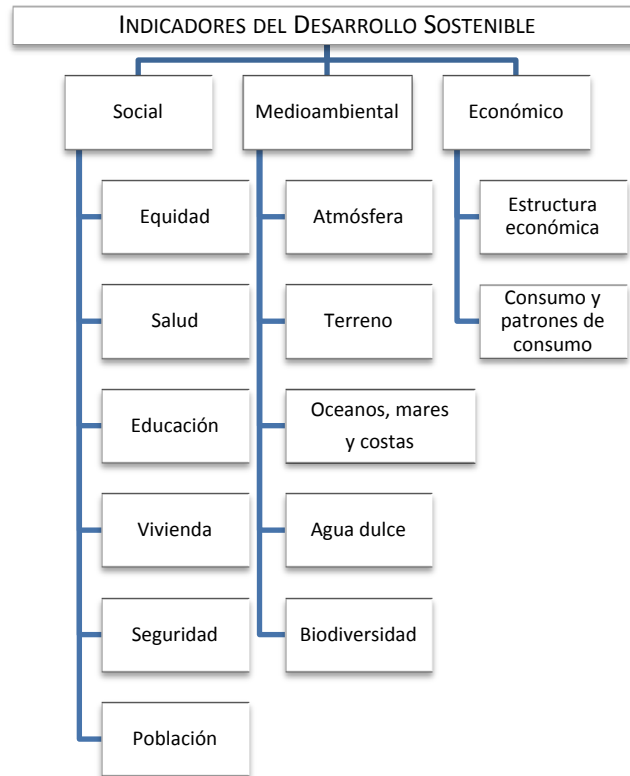


Figura 4: Indicadores básicos para el desarrollo sostenible (UNCSO, 2001).

2.2. Fabricación sostenible.

Este desarrollo sostenible se ha aplicado al campo de la fabricación, pudiendo considerarse como un paso adelante desde la fabricación verde. Aunque a veces esta puede ser confundida con la fabricación sostenible, la cual implica un enfoque que considera el sistema de una forma global desde los tres pilares comentados anteriormente, no simplemente centrándose en una reducción del impacto medioambiental y los recursos consumidos.

Diversos autores definen la **fabricación sostenible** como:

“Diseño de sistemas humanos e industriales para asegurar que el uso de los recursos naturales no lleven a la disminución de la calidad de vida ya sea por pérdidas de oportunidades económicas futuras o impactos adversos en las condiciones sociales, de salud y medioambiente” (Mihelcic J.R. et al., 2003).

“La fabricación sostenible es un enfoque de sistemas para la creación y distribución (cadena de suministro) de productos y servicios innovadores, que: minimicen recursos (de entrada, como materiales, energía, agua y terreno); eliminen sustancias tóxicas; y produzcan cero desperdicios que reduzcan gases del efecto invernadero, como por ejemplo las emisiones de carbón, a lo largo del ciclo de vida completo de esos productos y servicios” (Rachuri S. et al., 2010)

“La habilidad de usar los recursos naturales de una forma inteligente para la fabricación, a través de la creación de productos y soluciones que gracias a la nueva tecnología, medidas reglamentarias y comportamientos sociales coherentes, de forma que sea capaz de satisfacer objetivos económicos, medioambientales y sociales, conservando así el medioambiente, mientras que se continua mejorando la calidad de vida” (Garetti M. y Taisch M., 2012).

“La creación de productos que usan procesos que minimizan el impacto medioambiental negativo, conserva la energía y los recursos naturales, son seguros para los empleados, comunidades y consumidores y son viables económicamente” (USDOC, 2015).

“La fabricación sostenible incluye la fabricación de productos sostenibles y la fabricación sostenible de todos los productos. Incluyendo energías renovables, eficiencia energética, construcción verde y otros productos verdes y relacionados con la equidad social” (NACFAM, 2015)

Alternativamente surge el término de **producción sostenible**, muy similar al anterior. Fue introducido en 1992 durante la conferencia sobre medioambiente y desarrollo de las Naciones Unidas (UNCED, 1992). Se han encontrado algunas definiciones de este nuevo enfoque:

“Para conseguir la producción sostenible se tiene que conseguir cada uno de estos tres elementos integrales: reducir el impacto medioambiental negativo; ofrecer una mejorada eficiencia energética y de recursos; generar una cantidad mínima de residuos; proporcionar seguridad operacional; y ofrecer una mejorada salud personal. Todo esto mientras se mantiene o incluso mejora la calidad del producto y procesos” (Jawahir I., 2013).

“La producción sostenible es la creación de bienes y servicios usando procesos y sistemas que son: no contaminantes; conservadores de energía y recursos naturales; viables económicamente; sanos y seguros para los trabajadores, comunidades y consumidores; y gratificantes para los trabajadores. Si la producción es sostenible, entonces el medioambiente, los empleados, las comunidades y organizaciones son todos beneficiados. La producción sostenible no debe solo proteger a los trabajadores de riesgos ocupacionales, sino que debe involucrarlos en la tarea de crear condiciones de trabajo que sean productivas, sanas y gratificantes” (LCSP, 2015).

Como se ha comentado, existe un paradigma anterior, la **fabricación verde**, que también puede ser llamada fabricación limpia (*Clean/Cleaner Manufacturing*). Según Dornfeld D. et al., 2013, el adjetivo verde puede ser definido como una preocupación hacia lo medioambiental y a la preservación de la calidad del mismo. Por lo que un sistema de fabricación puede ser considerado verde si tiene un impacto sobre el medioambiente mínimo o inexistente. A continuación se añaden más definiciones encontradas:

“La fabricación verde es aquella capaz de cumplir con los requisitos del diseño y minimizar el impacto medioambiental, de forma simultánea” (Bi Z., 2011).

“La fabricación limpia es la aplicación continua de una estrategia medioambiental integrada y preventiva dirigida hacia los procesos, productos y servicios con el fin de incrementar la eficiencia total y reducir el daño y riesgos sobre los humanos y el medioambiente” (UNEP, 2015).

“La fabricación verde puede ser visto de dos formas: la fabricación de productos verdes, particularmente aquellos relacionados con sistemas de energía renovables y tecnologías limpias de todo tiempo; y el reverdecimiento de la fabricación con la reducción de la polución y los desperdicios a través de la minimización del uso de recursos naturales, reciclado y reuso de los desperdicios, con la finalidad de reducir emisiones” (Cleantechnica.com, 2015).

“La fabricación verde contempla la implementación de cualquier tipo de modificación del proceso que lleve a una reducción en el consumo energético, consumo de recursos, residuos y uso de agua” (green-manufacturing.blogspot.com.es, 2015).

Entonces, **¿cómo se distingue la fabricación sostenible de la verde?** En la definición del desarrollo sostenible se introducen dos aspectos clave: el concepto de necesidad y las limitaciones impuestas por la tecnología y las organizaciones sobre el medioambiente para alcanzar necesidades presentes y futuras.

De esta forma, se incluyen los factores sociales, además de los económicos y medioambientales. Estos tres aspectos se agrupan dentro del concepto de *Triple Bottom Line*, enfoque surgido al aplicar la sostenibilidad al mundo de los negocios (Elkington J., 1997). De esta forma, los sistemas de fabricación sostenibles son aquellos que cumplen con los tres objetivos planteados. En la Figura 5 se puede ver la combinación de los diferentes pilares, generando diferentes conceptos hasta llegar a la sostenibilidad. En la Figura 6, estos pilares son aplicados al ámbito de la fabricación para generar diferentes paradigmas hasta llegar a la fabricación sostenible.

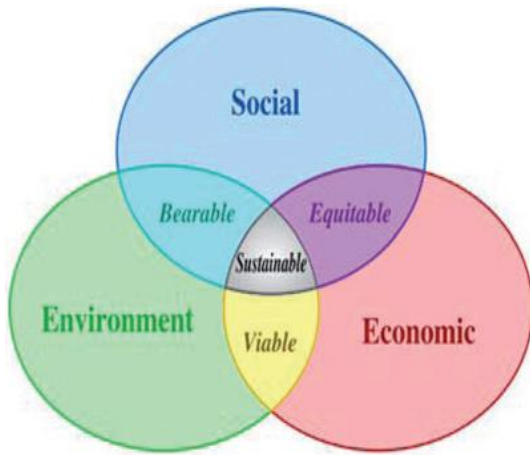


Figura 5: Combinación de los tres pilares de la sostenibilidad (Garetti M. y Taisch M., 2012).

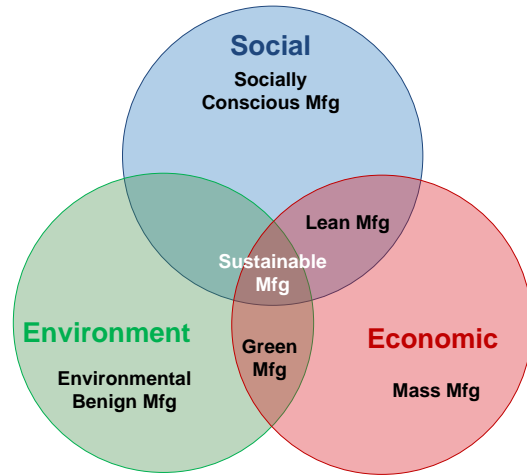


Figura 6: Integración de la Triple Bottom Line en el ámbito de la fabricación (Adaptación de Dornfeld D. et al., 2013).

La Figura 7 es una continuación de la anterior, muestra la evolución de los diferentes paradigmas expuestos en la Figura 6. Se puede observar como cada nuevo enfoque es una evolución mejorada del anterior. Mientras que la fabricación verde estaba centrada en los 3 conceptos de reducir, reusar y reciclar, la fabricación sostenible incluye los conceptos de recuperar, rediseñar y remanufactura (Jayal A.D. et al., 2010).

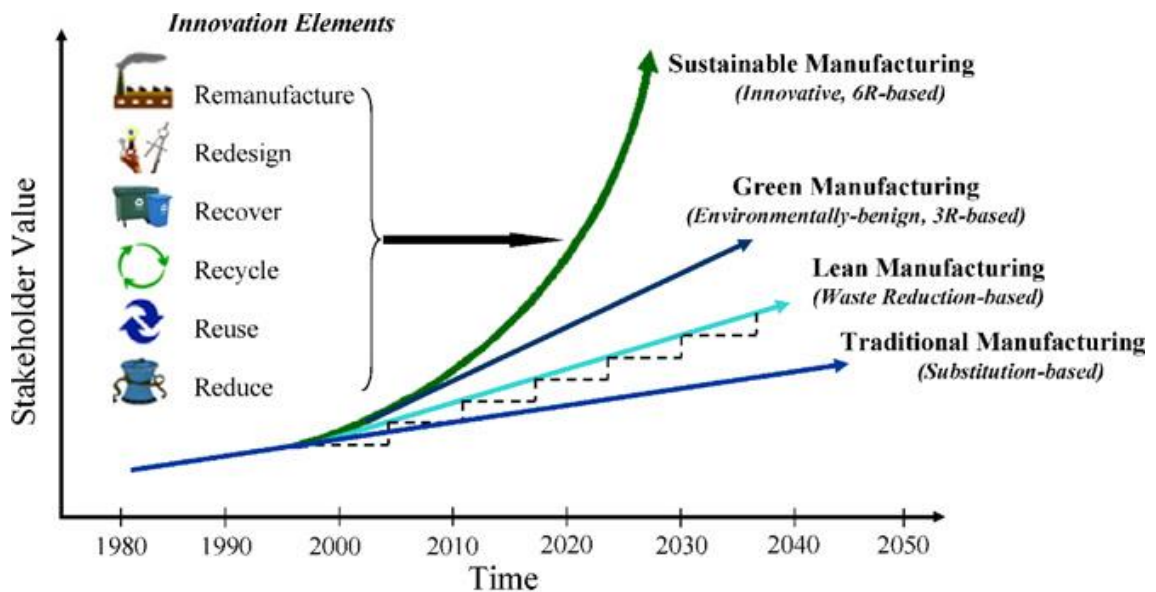


Figura 7: Evolución de los paradigmas de fabricación (Jayal A.D. et al., 2010)

2.3. Tendencias y necesidades.

De acorde a Haapala K.R. et al. (2013), se pueden definir una serie de retos y oportunidades dentro de la fabricación sostenible que aún están pendientes de un mayor desarrollo. Se pueden clasificar en cuatro categorías:

Procesos y equipos de fabricación: se observa necesario desarrollar nuevos procesos y equipos que reduzcan las huellas ecológicas, con sistemas de toma de decisiones basados en la metodología *Life Cycle Assessment* (LCA). Se debe buscar el uso de la energía de una forma más eficiente, considerando el impacto sobre los trabajadores y la comunidad local.

Las estrategias para conseguir esto pueden ser la hibridación de procesos, el correcto dimensionado de equipos, la utilización de nuevos mecanismos de procesos y el uso de materiales y químicos más benignos.

Sistemas de fabricación: se debe prestar una especial atención al consumo de recursos, producción de residuos e impactos medioambientales. Existen oportunidades en la inclusión de objetivos medioambientales en la toma de decisiones existentes a nivel de sistemas, instalaciones, empresas y cadena de suministro (programación de la producción, selección de proveedores, localización de instalaciones).

Especialmente se observan grandes oportunidades en el desarrollo de planes de fabricación y programación de operaciones basados en métricas sostenibles.

Otra estrategia señalada es el reciclado y remanufactura, donde se incluye la logística inversa y las nuevas tecnologías para la recuperación de productos más complejos.

Cambios en los paradigmas: se necesita el desarrollo de nuevos paradigmas referentes a los ciclos de vida de los productos. Nuevos enfoques referentes al reciclado y la remanufactura conducirán al desarrollo de procesos, cambios en el diseño de productos, mayor uso de la logística inversa e incluso, redimensionar la visión del ciclo de vida del producto completo. Estos cambios implicarían un cambio en los modelos de negocio actuales, sin olvidarse de los aspectos sociales.

Es muy recomendable integrar el LCA o métodos similares dentro de los sistemas de fabricación para evitar posibles obstáculos medioambientales. El uso de un LCA predictivo ayudará a prever los impactos, para ello será necesario el desarrollo de bases de datos medioambientales basadas en la industria real.

Educación: pocas facultades tienen cierta experiencia en el área de la sostenibilidad. La impartición de cursos y el desarrollo de materiales sobre la sostenibilidad pueden ser efectivos para educar futuros ingenieros con un amplio entendimiento de diseño de productos y procesos, fabricación y la influencia sobre las etapas del ciclo de vida.

Estas **necesidades** también están presentes en **España**, como se puede observar de la encuesta conducida en Koho M. et al. (2011). Las empresas españolas y sus dirigentes consideran el desarrollo sostenible como algo clave para su futuro. Esta encuesta también detecta barreras para que este desarrollo se produzca, como son: la ausencia de métricas y rankings de comparación y la falta de conocimiento de qué hacer y cuándo hacerlo.

Este estudio también propone retos para que el desarrollo sostenible se propicie:

- Nuevos procesos y tecnologías que mejoren la eficiencia de los recursos hacia una producción más verde.
- Mediciones estandarizadas de la sostenibilidad.
- Uso de recursos energéticos sostenibles.
- Desarrollo de técnicas de medida y evaluación de los impactos medioambientales.

2.4. Aplicaciones de la fabricación sostenible.

A continuación se enumeran una serie de artículos, clasificados a diferentes niveles, que abordan la fabricación sostenible desde diferentes enfoques.

A nivel producto, se introduce el concepto *Design for Sustainability* donde se consideran nuevos criterios sostenibles en las etapas primarias del diseño (Rosen M.A. y Kishawy H.A., 2012; Setchi R. et al., 2015). A raíz de este concepto se han desarrollado marcos de trabajo para apoyar el diseño sostenible (Romli A. et al., 2014).

A nivel de procesos, una de las estrategias empleadas ha sido el desarrollo de máquinas y procesos más eficientes (Duflou J.R. et al., 2012). Dado que muchas máquinas empleadas en los procesos tienen un amplio margen de parámetros a configurar, existen también diversos estudios orientados a la optimización de éstos desde un punto de vista sostenible (Dambhare S.G. et al., 2015; Hassine H. et al., 2015).

A nivel de sistemas, las estrategias principales se han basado en auditorías energéticas (Le C.V. et al., 2012), planificación y programación de la producción (Mouzon G., 2008) y diseño de la cadena de suministro (Eskandarpour M. et al., 2015).

Además, una de las aplicaciones consideradas de gran interés es la evaluación global de los sistemas para obtener una valoración sostenible de forma cuantitativa que ayude a los decisores a valorar las medidas a implementar, en forma de configuraciones posibles. Dentro de esta categoría, Vimal K.E.K. et al. (2015), presenta una metodología *Fuzzy* que genera un indicador agregado de sostenibilidad. Zhang H. y Haapala K.R. (2014), se propone una combinación de la metodología AHP y PROMETHEE que generan un ranking de las configuraciones alternativas del sistema.

2.5. Programación de operaciones sostenibles.

De entre todas las necesidades y retos comentados en este trabajo, nos vamos a centrar en la tendencia operacional, ya que la investigación sobre el control de operaciones y la programación con objetivos medioambientales y sociales de las mismas es limitado (Fang K. et al., 2011). Son varios los **editoriales de revistas** científicas que han expresado la necesidad de un mayor desarrollo en esta línea.

Li J. et al. (2012), expresa la necesidad de centrarse en ahorros energéticos en la fabricación automatizada a través del control operacional y la programación de los robots con el objetivo de minimizar el consumo energético. Gunasekaran A. y Gallear D. (2012), señalan entre otras direcciones de investigación, la necesidad de implicar los procesos y operaciones

de fabricación en la mejora del desempeño medioambiental y económico. Gunasekaran A. y Spalanzani A. (2012), señalan la necesidad de considerar los recursos de entrada (energía, personas, equipo, inventario) con el objetivo de minimizar el desperdicio, los retrabajos, inventarios, retrasos y huella de carbono. Reseñando la investigación limitada en las operaciones de producción sostenibles en ámbitos teóricos y prácticos. Jin M. et al. (2015), expresan la necesidad de planes productivos optimizados en entornos de fabricación avanzada, especialmente en un contexto de bajas emisiones de carbono. También ven necesario profundizar en la programación de sistemas de fabricación optimizados desde un punto de vista sostenible multi-criterio.

De especial interés es el artículo de Trentesaux D. y Prabhu V. (2014), donde se hace un revisión de la sostenibilidad a nivel operativo, los tipos de enfoques para abordar problemas de este tipo de una forma sostenible. En este artículo se definen tres **líneas de acción emergentes**:

En primer lugar, aunque el mecanizado represente una pequeña fracción del ciclo de vida, la reducción de energía consumida en este proceso de fabricación ha sido recientemente identificada como una de las estrategias más importantes para mejorar la sostenibilidad (He Y. et al., 2012). La fabricación es la responsable del 33% de la energía consumida en el mundo y del 38% de las emisiones directas e indirectas de CO₂ (Garetti M. y Taisch M., 2012), además, la eficiencia de las máquinas herramienta es generalmente menor al 30% (Hu S. et al., 2012), a lo que se añade un precio variable de la energía y límites en la energía pico. Todo esto hace que la programación y control de la producción tenga una influencia considerable en la energía consumida y en el coste asociado.

En segundo lugar, la fabricación tiene un alto impacto en el medioambiente, donde el mayor riesgo sobre la sostenibilidad se presenta en el nivel operacional (polución, residuos y desperdicio energético). Algunos procesos de la industria química, de comida, de refinado, de pintura o metal presentan un alto consumo energético y un alto riesgo de generar grandes cantidades de residuos o polución. Dado el rápido incremento de precios en los últimos 10 años, los ahorros pueden ser incluso mayores centrando los esfuerzos en el nivel operativo, sin tener que hacer mayores inversiones.

En tercer lugar, los sistemas de fabricación se han vuelto sobredimensionados en referencia a las necesidades del mercado, de esta forma, la reducción de energía se ha vuelto un factor importante para ellos.

Se deduce pues que aunque las operaciones no sea el primer camino hacia la sostenibilidad, se está convirtiendo rápidamente en un campo de estudio importante que puede contribuir a la sostenibilidad global.

Pero en este punto surge una pregunta, **¿bajo qué circunstancias la programación de operaciones de fabricación puede considerarse como sostenible?**

En un sistema de fabricación existen recursos de entrada (energía, máquinas, inventarios, materias primas, herramientas, personal, etc.) que se necesitan para realizar la programación de las operaciones. También existen las salidas (residuos, polución, chatarra, etc.), que son las consecuencias de la programación. Teniendo esto en cuenta, cuando un

método considera, además de los objetivos comunes relacionados con tiempo y calidad, la optimización de los recursos del sistema, se puede considerar sostenible.

Al considerar las entradas y salidas, se abre un nuevo debate de la eficiencia frente a la eficacia. La primera hace referencia a la búsqueda del mejor uso de los recursos, mientras que la segunda hace referencia a la búsqueda de los mejores resultados posibles.

Considerando esto, la programación ideal desde un punto de vista sostenible es aquella que realiza todo (máxima eficacia) usando nada (mínimo uso de recursos).

De esta forma se pueden distinguir tres **enfoques** para abordar el problema de la **planificación sostenible**:

Primero, enfoque de entrada. Se centra en la energía, inventario, máquinas y herramientas, es el más desarrollado. Las principales líneas que se observan son:

- Minimizar el consumo de los recursos de entrada, manteniendo la calidad de la programación como compromiso.
- Optimizar la eficacia de la programación viendo los recursos de entrada como restricciones duras (expresado como coste, máximo consumo posible en una ventana de tiempo, máxima energía pico posible).
- La eficacia de la programación se mantiene como objetivo primero y el uso/consumo de los recursos de entrada son minimizados si fuera posible.
- Por último, usar enfoques predictivos aproximados, así como, simulaciones.

Segundo, el enfoque de salida. Se centra en los residuos, polución, chatarra, gases del efecto invernadero. Está menos desarrollado, centrándose el estudio básicamente en la industria química.

Por último, considerar ambos enfoques simultáneamente de entrada y salida, anteriormente mencionados, como objetivos del problema. Este enfoque está poco desarrollado con respecto a los enfoques de salida.

2.6. Indicadores para la fabricación sostenible.

Como se ha visto anteriormente, los problemas de operaciones sostenibles se abordan considerando diferentes entradas y salidas dentro del objetivo de optimización. Que medir y como medirlo es un aspecto de vital importancia para cuantificar el impacto que tendrá cada uno de los aspectos considerados sobre la sostenibilidad, así como, tener un valor tangible que poder optimizar dentro de un modelo.

El concepto de indicador fue usado originalmente en un contexto puramente científico: la investigación sociológica. Su función era la de realizar la traducción de conceptos teóricos/abstractos en variables observables de forma que la hipótesis científica que involucra esos conceptos puede ser sometida a una verificación empírica (Boulanger P-M., 2008).

A continuación se aportan otras **definiciones** del concepto de indicador:

“Medidas o agregación de las mismas de forma que se puedan deducir conclusiones del fenómeno de interés” (Joung C.B. et al., 2013).

“Una medición estadística que ofrece un indicador sobre el desarrollo sostenible social, medioambiental y económica” (OCDE-1, 2015).

“Un indicador es algo que ayuda a entender donde se encuentra uno, por cual camino se va y cuán lejos se está del punto deseado. Un indicador alerta de un problema antes de que la situación empeore y ayuda a identificar qué acciones deben ser tomadas para solucionarlo” (Sustainablemeasures.com, 2015-1).

De cara a completar las definiciones anteriores, se enumeran ciertos aspectos relevantes. Para realizar la **caracterización** de un indicador se deberán definir los siguientes conceptos (Joung C.B. et al., 2013):

- Identificación: un único identificador alfanumérico para dicho indicador.
- Nombre: una palabra que sea distintiva como designación del indicador.
- Definición: Una frase expresando las características esenciales y la función de un indicador.
- Tipo de medida: si es cualitativo o cuantitativo.
- Unidad de medida: la unidad de valor del indicador.
- Referencias: documentos citables que contenga indicadores específicos o conjuntos de ellos, a partir de los que un indicador es seleccionado o desarrollado como nuevo.
- Nivel de aplicación: el nivel en la organización jerárquica en el que el indicador es aplicado. Basado en esta información, los decisores pueden establecer sus propias métricas sostenibles acorde a su estrategia de negocio.

Los siguientes **criterios** pueden ser usados para **evaluar** la idoneidad de un indicador (Moos M.L. y Grunkemeyer, W.T., 2007; Sustainablemeasures.com, 2015-2):

- Medible: que sea simple y fácil de medir ya sea cualitativa o cuantitativamente, dentro de un marco para la recolección de datos y su evaluación.
- Relevante: es aquel que está directamente relacionado a un aspecto significativo de la sostenibilidad.
- Comprensible: que sea fácilmente interpretable por personas no expertas.
- Confiable/Utilizable: que contenga información precisa y de confianza.
- Accesibilidad de datos: debe estar basado en datos e información que sean de fácil acceso y adquiridos dentro del contexto analizado.
- En tiempo oportuno: los datos, recolección de información, cálculo y evaluación de un indicador deben ser realizadas en un espacio de tiempo aceptable para la toma de decisiones.

- Orientado al largo plazo: deben asegurar su uso futuro, desarrollo y adopción como estándar sostenible a nivel organizacional o a nivel de producto/proceso.

Pero, **¿cómo se diferencia un indicador tradicional de uno sostenible?**, un indicador sostenible se diferencia de uno tradicional en cada uno de los aspectos económicos, medioambientales y económicos. Los indicadores tradicionales miden cambios en una parte de la comunidad como si estos fueran completamente independientes de otros indicadores. Los indicadores sostenibles reflejan la realidad donde los tres aspectos de la sostenibilidad están estrechamente relacionados. En las Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 se plantean ejemplos de las diferencias existentes entre los indicadores tradicionales y sostenibles para cada uno de los tres ámbitos:

Tabla 1: Indicadores Económicos (Sustainablemeasures.com, 2015-3)

Indicador Tradicional	Indicador Sostenible (I.S.)	Énfasis del I.S.
<ul style="list-style-type: none"> • Renta per cápita media respecto a la media del país 	<ul style="list-style-type: none"> • Sueldo respecto de la paga media requerida para cubrir las necesidades básicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Lo que un salario puede comprar define las necesidades básicas en términos de consumo sostenible
<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de desempleo. • Número de compañías. • Número de trabajos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diversidad y vitalidad de los trabajos locales basados en el número y variabilidad en tamaño de las compañías. • Número y variabilidad de los tipos de industria. • Variabilidad de habilidades requeridas para los trabajos. • Salarios pagados en la economía local que es gastado en esta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resiliencia del mercado de trabajo, habilidad del mercado de trabajo para ser flexible en tiempos de cambio económico.
<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de la economía medida mediante el PIB y PNB. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dinero gastado en la economía local para trabajadores y recursos naturales. • Porcentaje de la economía local basada en recursos locales renovables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resiliencia financiera local.

Tabla 2: Indicadores medioambientales (Sustainablemeasures.com, 2015-3).

Indicador Tradicional	Indicador Sostenible (I.S.)	Énfasis del I.S.
<ul style="list-style-type: none"> • Niveles ambientales de polución en el aire y agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso y generación de materiales tóxicos (en la producción y durante su uso). • Distancias recorrida por los vehículos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de las actividades causantes de la polución.
<ul style="list-style-type: none"> • Toneladas de residuos sólidos generados 	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de productos producidos que son duraderos, reparables o fácilmente reciclable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de materiales conservativo y cíclico.
<ul style="list-style-type: none"> • Coste de la gasolina 	<ul style="list-style-type: none"> • Energía total usada de entre todas las fuentes. • Ratio de E Renovable usada respecto de la no renovable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa sostenible de usos de recursos.

Tabla 3: Indicadores sociales (Sustainablemeasures.com, 2015-3).

Indicador Tradicional	Indicador Sostenible (I.S.)	Énfasis del I.S.
<ul style="list-style-type: none"> Examen de acceso a la universidad y otros tipos de exámenes estandarizados. 	<ul style="list-style-type: none"> Número de estudiantes formados para trabajos disponibles en la economía local. Número de estudiantes que van a la universidad y acaban trabajado en la comunidad local. 	<ul style="list-style-type: none"> Habilidades profesionales y formación emparejados con las necesidades de la economía local.
<ul style="list-style-type: none"> Número registrado de votantes 	<ul style="list-style-type: none"> Número de votantes que participan en las elecciones. Número de votantes que asisten a las reuniones locales. 	<ul style="list-style-type: none"> Participación en el proceso democrático. Habilidad para participar en los procesos democráticos.

Una vez definido lo que es un indicador sostenible, se considera necesario describir el proceso para la **creación de indicadores**. También es interesante detallar metodologías para la unión de varios indicadores en uno solo, que pasará a designarse índice, siendo este un indicador sintético construido con la agregación de indicadores básicos. En Boulanger P-M. (2008), se describe detalladamente un proceso de 4 etapas:

1. *Del concepto a las dimensiones*: la primera fase consiste en identificar varias dimensiones que constituyen el concepto, sabiendo que estos son siempre multidimensionales.
2. *De las dimensiones a los indicadores*: posteriormente, las dimensiones son descompuestas en variables, algunas de las cuales serán seleccionadas como indicadores, ya sea porque se consideren particularmente pertinentes o porque sean fáciles de medir. La selección de los indicadores estará basada en la evaluación de la observación y restricciones de medición.
3. *De los indicadores a las medidas*: una vez que los indicadores están definidos, estos tienen que ser medidos. El nivel de precisión, exactitud, escala espacio-temporal tienen que ser decididos, así como las unidades de medida. Los indicadores no tienen el mismo nivel de precisión y no son medidos con unidades similares, lo que dificulta el proceso de agregación. Como consecuencia, a menudo es necesario llevar las unidades y las escalas de medida a los niveles más elementales y menos exigentes, con todo lo que esto implica para la pérdida de información.
4. *De las medidas a los índices*: la última operación, y esencial dentro del contexto de trasladar el concepto científico a test empíricos. Los indicadores básicos no tienen sentido por sí solos, por eso es necesario la agregación de varios indicadores en un indicador sintético. Para realizar la agregación, los indicadores tendrán que ser expresados en una unidad común, la estandarización es un aspecto clave en este punto.

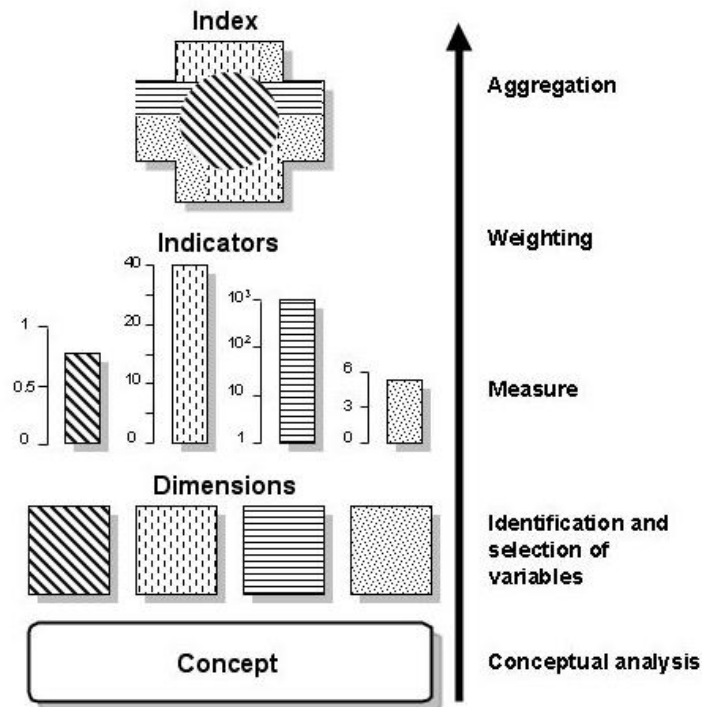


Figura 8: Proceso de creación de indicadores e índices (Boulanger P-M., 2008)

Como se ha comentado anteriormente en el paso 4, la **estandarización** juega un paso imprescindible en el proceso de agregación de indicadores básicos en un índice. Su misión es la de convertir las unidades heterogéneas en otras homogéneas que podrán hacer que la agregación sea posible. En Boulanger P-M. (2008) se enumeran varias posibilidades de estandarización:

- *Estandarización estadística*: se trata de expresar todos los valores como desviaciones estándar, después de haber transformado las variables de forma que su media sea cero.
- *Estandarización empírica*: en este caso se pueden usar varias técnicas. Una de las más comunes consiste en usar los datos del año como base de cálculo y expresar los valores posteriores como un porcentaje de variación del valor inicial. Otro método consiste en asignar el valor de 0 al valor mínimo de la observación considerado como el peor y asignar el valor 1 al mejor, de forma que el resto de valores se pueden calcular siguiendo la siguiente ecuación:

$$Y = X - \frac{Min}{Max - Min}$$

- *Estandarización axiológica*: el proceso es idéntico al empírico con unos límites mínimos y máximos, con la diferencia de que estos límites no están determinados por los datos observados, sino que son elegidos con referencia al contexto de la evaluación.
- *Estandarización matemática*: se trata de aplicar una función de transformación matemática a los datos de forma que estos queden enmarcados entre un límite superior e inferior.

Otro de los conceptos clave presentados en el punto 4 es la **agregación** de indicadores. Está puede realizarse con o sin asignación de pesos a los diferentes indicadores, según la aplicación del índice.

En el caso de que se requiera una asignación de pesos, se puede optar por asignar el mismo peso para todos los indicadores básicos o asignarles diferentes pesos. Otra factor importante a determinar es si la relación entre los indicadores y el índice final es una suma o un producto (Boulanger P-M., 2008).

Una vez construido el índice, es interesante usar aspectos como la incertidumbre o el análisis de sensibilidad para identificar carencias y poder comprobar las robustez del índice resultante (Singh R.K. et al., 2012).

En la Tabla 4 se muestran algunos métodos para el cálculo de índices:

Tabla 4: Métodos para calcular indicadores compuestos (OECD, 2002)

Método	Ecuación
Suma de rankings	$I_t = \sum_{i=1}^n Rank_i^t$
Número de indicadores por encima de la media menos número por debajo de la media	$I_t = \sum_{i=1}^n \text{signo} \left[\frac{x_i^t}{\bar{x}_i^t} - (1 + p) \right]$
Diferencia respecto de la media (Ratio o porcentaje)	$I_t = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^t \cdot y_i^t}{\sum_{i=1}^n w_i^t} \quad y_i^t = \frac{x_i^t}{\bar{x}_i^t}$
Porcentaje de diferencia anuales durante años consecutivos	$I_t = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^t \cdot y_i^t}{\sum_{i=1}^n w_i^t} \quad y_i^t = \frac{x_i^t - x_i^{t-1}}{\bar{x}_i^t}$
Valores estandarizados	$I_t = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^t \cdot y_i^t}{\sum_{i=1}^n w_i^t} \quad y_i^t = \frac{x_i^t - \overline{x_i^{t-1}}}{\bar{x}_i^t}$
Valores reescalados	$y_i^t = \frac{x_i^t - \min(x_i^t)}{\text{rango}(x_i^t)}$

Donde los conjuntos 'i' hacen referencia al indicador i-ésimo, 't' hacen referencia al periodo t-ésimo.

Y se definen las siguientes variables:

- I_t - Índice agregado para el periodo t;
- x_i^t - Valor del indicador i en el periodo t;
- p - Umbral seleccionado arbitrariamente por encima o por debajo de la media;
- w_i^t - Peso dado al indicador 'i' en el periodo 't'.

Normalmente los indicadores quedan recogidos dentro de repositorios. Los autores Feng S.C. y Joung C.B. (2009), Singh R.K. et al. (2012), Labuschagne C. et al. (2005), presentan diferentes **conjuntos de indicadores** desarrollados por diferentes organizaciones y estudios. A continuación se detalla la estructura de algunos de ellos (Figura 9, Figura 10, Figura 11y Figura 12):

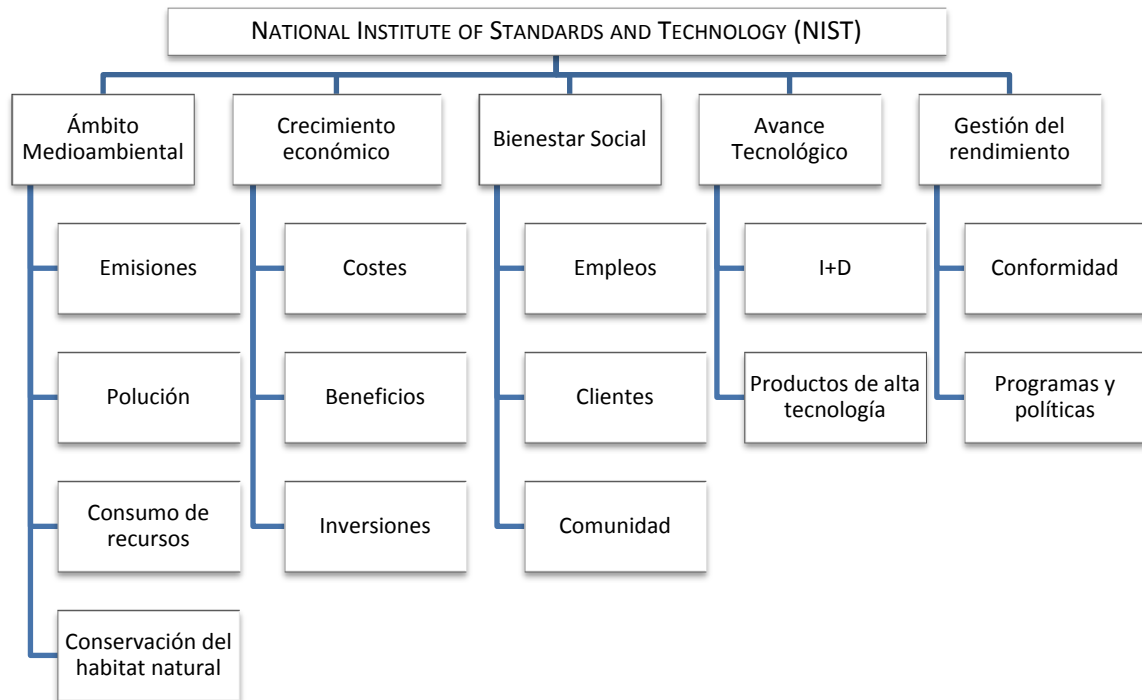


Figura 9: Repositorio de indicadores del NIST (Joung, C.B. et al., 2013)

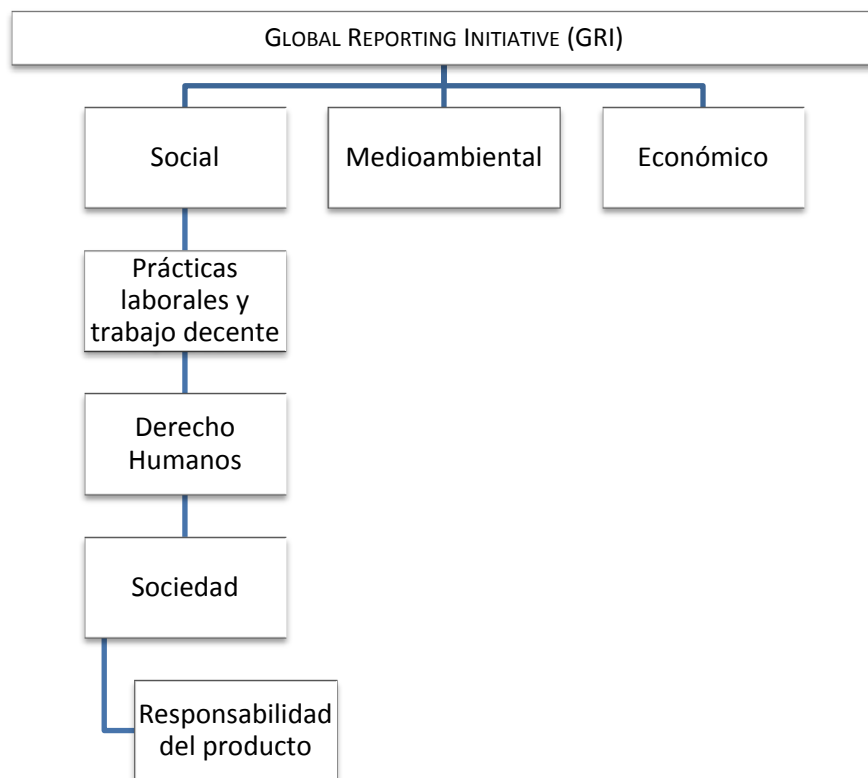


Figura 10: Repositorio de indicadores del GRI (Singh R.K. et al., 2012)

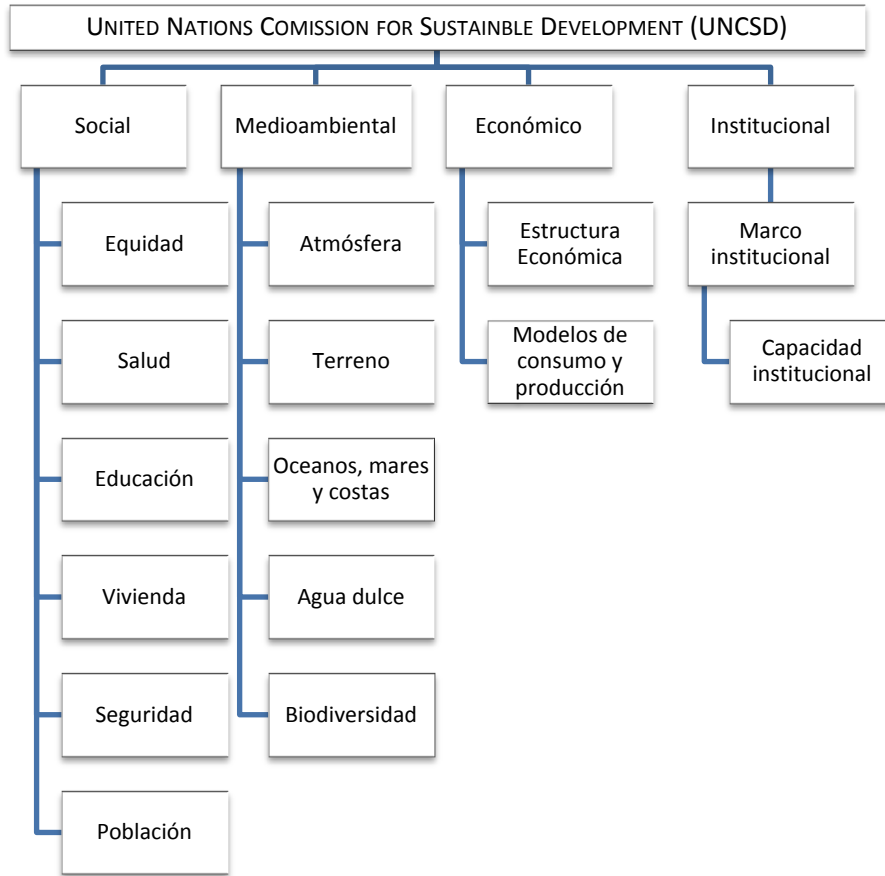


Figura 11: Repositorio de indicadores del UNCSO (Labuschagne C. et al., 2005)

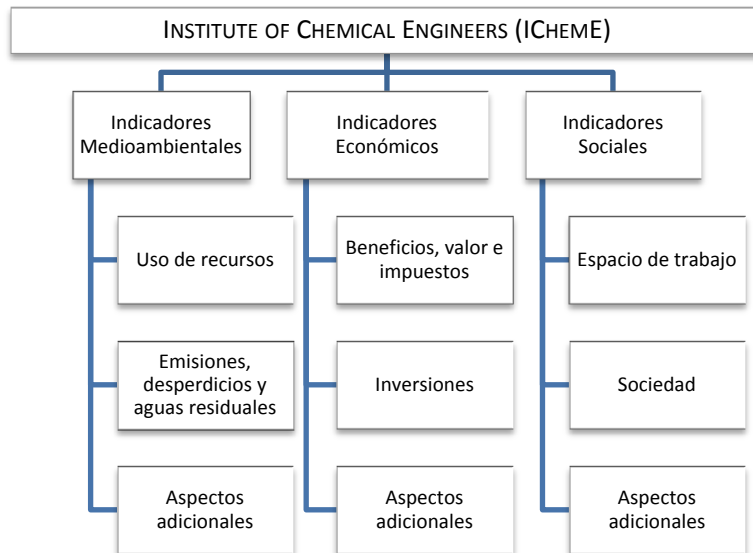


Figura 12: Repositorio de indicadores del IChemE (Singh R.K. et al., 2012)

Como se puede ver, se ha expuesto la estructura de los indicadores de los diferentes repositorios, sin entrar en detalle de las métricas, por lo que se ve interesante detallar algunas **métricas**, en concreto las de los **procesos de mecanizado**, ya que es una de las operaciones

más comunes en la industria. Lu T. et al. (2010) propone un conjunto de métricas en diferentes ámbitos para valorar la sostenibilidad (Tabla 5).

Tabla 5: Métricas para los procesos de mecanizado (Lu T. et al., 2010)

Tipo de métrica	Ejemplo
Impacto medioambiental	Emisiones efecto invernadero (kg CO2 equiv./un)
	Ratio de energías renovables usadas (%)
	Consumo total de agua (kg/un)
Consumo energético	Energía usada en la línea de producción (kWh/un)
	Energía usada en el mantenimiento del entorno de trabajo (kWh/un)
	Energía consumida en el manejo de materiales (kWh/un)
Coste económico	Coste de la mano de obra (\$/Un)
	Coste de la energía (\$/un)
	Coste de mantenimiento (\$/un)
Seguridad de los trabajadores	Exposición a químicos corrosivos o tóxicos (Incidentes/persona)
	Tasa de lesiones (Lesiones/persona)
	Cuasi accidentes (Cuasi accidentes/persona)
Salud de los trabajadores	Contaminación química del entorno de trabajo (mg/m ³)
	Nivel de polvo (mg/m ³)
	Índice de carga física (adimensional)
Gestión de los desperdicios	Masa de consumibles desechados (kg/un)
	Ratio de reuso de consumibles (%)
	Ratio de viruta y desperdicios reciclado (%)

Para terminar, también se considera interesante hacer hincapié en los **indicadores** referentes a la **dimensión social**, ya que es el nuevo pilar añadido en el paradigma de la fabricación sostenible, y que aún se encuentra en vías de desarrollo. Labuschagne C. et al. (2005), realiza un análisis de los repositorios más extendidos centrándose en qué aspectos sociales son tratados en cada uno de ellos. Para finalizar, en Vimal K.E.K. et al. (2014), se enumeran una serie de índices sociales y su descomposición en indicadores (Tabla 6).

Tabla 6: Indicadores sostenibles para la dimensión social (Vimal K.E.K. et al., 2014)

Índice	Indicador
Prácticas de compensación de empleados	Remuneraciones basadas en contribuciones
	Recompensas por buen comportamiento
	Aseguramiento de la equidad y motivación para retener al personal
Cumplimiento del desempeño socio-medioambiental	Cultura para el desempeño socio-económico
	Cumplimiento de las regulaciones gubernamentales
	Realización de programas de sensibilización
Implicación de riesgos para la salud y sus prácticas	Uso del equipo de protección personal
	Toxicidad del producto y tiempo de exposición en caso de ser inhalado
	Magnitud y tiempo de exposición a un ruido
Programa de desarrollo profesional del empleado (Entrenamiento y orientación del empleado)	Derechos humanos
	Sesiones de entrenamiento en procesos de fabricación avanzados y de mejora continua
	Evaluación de mejora continua
Involucración del empleado	Reconocimiento del empleado a través de sistemas de evaluación
	Involucración del empleado en grupos de toma de decisiones
	Cooperación y espíritu del empleado
Desempeño macro social	Bienestar macroeconómico
	Monitorización
	Legislación y cumplimiento
Ambiente de trabajo	Repetitividad del trabajo
	Habilidad de gestionar la diversificación
	Nivel de automatización del trabajo
Emoción o aburrimiento sentido durante el trabajo	Uso efectivo de políticas de rotación
	Asignación de trabajos diversificados
	Automatización de trabajos repetitivos

Capítulo 3

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE



3.1. Introducción.

A continuación se describirán un conjunto de artículos referentes a la fabricación sostenible, clasificados según el sistema de fabricación que estudien. Cada descripción contendrá información, si la hubiera, referente al objetivo a optimizar; singularidades del enfoque; modelo, variables de decisión y metaheurística desarrollada; caso práctico; resultados; y propuestas de investigación futura.

Se han utilizado fuentes bibliográficas tales como *Scopus*, portal Fama de la Universidad de Sevilla, *Google Scholar*, etc. Los parámetros de búsqueda utilizados se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7: Parámetros de búsqueda.

Sistema	Objetivo	Área de aplicación
Single	Optimisation	Energy
Parallel	Minimisation	Electricity
Job	Multi objective	Carbon
Flow	Planning	Co2
Flexible or CMS	Scheduling	Waste
Cellular or CMS		Pollution
Reconfigurable or RMS		Emission

3.2. Single Machine.

El sistema considera una única máquina que tiene que procesar una serie de trabajos que pueden tener tiempos de lanzamiento iguales o diferentes. Se conocerán los datos referentes a la máquina: consumos energéticos y tiempos necesarios para las diferentes operaciones. Una vez iniciado un trabajo, este no puede ser interrumpido y por lo general solo podrá procesar un trabajo a la vez, salvo que sea una máquina de procesamiento de lotes.

El resultado variará en función de los datos de partida. En el caso de que la secuencia de procesamiento no esté dada, el resultado será dicha secuenciación. En caso de que si esté dada, el resultado será la programación temporal de esa secuencia, es decir, cuándo se debe iniciar cada trabajo. En el caso de estudiar la creación de lotes, el resultado será el reparto de los trabajos en los lotes.



Figura 13: Esquema de un sistema Single Machine (Liu, C.H., y Huang, D.H., 2014)

▪ **Mouzon G. et al. (2007).**

Estos autores comienzan el estudio de la programación de la producción con criterios medioambientales. Observaron que apagar máquinas que no sean cuellos de botella era un enfoque con mucho potencial para reducir el consumo energético. Se propone un punto de equilibrio (P.E.), expresado en unidades temporales, que sirve para decidir si apagar la máquina o dejarla en espera hasta el siguiente trabajo.

$$P.E. = \frac{\text{Energía Apagado} - \text{Energía Encendido}}{\text{Consumo energético por unidad de tiempo en estado ocioso}}$$

Con base a este punto de equilibrio desarrollan reglas de secuenciación, con y sin creación de lotes, que buscan minimizar el consumo. Se prueban experimentalmente con 3 casos de 100, 200 y 300 trabajos.

Los autores también observan la necesidad de considerar un enfoque multi-objetivo, desarrollando un modelo que considera la minimización del tiempo total de terminación y la **energía total consumida**, para **diferentes estados de la máquina**: apagado, encendido, ocioso y estado de preparación para estar operativa, definido como *Setup*. El objetivo energético considerará el consumo en el estado ocioso y durante el *Setup*, ya que el consumo durante el procesado será fijo e independiente de la secuencia usada.

El resultado es un modelo de programación con objetivos lineales pero con restricciones no lineales que son linealizadas. La variable de decisión será el tiempo de finalización de cada trabajo.

El modelo se testea en un caso experimental de 9 productos, donde se considera la suma ponderada de los dos objetivos. Con la variación de pesos se genera el frente de Pareto.

▪ **Mouzon G. y Yildirim M.B. (2008).**

Partiendo del modelo anterior, los autores desarrollan uno nuevo con el objetivo de minimizar la tardanza total (suma de los retrasos de los trabajos que no cumplan con el tiempo de entrega) y el **consumo energético total**, considerando **diferentes estados de la máquina** (apagado, encendido, ocioso y *Setup*).

La regla de equilibrio definida en su anterior artículo se amplía y se traduce en una restricción que modela el comportamiento de la máquina entre los estados de espera y apagado/encendido.

$$P.E. = MAX \left[\frac{\text{Energía Apagado} - \text{Energía Encendido}}{\text{Consumo en estado ocioso}}, \text{Tiempo de Setup} \right]$$

El modelo es considerado como *NP-Hard* por lo que para su resolución se desarrolla un algoritmo GRASP. La variable de decisión será el tiempo de finalización de cada trabajo. Como la solución obtenida del algoritmo será un frente de Pareto, los autores proponen utilizar el método AHP para seleccionar una de ellas.

Para el caso práctico se consideran 50 trabajos teóricos con tiempo de llegada y de procesado exponencial.

Dentro de la investigación futura, se propone considerar un sistema con más máquinas, considerar como objetivo la energía pico, así como, considerar un mayor número de estados de la máquina.

- **Yildirim M.B. y Mouzon G. (2012).**

Los mismos autores continúan con el estudio de su primer modelo presentado en 2007, cambiando el objetivo, pasando a considerar como indicador de la eficiencia el tiempo de finalización.

Para la resolución de este modelo, desarrollan un algoritmo genético como metaheurística de resolución del problema al que le incorporan mecanismo de aceleración en la búsqueda de soluciones.

El algoritmo se prueba en un caso de 50 trabajos generados aleatoriamente, aplicando AHP para seleccionar el de mejor desempeño.

Dentro de la investigación futura, se propone considerar sistemas con un mayor número de máquinas y probar con mayor variedad de objetivos no medioambientales.

- **Hanoun S. et al. (2012).**

En este artículo los autores presentan un enfoque diferente, el problema de estudio tiene como objetivo minimizar la tardanza total, así como, **minimizar el desperdicio de material** en la industria carpintera. Para ello, se define un índice estadístico de factor de ahorro asociado a la agrupación de dos trabajos en una misma plancha de materia prima.

Para resolver este problema se desarrolla un algoritmo de búsqueda del cuco (*Cuckoo Search*), imitando el comportamiento de este animal a la hora de depositar sus huevos en nidos de otros pájaros.

El caso práctico consta de problemas desde 5 a 10 trabajos, que se resuelven y comparan con los resultados obtenidos mediante el método combinatorio con ayuda de tres indicadores.

Dentro de la investigación futura, se propone comparar el algoritmo del cuco con otros métodos populares, así como, probar el algoritmo en un entorno dinámico y estocástico para testear su efectividad.

- **Shrouf F. et al. (2013).**

En este caso, el artículo aborda el problema mono-objetivo de minimizar el **coste total de la energía** considerando **diferentes estados de la máquina** (Figura 14) y como enfoque novedoso usa el **precio variable de la energía** a lo largo del periodo productivo. El objetivo contempla la energía consumida en cada estado de la máquina y aquella necesaria para transitar entre los diferentes estados.

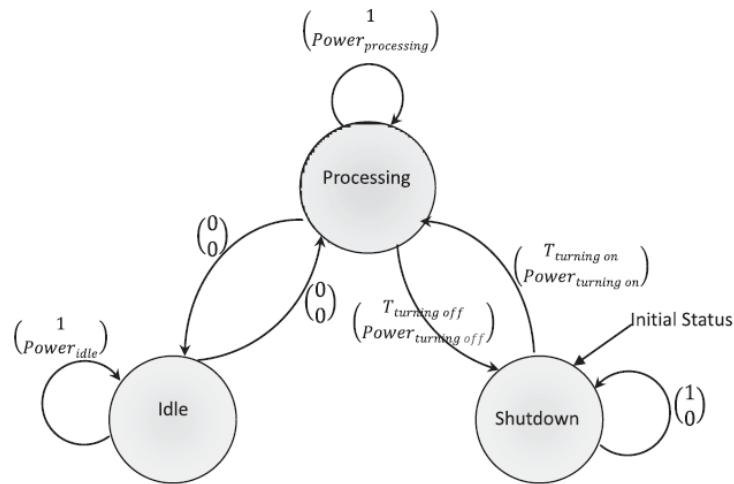


Figura 14: Estados de la máquina y transición entre ellos (Shrouf F. et al., 2013)

En este caso la secuencia de procesado está dada. Las decisiones serán: cuándo empezar un trabajo y si la máquina debe permanecer en espera o apagarse. La regla usada para decidir si apagar la máquina serán las siguientes:

- Si el tiempo de *Setup* es menor que el tiempo en estado ocioso.
- Si el consumo energético en el *Setup* es menor que durante el estado ocioso.

Se desarrolla un modelo lineal entero donde las variables de decisión se dividen en dos grupos, las referentes a la máquina (estado en el que se encuentra la máquina por periodo y si la máquina se encuentra en transición entre dos determinados estados durante un periodo) y las referentes a los trabajos procesados (si un trabajo es procesado durante un periodo determinado y el periodo en el cual comienza a ser procesado un trabajo). Como el modelo se considera *NP-Hard*, se desarrolla un algoritmo genético para poder resolver el problema en tiempo polinomial.

El nuevo enfoque se usa en 13 casos de los cuales se detallan resultados de cuatro de ellos compuestos por 5 y 10 trabajos. El coste obtenido mediante el algoritmo genético es comparado con los obtenidos analíticamente y con el coste obtenido según la política 'tan pronto como se pueda'. El nuevo enfoque consigue ahorros de hasta 32 %.

Dentro de la investigación futura, se considera la optimización multi-objetivo, considerar eventos en las máquinas (roturas, periodos de mantenimiento) y extender la duración del turno estudiado.

▪ **Liu C., Yang J. et al. (2014).**

Los autores presentan el objetivo múltiple de minimizar el tiempo total de finalización, así como reducir la **huella de carbono**, considerada como una parte proporcional de la energía total consumida en el sistema. Para cumplir con este objetivo considera **diferentes estados de la máquina** (encendida, apagada, ociosa), distinguiendo la energía asociada al encendido, apagado, procesado y espera.

La secuencia de procesado se considerada dada y se calculada basándose en la regla *First-Come-First-Served*, de forma que la decisión será cuando procesar determinado producto

y si la máquina se apagará entre determinados productos. Es la regla definida en Mouzon G. y Yildirim M.B. (2008), para decidir si apagar la máquina o dejarla ociosa.

Se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta y un algoritmo genético para la resolución del problema en un tiempo razonable. Las variables de decisión son el tiempo de comienzo de procesado para cada producto y el estado en el que queda la máquina después de haber procesado un producto (ociosa o apagada).

Se prueba el algoritmo con dos casos teóricos de 3 y 5 productos. El caso de estudio real considera desde 7 trabajos de la industria de mecanizado. Para validar el algoritmo, se compara con el desarrollado en Yildirim M.B. y Mouzon G. (2012).

Dentro de la investigación futura, se considera necesario usar otro tipo de objetivos no medioambientales, considerar tiempos de llegada estocásticos, así como, considerar entornos de trabajo multi-máquina.

- **Liu C-H. y Huang D-H. (2014).**

En este artículo, los autores estudian dos sistemas de fabricación diferentes. El primero se centra en una única máquina y tiene el objetivo de minimizar la tardanza total ponderada y la **huella de carbono**, considerada como una parte proporcional de la energía total consumida en el sistema en estado de trabajo y ocioso, en un **entorno dinámico** de llegada de trabajos.

La principal característica de este artículo es la **creación de lotes** de productos en una máquina de procesado de lotes con capacidad determinada.

Se desarrollan dos metaheurísticas basadas en algoritmos genéticos. En este caso el frente de Pareto generado con el segundo se utiliza como resultado de referencia en el primero. La decisión a tomar será si mientras la máquina tiene un lote parcial, se comienza con su producción o se espera hasta tener el lote completo.

Para el caso práctico experimental, se testarán un total de 100 trabajos que tendrán diferentes tiempos de lanzamiento, de entrega, de procesado, así como, prioridades respecto a los objetivos a optimizar. Estos datos serán generados aleatoriamente a partir de distribuciones uniformes.

Los resultados arrojan un fuerte *Trade-off* entre la tardanza y la huella de carbono. Un mayor espacio entre la llegada de trabajos, aumenta el consumo de energía y por consiguiente la huella de carbono. Este mayor espacio también afecta a la creación de lotes, tendiendo a un mayor procesado de lotes parciales.

Como investigación futura se propone integrar otros objetivos en la función como el tiempo medio de flujo (media de los tiempos de finalización de todos los trabajos) y el coste de la energía.

▪ **Cheng J. et al. (2014).**

En este artículo los autores presentan un enfoque que difiere del resto visto. Plantean un modelo multi-objetivo con la finalidad de minimizar la diferencia de tiempo entre el inicio y el final de una secuencia de trabajos (*Makespan*) y minimizar también el **coste de la energía** suponiendo **precio variable de la energía**, considerando la energía global por producto procesado.

La principal característica de este artículo es la **creación de lotes** de productos y que estos tienen el mismo tiempo de lanzamiento aunque diferente tiempo de procesado. También se considera la capacidad de la máquina, ya que esta puede procesar un número determinado de productos a la vez.

Se desarrolla un modelo no lineal entero mixto que se resuelve mediante el método ϵ -*constraint* para obtener el frente de Pareto. Las variables de decisión son: si un producto está asignado a un determinado lote en un periodo; si un lote está asignado a un periodo determinado; si existe algún lote asignado a un determinado periodo; el número total de lotes.

El algoritmo se testea experimentalmente con una serie de problemas generados aleatoriamente de entre 25 y 40 trabajos, el tiempo de procesado y coste de la energía por periodo es generado con una distribución uniforme.

Como investigación futura propone estudiar problemas con tiempo de lanzamiento diferente en máquinas en paralelo.

3.3. Parallel Machine.

En este sistema se cuenta con dos máquinas en paralelo con la misma función, de características diferentes. Este sistema puede ser considerado como una abstracción de un *Job Shop*.

Se contará con una serie de trabajos independientes que tiene que ser secuenciados, repartiéndolos en una de las dos máquinas, que solo pondrán procesar un trabajo a la vez. Una vez comenzado un trabajo, este no puede ser interrumpido.

Cada máquina tendrá unos datos diferentes a capacidad y consumo por hora. Se conocerán los tiempos de procesado y el consumo energético de cada máquina, así como, el tiempo de entrega para cada producto.

El resultado será la asignación de trabajos a las máquinas, así como la secuencia de producción.

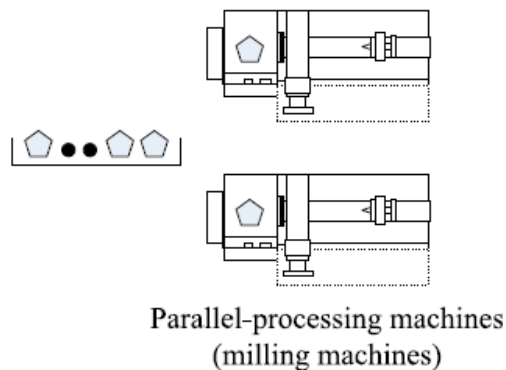


Figura 15: Esquema de un sistema de máquinas en paralelo (Liu C-H. y Huang D-H., 2014).

- **He Y. y Liu F. (2010).**

El siguiente artículo puede ser considerado como un problema de máquinas en paralelo. Plantea el objetivo múltiple de minimizar el *Makespan* y la **energía** considerada como el **total** consumido en la máquina.

Una de las principales características de este problema es la consideración de **restricciones medioambientales**, definidas como una matriz de índices asociada a cada impacto, considerado la combinación de todas las máquinas y trabajos, de forma que se le asigna un 0 en caso de que sea una combinación no respetuosa con el medioambiente y un 1 en caso de que si lo sea.

Para la creación de las matrices se usara la evaluación cualitativa por parte de los managers de producción, que mediante la teoría *Fuzzy* determinarán los diferentes impactos para cada trabajo y máquina. Tras una “*desfuzzyficación*” mediante el valor medio, se realizará la traducción de estos a las restricciones expresadas como [0,1].

Se propone un modelo de programación matemática multi-etapa: en una primera se optimizará el *Makespan*, en la segunda se minimizará la energía pasando a ser el resultado de la primera un límite superior. En ambas etapas se considera el impacto medioambiental como

restricciones. La variable de decisión es la asignación de un trabajo a una máquina determinada.

Plantea dos objetivos multi-etapa, minimizar el *Makespan* por una primera y la energía en una segunda, teniendo el *Makespan* óptimo encontrado en la primera etapa como restricción. En el caso práctico considera 7 tipos de engranajes repartidos en lotes a procesar en 5 máquinas de fresado diferentes. Se consideran varios casos de estudio.

▪ **Moon J-Y. et al. (2013).**

Se presenta el problema de minimizar el *Makespan* y el **coste total de la energía**, considerando el consumo asociado al procesado de cada trabajo. En este caso se consideran **precios variables de la energía** en función del tiempo.

Se considerará que durante los tiempos ociosos de las máquinas no habrá consumo asociado.

Se desarrolla un modelo de programación matemática cuyas variables son: si un trabajo es procesado en un periodo de tiempo en una determinada máquina; y si un trabajo es asignado a determinada máquina. También se desarrolla una metaheurística basado en algoritmo genético.

Para el caso práctico se consideran dos escenarios: 5 trabajos a procesar en 2 máquinas; y 6 trabajos en 3 máquinas. La metaheurística propuesta se compara con otras tres basados en algoritmos genéticos, obteniendo reducciones energéticas de entre 13% y 22%.

Como investigación futura se propone aplicar el enfoque a problemas de Job Shops flexibles, así como, considerar fuentes de energías renovables.

▪ **Li Z. et al. (2015).**

Se presenta el problema multiobjetivo de minimizar la tardanza total, asociada a una tasa de penalización, y el **consumo energético**, considerando la energía en estado operativo, ocioso y la necesaria en el proceso de puesta en marcha de la máquina, ya que se consideran **diferentes estados de la máquina**.

Una de las principales características del problema es que en el proceso de puesta en marcha de la máquina, aparte de considerar la energía necesaria, se considera el tiempo asociado a este proceso.

Cada trabajo tendrá diferentes tiempos de llegada y de entrega, así como diferentes consumos y tiempos según la máquina seleccionada.

Se desarrolla un modelo matemáticos y 10 heurísticas basadas en reglas de prioridad, reglas energéticas y reglas de combinatoria. Las variables de decisión son: si un trabajo está asignado a una determinada máquina; si un trabajo es procesado detrás de otro en una determinada máquina, y si una máquina se encuentra en el proceso de puesta en marcha en determinado periodo de tiempo.

Se generan 10 conjuntos de casos basados en 50, 100, 200 trabajos; 4, 8 y 12 máquinas en paralelo, con el resto de datos necesarios generados a partir de distribuciones estadísticas. Los resultados muestran como estas últimas mejoran el comportamiento de las dos primeras.

3.4. Flow Shop.

En este sistema se tiene un número de máquinas en serie, que pueden ser iguales o diferentes, de forma que cada trabajo tiene que pasar por todas de forma ordenada. No existen prioridades pero sí una secuencia de operaciones para cada producto.

Se realizará un trabajo por etapa, cada máquina podrá procesar un solo producto a la vez. Una vez comenzado un trabajo, este no puede ser interrumpido y no puede empezar en la siguiente si no ha pasado por la predecesora.

Se conocerán los tiempos de procesado y el consumo energético de cada máquina.

El resultado será la asignación de trabajos a las diferentes máquinas, así como la secuencia de producción.

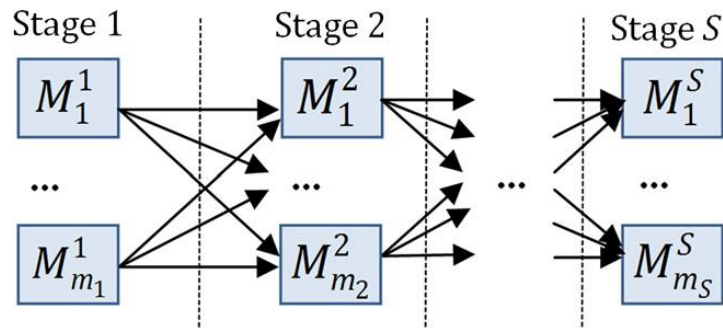


Figura 16: Esquema de un sistema Flow Shop (Bruzzone A.A.G. et al., 2012)

- **Liu X. et al. (2008).**

Se aborda el problema de minimizar el **consumo energético total**, considerando el *Makespan* como una restricción. La energía total estará formada por tres componentes: la energía de procesado; la energía de encendido, preparación y *Setup* considerada de forma conjunta; la energía en estado ocioso.

Se desarrolla un modelo de programación no lineal entera mixta que tiene como variables de decisión: si un trabajo es procesado en una máquina de una etapa determinada y el tiempo en el que un trabajo comienza a ser procesado en una máquina de una etapa determinada. Para resolver el problema en un tiempo razonable, se desarrolla un algoritmo genético.

Para el caso práctico, se consideran 12 trabajos a procesar en un sistema de 3 etapas con 3, 2 y 3 máquinas diferentes.

Se puede ver cómo el nuevo enfoque puede obtener un ahorro del 11% de la energía consumida.

Como investigación futura, se propone estudiar los *Trade-offs* entre energía consumida y *Makespan* considerado como problema multi-objetivo.

▪ **Fang K. et al. (2011).**

Estos autores presentan un modelo multi-objetivo que busca minimizar el *Makespan*, la **energía pico** y la **huella de carbono**, considerada como una parte proporcional de la energía total consumida, donde se contempla la energía durante el procesado, energía ociosa y energía básica, que es la consumida durante el proceso de carga, descarga y otras tareas auxiliares.

Este problema de *Flow Shop* es considerado dentro de un entorno de fabricación flexible ya que no se contemplan tiempos de *Setup* entre los trabajos. Además, se considerará la **velocidad de las máquinas** como variable que afecta al consumo energético y al tiempo de procesado.

Se presenta un modelo de programación lineal entera mixta cuyas variables de decisión son:

- La posición en la que un trabajo es procesado en una máquina con una velocidad determinada.
- Si el tiempo de comienzo de un trabajo procesado en una máquina es posterior al tiempo de comienzo de otro trabajo en otra máquina.
- Si el tiempo de comienzo de un trabajo en una máquina ocurre durante el procesado de otro trabajo en otra máquina.
- Si un trabajo está en determinada posición en la secuencia de procesado de una máquina a una determinada velocidad y empieza mientras otro trabajo es procesado en otra máquina.

Para el caso práctico se considera 6 productos simples de un mismo diseño que varía sus dimensiones. Este será procesado en dos máquinas de mecanizado, con 6 velocidades posibles, considerando dos escenarios: sin almacenamiento intermedio entre las dos máquinas y con espacio ilimitado.

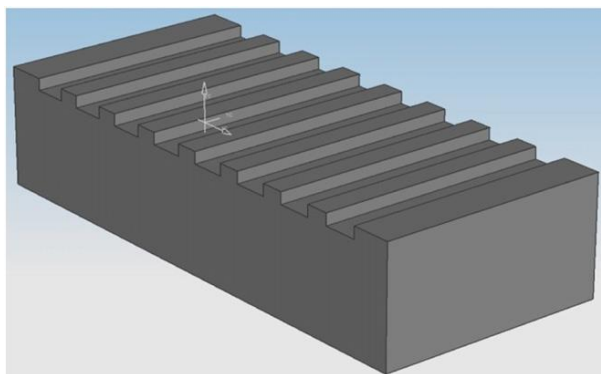


Figura 17: Caso práctico, placa de hierro fundido con ranuras (Fang K. et al., 2011)

Para generar el frente de Pareto se usa un software comercial y programación por metas. El resultado es el frente de Pareto y las velocidades de procesado para cada producto.

Dentro de la investigación futura, se proponen modelos simplificados que sean capaces de representar sistemas industriales más complejos. También se propone expandir la

formulación para considerar otros impactos sobre la salud, consumo de agua, emisiones de aire y ruido.

▪ **Bruzzone A.A.G. et al. (2012).**

En este artículo se considera un enfoque mixto, se busca una secuenciación generada mediante un modelo que tiene por objetivos minimizar la tardanza total ponderada y el *Makespan*, con una restricción que añade un límite superior sobre la **energía pico**, considerada como la suma de todos los consumos de las tareas procesadas por periodo.

En este caso, se considera un *Flow Shop* flexible, en el que los productos pueden pasar por cualquiera de las máquinas en paralelo de cada una de las etapas.

Se desarrolla un modelo de programación entera, cuyas variables de decisión son:

- Asignación de una tarea de un trabajo determinado a una máquina determinada.
- Si una tarea de un trabajo en una maquina determinada se ejecuta durante determinado periodo.
- Si un trabajo empieza en una máquina durante un determinado periodo.

Además del modelo, se utilizará una metaheurística propuesta en un artículo anterior de los autores basada en la búsqueda aleatoria de vecinos.

Para el caso práctico, se consideran 20 trabajos con diferentes tiempos de lanzamiento y de entrega, en una línea de 3 etapas con 2 máquinas por etapa. Como cada trabajo tiene que ser procesado en cada etapa, existen un total de 60 tareas. Se diseñan 6 casos con diferentes límites para la energía pico y se prueban tanto con el modelo como con la metaheurística.

▪ **Dai M. et al. (2013).**

Este artículo presenta el objetivo múltiple de minimizar el *Makespan* y el **coste de la energía**, considerando la energía básica (la consumida cuando las máquinas pasan a modo productivo) y ociosa. Se considerará la **velocidad de las máquinas** como aspecto que afecta al consumo energético y al tiempo de procesado.

Como mínimo dos etapas, en la que al menos en una existen dos máquinas en paralelo, con almacenamiento infinito entre ellas. Las máquinas de una misma etapa son diferentes, por lo que los tiempos de procesado variaran en función de la máquina. Todos los trabajos estarán disponibles al comienzo del primer periodo.

Se plantea un modelo de programación lineal entera, donde los objetivos del modelo se integran de forma ponderada y normalizada. La única variable de decisión es si un trabajo se procesa en una máquina a una velocidad determinada. Para la resolución del problema se desarrolla un algoritmo basado en el recocido simulado con algunas funcionalidades del algoritmo genético.

Para el caso práctico, se consideran 12 trabajos a producir en 3 etapas con 3, 2 y 4 máquinas en paralelo respectivamente. La determinación de la ponderación del objetivo vendrá marcada por el decisor. En este caso, se testean tres escenarios, el primero en el que solo se considera el objetivo del *Makespan*; el segundo, en el que se considera solo el objetivo

energético; el tercero, en el que se le asigna la misma importancia a los dos; y el cuarto, donde se considera un vector de pesos en incrementos de 0,1.

Los resultados muestran un gran potencial de ahorro de energía en el caso de que se quiera optar por un enfoque de apagar/encender máquinas.

Como investigación futura, se propone estudiar con mayor amplitud casos sacados de la industria, así como, la consideración de eventos, como rotura de máquinas, incorporación de nuevos trabajos o cancelación de los ya existentes.

- **Luo H. et al. (2013).**

Se presenta el objetivo múltiple de minimizar el *Makespan* y el **coste de la energía**, se considera energía durante el procesado y en estado ocioso. Además se considerará el **precio variable de la energía** y la **velocidad de las máquinas** como factor que afecta al consumo de las mismas, así como al tiempo de procesado.

En este caso, todas las máquinas se considerarán iguales, y todos los trabajos estarán disponibles al comienzo.

En este estudio se desarrolla un algoritmo de colonias de hormigas para resolver el problema cuya variable de decisión es si una máquina de una etapa está trabajando durante determinado periodo. Se compara la efectividad de este algoritmo con otros ya existentes

Para el caso práctico, se considerarán una serie de casos generados aleatoriamente compuesto por las combinaciones de 10, 20, 50 trabajos, 2, 4 etapas y 2, 4, 8 máquinas heterogéneas por fase. En un primer lugar se compara el algoritmo con otros existentes NSGA-II (Deb K. et al., 2002), SPEA2 (Zitzler et al., 2001). En una segunda parte, se considera una combinación de máquinas con diferentes velocidades, para comprobar el comportamiento del algoritmo cuando se considera el consumo.

Los resultados muestran el potencial de poder asignar las máquinas más rápidas a periodos de bajo coste, pudiendo así cumplir con ambos objetivos.

Como investigación futura, se propone seguir probando más heurísticas para el objetivo energético, así como, estudiar mejores reglas de secuenciación dinámicas para el algoritmo propuesto.

- **Tan Y. et al. (2013).**

Este artículo se centra en un proceso de dos etapas: en la primera el objetivo es minimizar el tiempo total de finalización; en una segunda, basándose en la secuenciación generada, se minimiza el **coste total de la energía**, suponiendo **precios variables** de la misma.

El problema considera varias suposiciones provenientes de las características del sistema de producción de acero que se estudia, destaca la necesidad de lograr continuidad en el proceso a través de limitar los tiempos de espera entre etapas. Se considerará un horizonte temporal de un día (1440 minutos).

Se desarrolla un primer modelo con el objetivo de minimizar el *Makespan*, donde se considera una sola máquina por etapa y se busca obtener el tiempo de comienzo de procesado y la secuencia en cada etapa, mientras se respeta la continuidad. Las variables de decisión son: el tiempo de comienzo de un trabajo en una etapa determinada y el tiempo de procesado de un trabajo en una etapa determinada.

El segundo modelo desarrollado para la segunda etapa considera el trabajo de forma global como conjunto de operaciones en cada etapa, se busca determinar el tiempo de comienzo de cada trabajo global de forma que se ubiquen los menos posibles durante periodos de coste energético alto, minimizando así el coste energético total. Las variables de decisión es el tiempo de comienzo de procesado de un determinado trabajo global.

Para el caso práctico, se genera aleatoriamente un problema de producción de acero.

▪ **Xu F. et al. (2014).**

Se propone un modelo que considera una combinación *Makespan* y tardanza y la **energía pico**, introducida como un límite superior a través de una restricción del modelo.

En este caso, los objetivos se normalizan sustrayendo y dividiendo entre el mínimo valor de cada objetivo. Para los objetivos de tiempo se considera igual importancia para cada uno. Los productos tendrán diferente fecha de lanzamiento y de entrega.

Se presentan dos modelos enteros mixtos, el primero considera el tiempo discretizado, cuyas variables de decisión son: si una operación de un trabajo se asigna a una máquina predeterminada y si una operación de un trabajo se ejecuta en una máquina durante un periodo determinado. El segundo considera el tiempo de forma continua, con el fin de comprobar el enfoque continuo es más adecuado. Este modelo está basado en espacios de longitud indeterminada en el que se irán asignado las tareas. En este caso, las variables de decisión son: si una operación de un trabajo es ejecutada en determinado espacio de una máquina; el tiempo final de determinado espacio de una máquina; si un espacio de una máquina tiene algún duplicado en la programación de otro espacio de otra máquina.

En el caso práctico se genera aleatoriamente los datos de un sistema de 3 etapas y 2 máquinas por etapa. En primer lugar se compara el modelo discreto con el modelo propuesto por Bruzzone A.A.G. et al. (2012). En un segundo lugar, se compara el modelo discreto con el continuo.

Como resultados se puede ver como el modelo discreto mejora el comportamiento del propuesto por Bruzzone A.A.G. et al. (2012) y también se ve como para modelos multi-objetivos, en este caso añadiendo la energía, el modelo discreto se comporta mejor.

- **Zhang H. et al. (2014).**

Se presenta un modelo multi-objetivo que busca minimizar la **huella de carbono** y el **coste de la electricidad**, considerada como el total consumido durante el procesado. En este caso, se considera que existe un *Trade-off* entre el coste de la **electricidad** y las **emisiones de carbono**, debido a que se considera que la energía se obtiene mediante diferentes procedimientos (carbón, gas natural, renovables), estos se combinan para cubrir la demanda, obteniendo diferentes emisiones de carbono en función de cual sea la combinación.

Además, el modelo considerará el **precio variable de la energía**, por lo que al final se tendrá periodos en los que el precio de la energía y la emisión de carbono asociada serán diferentes. Cuando una máquina no está procesando, se considera que está apagada, ya que no se considera consumo asociado a ese estado.

Se presenta un modelo lineal entero mixto cuyas variables de decisión son: si una máquina está procesando un producto en un periodo determinado y si una máquina comienza a procesar un producto en un periodo determinado.

En el caso de estudio, el sistema estudiado está compuesto por 8 etapas con una máquina por etapa. El primer caso planteado busca encontrar una secuenciación que cumpla con el requisito de número de productos al día, en este caso, 80 productos en un turno de 16 horas. En un segundo caso, se consideran los objetivos energéticos mientras se respeta el ratio de productos por día.

El resultado muestra cómo el modelo apenas asigna trabajos en las zonas de coste alto.

Como investigación futura se propone mejorar la formulación para adaptarla a sistemas más realistas, así como, desarrollar algoritmos para su resolución. También se propone considerar diferentes productos.

- **Liu C-H. y Huang D-H. (2014).**

Este artículo, ya expuesto en la sección 3.1, presente un objetivo triple, minimizar la tardanza total ponderada, la **huella de carbono** y la **energía pico**, considerando la energía de procesado y en estado ocioso.

Los autores presentan un sistema de fabricación como evolución del presentado en el apartado de máquina única. Se trata dos etapas, una primera con una máquina de procesado de lotes y una segunda con dos máquinas en paralelo idénticas.

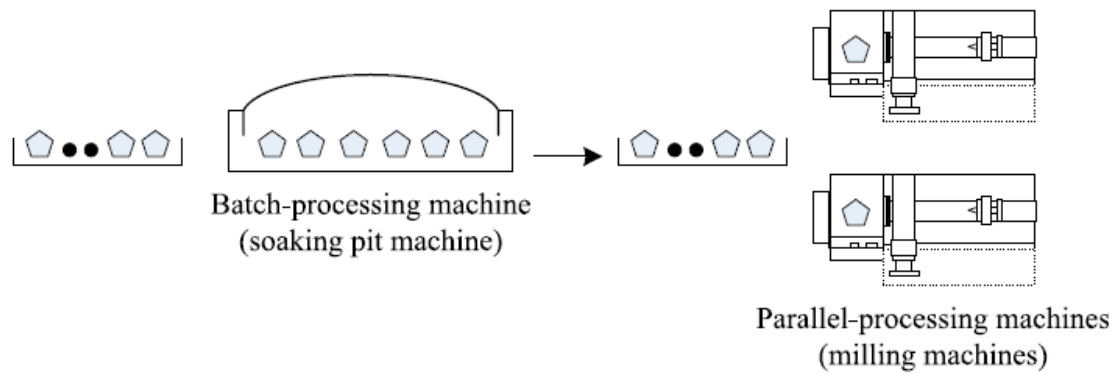


Figura 18: Esquema del sistema propuesto en el caso de estudio (Liu C-H. y Huang D-H., 2014).

Las decisiones a tomar en la primera etapa son las siguientes: formación de los lotes y creación de la secuencia de producción. Las decisiones a tomar en la segunda etapa son las siguientes: secuencia y velocidad a la que se procesan los trabajos.

Se desarrollan dos metaheurísticas basados en algoritmos genéticos para la resolución del problema planteado.

Para el caso práctico experimental, se testearán un total de 100 trabajos que serán diferentes diseños de un mismo producto. El tiempo de lanzamiento será el mismo para todos los trabajos, y diferentes tiempo de entrega, de procesado y penalización para la tardanza.

- **Ding J-Y. et al. (2015).**

El objetivo del modelo presentado en este artículo considera la minimización del *Makespan* y de las **emisiones de carbono**, considerado como una parte proporcional de la energía total consumida en estado de proceso y en estado ocioso.

Se consideraran **diferentes velocidades** que afectaran al consumo energético, así como, al tiempo de procesado. En este caso, no se apagarán las máquinas ya que no se considera realista para determinados sistemas de fabricación.

Para la resolución del problema se desarrollan dos metaheurísticas basadas en la inserción NEH. Las variables de decisión son: si una máquina funciona a determinada velocidad durante un periodo dado y si una máquina está en estado ocioso durante un periodo determinado.

En el caso práctico, se comparan el desempeño de los dos algoritmos propuestos con el NSGA-II (Deb K. et al., 2002), recocido simulado (Dai M. et al., 2013) y algoritmo genético (Liu C-H. y Huang D-H., 2014). Se generan una serie de casos como combinación de 20, 40, 60, 80, 100 trabajos; 4, 8, 16 máquinas por etapa. El tiempo de procesado se obtendrá de una distribución uniforme. Se consideraran 5 tipos de velocidades.

Dentro de la investigación futura, se propone considerar tiempos de *Setup* y almacenamiento intermedio entre etapas.

3.5. Job Shop.

En este sistema se cuenta con una serie de máquinas y una serie de trabajos a procesar, de forma que cada trabajo tiene una serie de operaciones con una ruta de procesamiento conocida a través de las diferentes máquinas, con la condición de que un trabajo podrá visitar cada máquina solo una vez, es decir, no habrá recirculación.

No existen restricciones de precedencia entre operaciones de distintos trabajos.

Las máquinas solo pueden procesar una operación a la vez y ésta no puede ser interrumpida.

El resultado será la secuenciación de los trabajos en las máquinas, así como, el tiempo de comienzo del procesamiento de cada operación.

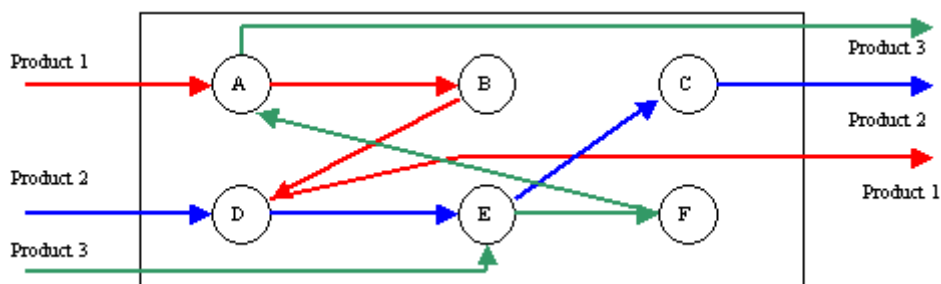


Figura 19: Esquema del sistema Job Shop.

(Fuente: http://fisher.osu.edu/~kinard.1/russian_dl/course/OM/Text/Unit2/Unit2.html)

- **He Y. et al. (2005).**

El artículo se centra en el objetivo múltiple de minimizar el *Makespan* y el **consumo total energético**, considerado como la energía en estado ocioso, ya que la de procesamiento se considera constante.

Se presenta un caso particular de *Job Shop*, con una sola etapa, en el que no existen rutas de procesamiento, de forma que cada producto se procesará en una de las máquinas, siendo el resultado la asignación de trabajos a una única máquina.

Se presenta un modelo de programación, cuya variable de decisión es si un trabajo se realiza en determinada máquina. Para la resolución del problema se desarrolla un algoritmo de búsqueda Tabú.

Para el caso de estudio, se consideran 5 tipos de productos, en este caso engranajes, a procesar en 4 máquinas.

- **Yi Q. et al. (2012).**

Los autores plantean un problema multi-objetivo con el fin de minimizar el *Makespan* y las **emisiones de carbono**, considerada como una parte proporcional de la energía total consumida en el sistema. En este caso se contempla la energía durante el procesamiento y en estado ocioso.

Se desarrolla un modelo de programación cuyas variables de decisión son: el tiempo de comienzo de una operación de un trabajo en una máquina determinada; si un trabajo es procesado en una máquina antes que en otra; y si un determinado trabajo es procesado en una máquina antes que otro. Para la resolución del problema se desarrolla un algoritmo genético.

Para el caso práctico, se considera un caso planteado por Lawrence S. (1984) compuesto por 10 trabajos y 5 máquinas, tomando sus datos para compararlos con los generados con el nuevo enfoque. Los resultados muestran como con el mismo Makespan se puede obtener menores emisiones de carbono.

Como investigación futura, se propone estudiar sistemas más complejos, considerando una mayor flexibilidad y máquinas heterogéneas.

- **Liu Y. et al. (2014).**

Se presenta el enfoque multi-objetivo de minimizar el retraso total ponderado y el **consumo energético total**. Se considera tres componentes: en estado ocioso, en funcionamiento y durante el corte. Centrándose en la de carácter no productivo, que no son constantes, en este caso la consumida en estado ocioso.

Para cada trabajo se considerará un tiempo de entrega diferente.

Se desarrolla un modelo de programación cuyas variables de decisión son: el tiempo de comienzo de una operación de un trabajo en una máquina; si una operación de un trabajo en una máquina precede a otra operación de otro trabajo en la misma máquina; y si una operación de un trabajo se realiza en determinada máquina. Para resolver el problema en tiempo polinomial se desarrolla un algoritmo genético.

Para el caso práctico se consideran los casos planteados por Fisher H. y Thompson G.L., (1963) que consta de 10 trabajos y 10 máquinas. El algoritmo propuesto es comparado con dos heurísticas usadas en el software *Lekin* (Pinedo M.L., 2009), que solo consideran el retraso como objetivo. Los resultados muestran cómo se reduce la energía no productiva, aunque se sacrifica parte del objetivo de la tardanza. Para casos de mayor tamaño, este sacrificio se ve reducido, sumado a un mayor ahorro energético.

Como investigación futura, se propone probar el enfoque de encendido/apagado de máquinas en estado ocioso, así como, considerar un entorno dinámico de llegada de trabajos.

- **Jiang Z. et al. (2014).**

Se presenta un enfoque multi-objetivo que considera la minimización del *Makespan*, **coste** (de materia prima y de procesado por unidad de tiempo), **tasa de defectos** y **energía**.

La tasa de defectos se considerará como un índice de defectos asociado al procesado de una operación de un trabajo en una determinada máquina. La energía se considerará como valor global para una determinada operación en una máquina. Se conocen los datos referentes a costes, calidad y energía.

Se consideran diferente tiempo de llegada de los trabajos y máquinas heterogéneas.

Para la resolución del problema se desarrolla un algoritmo genético, cuyas variables de decisión son: si una operación de un trabajo se procesa en una máquina; el comienzo del procesado de una operación de un trabajo en una máquina.

Para seleccionar una de las soluciones propuesta en cada ejecución del algoritmo, los autores se basan en la metodología AHP asignándole un peso a cada objetivo.

El caso práctico consiste en 6 trabajos con diferente número de operaciones a procesar en 6 máquinas heterogéneas.

Como investigación futura, se propone considerar los estados de la máquina.

▪ **Tchomte S.K. y Tchernev N. (2014).**

Los autores plantean un problema multi-objetivo centrado en minimizar el *Makespan* y las **emisiones de carbono**, consideradas como una cantidad inversamente proporcional al tiempo de procesado, a menor tiempo de procesado, mayores emisiones.

En este problema se consideran **diferentes velocidades** en las máquinas, que afectan al tiempo de procesado y las emisiones de CO₂, de forma que, al incrementar la velocidad se reducen el tiempo y aumentan las emisiones. En este caso, se definen 3 velocidades posibles por operación.

Para la resolución del problema, se propone un algoritmo GRASP, modificado con algoritmo de búsqueda local evolucionaria.

Para el caso práctico, se consideran 10 casos propuestos por Lawrence S. (1984), que se modifican para crear un total de 60 que van desde 5 a 10 trabajos. El tiempo de procesado definido en los 10 casos base se asocia a una velocidad. Para las otras dos, el tiempo de procesado se genera aleatoriamente.

▪ **Lei D. y Guo X. (2015).**

El objetivo planteado en este problema es minimizar el *Makespan* y la **huella de carbono**, considerada como una parte proporcional de la energía de procesado y en estado ocioso.

Los trabajadores son considerados como un recurso que hay que asignar a cada máquina y operación, de forma que el tiempo de procesado dependerá de ambos factores. Los trabajadores podrán ser transferidos de una máquina a otra, pero no durante una operación.

En este caso, el resultado será, además de la secuencia, la asignación de recursos (trabajadores).

Para su resolución se desarrolla un algoritmo DNS (*Dynamical Neighborhood Search*, en inglés) basado en la metodología lexicográfica.

Como caso práctico, se usan 24 casos obtenidos de Brandimarte P. (1993) y Dauzere-Perez S. y Paulli J. (1997). Se aplica el algoritmo propuesto y se compara con otros dos, el algoritmo genético y VNS (*Variable Neighborhood Search*).

Como investigación futura se propone estudiar el caso de la programación de la producción en sistemas de fabricación con múltiples fuentes.

- **May G. et al. (2015).**

Se presenta el objetivo múltiple de minimizar el *Makespan*, así como la **energía total consumida**.

En este estudio se van a considerar diferentes estados energéticos de las máquinas, como son: procesado, ocioso, *Setup*, suspendida y la energía de paso entre el estado apagado y suspendido al ocioso. El **estado de suspensión** es un nuevo estado en el que solo algunas funciones de la máquina están activas y la máquina no puede realizar operaciones.

Para la resolución del problema se desarrolla un algoritmo genético, definiendo también unas **políticas de comportamiento** entre los estados apagado-ocioso-suspensión. Para medir el rendimiento del algoritmo se definen dos indicadores a parte del *Makespan*, se trata de la energía total consumida y la energía sin valor (periodos ociosos, de suspensión y de paso entre apagado-suspendido-ocioso)

El caso práctico se basa en el propuesto por Fisher H. y Thompson G.L. (1963), en concreto, se analizan 3 casos de estudio de 6 trabajos y 6 máquinas, 10 trabajos y 10 máquinas y 20 trabajos y 20 máquinas con el tiempo de procesado generados a partir de una distribución uniforme. En un primer momento, se aplica el algoritmo considerando solo el objetivo de tiempo, para posteriormente aplicar simultáneamente ambos objetivos propuestos. Se compara con heurísticas desarrolladas por el software *Lekin* (Pinedo M.L., 2009).

Los resultados muestran cómo se pueden conseguir reducciones de entre 0,5 a 5% en la energía total consumida y de entre 34 y 69% en la energía sin valor.

- **Liu Y. et al. (2015).**

Los autores presentan un sistema *Job Shop* dentro de un entorno de apagones de energías programados, donde algunas empresas usan sistemas privados de energía alternativos basados en el diésel.

Se presenta un modelo tri-objetivo: minimizar la tardanza total ponderada, minimizar la energía total no productiva y minimizar la energía alternativa consumida en periodos de apagón. El modelo energético será el planteado en Liu Y. et al. (2014). El modelado de la energía alternativa consumida en periodos de apagón se basa en suponer que durante los periodos de apagón, el coste de energía es superior a los periodos de no apagón.

También se añade la posibilidad de apagar las máquinas en periodos de espera, basándose en la regla definida en Mouzon G. (2007).

Se desarrolla una heurística de ajuste en el caso de que exista la política de apagones. Se trata de realojar los trabajos planificados durante los periodos de apagones. También se desarrolla un algoritmo genético para resolver el modelo tri-objetivo.

Se considera diferente tiempo de lanzamiento de cada trabajo, así como, diferente fecha de entrega.

Se parte de 4 casos modificados basados en el artículo de otros (Fisher H. y Thompson G.L., 1963; Lawrence S., 1984), que consideran 10 y 10, 15 y 10, 20 y 10, 15 y 15 trabajos y máquinas. Los valores energéticos son deducidos de los estudios de Dahmus J. (2007) y Drake R. et al. (2006).

Para el caso práctico se consideran 3 escenarios: la secuencia original (generada según el algoritmo genético de Liu Y. et al. (2014), incluyéndole la posibilidad de apagar las máquinas); la secuencia ajustada (surge al aplicar el algoritmo diseñado sobre la original considerando la política de apagones); la secuencia con energía privada (surge al aplicar el algoritmo genético tri-objetivo diseñado).

Los resultados muestran cómo se puede conseguir una mejora de los tiempos de entrega de entre el 60 y 70 %, reduciéndose las emisiones generadas por la generación privada de energía.

▪ **Salido M.A. et al. (2015).**

Los autores presentan el estudio del objetivo múltiple de minimizar el *Makespan* y la **energía total consumida**. Estos dos objetivos se agregan de forma ponderada y normalizada.

Se consideran **diferentes velocidades** para las máquinas, lo que tiene su relación con el tiempo de procesado y energía consumida. En este caso, se determinan 3 velocidades para cada operación.

Además, se introduce el término de **robustez** de la secuencia como indicar de la calidad de la misma. Se trata de la capacidad de la secuencia para absorber pequeños problemas, derivados de la incertidumbre en los datos de partida, que puedan afectar a la producción. Para ello, se usa la posibilidad de aumentar la velocidad de las máquinas y los tiempos de espera entre las diferentes operaciones para no ver comprometido el resultado final. La robustez es medida como el porcentaje resultante al someter una secuencia solución a 100 incidencias (retraso de sus tareas) y ver si es capaz de asumirlas.

Se muestra el pseudocódigo que representa el modelo desarrollado para la resolución del problema.

Para el caso práctico se usa una serie de problemas propuestos por Agnetis A. et al. (2010), generados a partir 3 trabajos de 5, 7, 10, 20, 25, 30 operaciones en 3, 5, 7 máquinas y duraciones obtenidas de 4 distribuciones uniformes. El tiempo presente en los casos base se asocia a una velocidad, mientras que el resto de tiempos se calculan basados en unas ecuaciones propuestas. Los datos energéticos referentes a las 3 velocidades también se calculan según ecuaciones propuestas.

Los resultados muestran cómo existe una relación entre robustez y la eficiencia energética (menor energía consumida, mayor robustez) y también entre *Makespan* y robustez (a mayor *Makespan*, mayor robustez).

3.6. Sistemas Flexibles.

La flexibilidad puede ser definida como la capacidad de un sistema de cambiar y asumir diferentes posiciones o estados en respuesta a requisitos cambiantes con una pequeña penalización en tiempo, coste o desempeño.

Un sistema de fabricación flexible (FMS, en inglés) puede ser definido con un sistema integrado de máquinas y equipamiento para el manejo de materiales, controlado por ordenador para el procesado de diferentes pedidos. El objetivo buscado es la eficiencia en costes al fabricar diferentes productos que forman parte de una misma familia, minimizando los *Setups* entre diferentes productos (ElMaraghy H.A., 2005).

Esta flexibilidad puede provenir de diferentes ámbitos: máquinas, manejo de materiales, operaciones, procesos, productos, ruteado de trabajos, volumen de producción, facilidad de expansión, programas de control y capacidad.

Los FMS estudiados se centran en entornos dinámicos con presencia de incertidumbres, que pueden provenir de las máquinas (averías, deprecaciones, desgastes) o de los trabajos (urgencias, cancelaciones, tiempos de procesado estocásticos), incrementando la complejidad del sistema.

Para solventar estas incidencias, se adoptarán diferentes enfoques de resecuenciación:

- Predictivo-Reactivo: se genera la secuencia previamente y se revisa (totalmente o parcialmente) dinámicamente.
- Reactivo: las decisiones son tomadas dinámicamente, un ejemplo de éstas, son las reglas de secuenciación.
- Proactivo: se realiza la secuenciación previa modelando las incidencias, sin posibilidad de modificación dinámica.

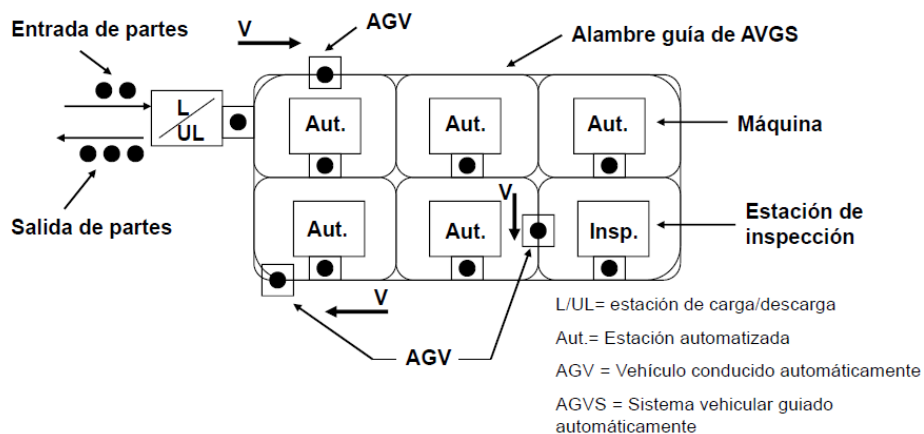


Figura 20: Esquema de FMS, distribución de campo abierto (Eguía I., 2010-2)

▪ **Zhang L. et al. (2013).**

Los autores proponen un modelo multi-objetivo que busca la eficiencia (a través de minimizar el *Makespan* y la tardanza de forma ponderada) y la **energía** consumida, concretamente la energía no empleada en la producción.

La definición de *Makespan* se adapta al entorno dinámico. En este caso se considerará como la diferencia de tiempo entre el inicio y el final de una secuencia de trabajos hasta cierto punto de la secuencia.

Se considerarán dos tipos de interrupciones: las relacionadas con los recursos (averías en las máquinas) y con los trabajos (llegadas de trabajos inesperadas).

Una máquina solo puede procesar un trabajo al mismo tiempo y no se podrá interrumpir el procesado de un trabajo, salvo en el caso de avería. Si una operación es interrumpida por una avería, ésta tendrá que volver a ser procesada desde cero, aunque la energía consumida en la máquina averiada contará dentro del total.

Se consideran diferentes tiempos de entrega de los trabajos.

Se desarrolla un modelo de programación por metas entero cuyas variables de decisión son: si la operación de un determinado trabajo es procesado en una máquina antes que otra operación de otro trabajo; si una determinada máquina es seleccionada para una operación de un trabajo. Para la su resolución en un tiempo razonable, se desarrolla un algoritmo genético.

El caso de estudio se centra en un Job Shop flexible con 6 máquinas y 3 trabajos compuestos de 2 o 3 operaciones, siendo 8 el número total. Cada operación puede ser procesada en 2 o 3 máquinas. El consumo energético no productivo se conoce para cada máquina. Se consideran tres escenarios: un primero sin eventos dinámicos; un segundo con llegada de trabajos aleatoriamente; y un tercero con averías en las máquinas.

Los resultados muestran cómo se consigue una reducción energética notable respetando el objetivo de tiempo.

Como investigación futura, se propone usar otro tipo de modelos matemáticos de programación, así como, estudiar nuevas estrategias de re-secuenciación.

▪ **Le C.V. y Pang C.K. (2013).**

Se presenta el objetivo múltiple de minimizar la tardanza y el **coste energético total** en un **entorno** de trabajo **dinámico** bajo incertidumbres en el consumo energético debido a diversos factores como: estado de las máquinas y herramientas y de la carga de trabajo.

Este sistema flexible tendrá que procesar una serie de trabajos con una secuencia de operaciones conocida, cada una de estas operaciones será procesada en uno de los recursos del sistema. Existirán trabajos que podrán procesarse en más de un recurso y recursos que podrán procesar diferentes trabajos. La asignación de los recursos y creación de rutas de procesado será flexible. No se consideraran tareas de ensamblado y no se permitirá la interrupción de trabajos una vez comenzados. Los recursos pueden ser máquinas, almacenamientos intermedios, brazos robóticos, vehículos automatizados, etc.

Se propone un sistema de control basado en matrices y un marco teórico de secuenciación con recursos compartidos y flexibilidad en las rutas de los productos. El marco teórico se divide en dos módulos: control aumentado de eventos discretos (ADEC, en inglés)

encargado de modelar y controlar los eventos dinámicos; y máximo-rendimiento-mínima-energía (MTME, en inglés), encargado del enfoque de secuenciación reactiva, compuesto por un modelo de programación.

El ADEC usa un sistema matricial booleano que incorpora para cada trabajo: la ruta de procesado, las operaciones y los recursos necesarios. En cada periodo de secuenciación, el ADEC recibe la información matricial de cada trabajo y decide qué operaciones pueden comenzar.

El MTME no busca considerar las incertidumbres a la hora de generar la secuencia, sino que busca una forma efectiva de reaccionar a estas incertidumbres en cada periodo de secuenciación.

El modelo busca minimizar el consumo energético total y la penalización por retraso, la variable de decisión será si una operación de un trabajo es asignada a un recurso determinado. El consumo energético estará definido por una función escalón.

El método propuesto se lanza cada vez que se termine una operación y su flujo será el siguiente: en cada periodo de secuenciación, el ADEC determinará qué operaciones pueden ser propuestas sin generar un colapso en el sistema. Cuando existan múltiples operaciones con múltiples recursos disponibles para llevarse a cabo, el MTME decidirá cuál será la secuenciación más efectiva acorde a los objetivos planteados.

El caso práctico está basado en un caso real de la industria de estampado, los datos energéticos se obtienen al monitorizar una industrial real. El sistema cuenta con 8 máquinas diferentes en consumo y capacidad, así como, 5 sistemas de manejo de materiales. Se consideran dos trabajos a realizar con 7 y 5 operaciones.

El marco de trabajo propuesto se compara con 3 reglas de secuenciación (tiempo de procesado menor primero, menor consumo energético primero, el primero que llega es procesado) y con dos técnicas de resecuenciación parcial y completa basada en una secuencia base generada mediante el método propuesto en (Fang K.T. y Lin B.M.T., 2013). Se usan dos métricas para comparar cada una de las técnicas: el tiempo medio de interrupción, el flujo de producción y la desviación del óptimo de Pareto.

Los resultados muestran cómo el modelo propuesto obtiene menor desviación que las reglas de secuenciación y mucho menor tiempo que los modelos de resecuenciación.

Como investigación futura se propone considerar el *Makespan* como objetivo; considerar minimizar el tiempo de flujo y maximizar el rendimiento, objetivos que presentan un claro *Trade-off* pero que son paradigmas de los sistemas de fabricación flexibles.

- **Pang C.K. y Le C.V. (2014).**

Los mismos autores presentan un avance de su artículo anterior, considerando el problema como no convexo; se aborda de forma distinta, empleando redes de Petri.

El objetivo sigue siendo minimizar la energía de procesado y en estado ocioso en un entorno dinámico.

Las redes de Petri se encuentran fuera del alcance de la programación lineal y metaheurísticas, pero es interesante mencionar el artículo, ya que muestra una forma diferente de abordar los FMS complejos.

Se aplica en el mismo caso práctico descrito en su anterior artículo.

Los resultados muestran una desviación respecto del óptimo del 3% con una reducción del tiempo de computación significativa, en comparación con otros estudios.

- **Le C.V. y Pang C.K. (2014).**

Los mismos autores presentan una variación de su anterior artículo, considerando la energía durante el procesado y en estado ocioso como variables estocásticas.

Como criterio de comparación y medición de la robustez se usa la entropía media de Renyi (https://en.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9nyi_entropy).

El caso práctico estudiado coincide con el expuesto en su anterior artículo.

Los resultados muestran cómo el criterio de medida es muy efectivo, y cómo el método consigue una baja desviación respecto del óptimo (41%) y una reducción del tiempo computacional, en comparación con otros estudios.

- **Pach C. et al. (2014).**

Los autores presentan un problema en el que se busca minimizar el *Makespan* y la **energía total consumida** por las máquinas, considerando el consumo global de las máquinas. Se contempla la posibilidad de **apagar las máquinas** y pasar a **estado de suspensión**, reduciendo su consumo. A parte de los objetivos, se añadirá un nuevo indicador: el número de veces que se encienden/apagan las máquinas.

El problema se enmarca dentro de la personalización en masa, donde la predictibilidad de pedidos es baja. Se empleará un enfoque reactivo, aprovechando las ventanas de tiempo para ahorrar energía. Se busca realizar la asignación de productos a las máquinas de forma dinámica.

Se propone una forma de abordar el problema distinta a la programación matemática, en este caso se usará los **campos potenciales (CP)**, muy usados en el campo de entidades móviles (robots). Las máquinas y productos tendrán asociado un vector.

Con este nuevo enfoque se evita la necesidad de tener una secuencia a priori, la asignación y el ruteado se realizan basándose en los diferentes CP, además, considera la distribución espacial del sistemas de fabricación. El mecanismo es el siguiente, las máquinas emiten un CP que es rastreado por los productos, a su vez, los productos emiten su propio CP que es rastreado por las máquinas. En el caso de que una máquina no esté asignada puede decidir pasar a estado de suspensión o apagarse para ahorrar energía, pero si un producto la selecciona deberá pasar a modo operativo.

El caso práctico se desarrolla en una instalación de carácter pedagógico pero con muchas similitudes con la industrial real (robots, controladores, redes de comunicación,

sistema de transporte automático). Se consideraran un total de 3 productos, que pueden agruparse en pedidos con diferentes cantidades de cada uno, estos pedidos no serán conocidos con antelación. Cada producto tendrá su secuencia de procesado (carga de material, diferentes operaciones de ensamblado, inspección y descarga del producto). El consumo del sistema de transporte será ignorado.

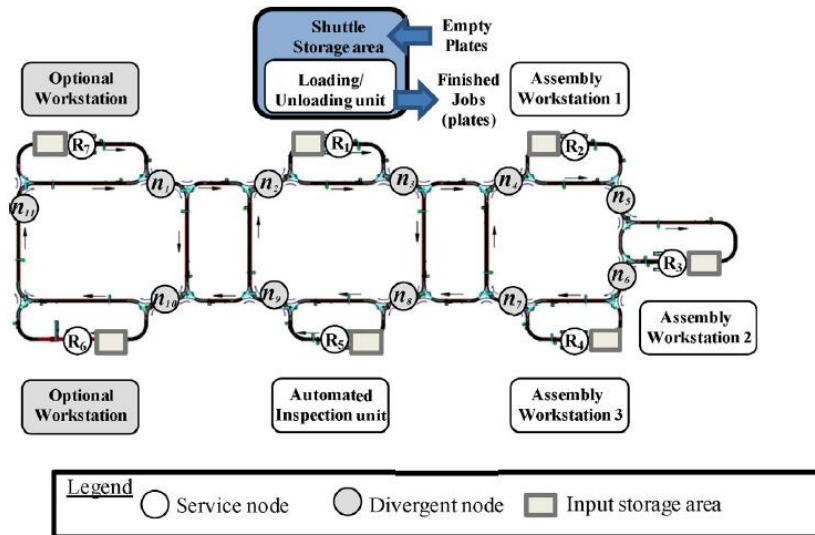


Figura 21: Topología del sistemas usando en el caso práctico (Pach C. et al., 2014)

En primer lugar se realizará una simulación del sistema considerando un lote pequeño de 6 productos para testear el comportamiento del modelo de CP, y en segundo lugar pedidos grandes para sobrecargar el sistema y ver su comportamiento.

Los resultados de la simulación muestran cómo el modelo sirve para controlar y afinar el desempeño de los sistemas de fabricación, que se muestra eficiente para lotes grandes de productos.

Una vez simulado, se prueba en el sistema real donde se contemplan 4 escenarios: sin gestión de la energía y con las máquinas siempre encendidas; se permite el paso de las máquinas al estado de suspensión; se permite pasar a estado suspendido si no se tiene productos en cola; y solamente está permitido un apagado/encendido de las máquinas.

La implementación del modelo en un sistema real validando los resultados obtenidos con la simulación.

Como investigación futura, se proponen varios campos de acción:

- Probar otros escenarios y otros sistemas de fabricación.
- Considerar diferentes velocidades de procesado y diferentes consumos en función de otros parámetros.
- Considerar tiempos de *Setup*.
- Integrar los tiempos de entrega dentro de los objetivos de eficiencia.
- Considerar la energía pico.
- Considerar un enfoque híbrido predictivo-reactivo.

▪ **Choi Y-C. y Xirouchakis P. (2014).**

Se propone un modelo multi-objetivo centrado en minimizar de forma ponderada el rendimiento y el **consumo energético**, en el que se considerarán los consumos de diferentes subsistemas: procesado, manejo de producto y de herramientas, así como sistemas auxiliares, responsables del suministro de refrigerante (fluido de corte) y evacuación de desperdicios (viruta producida en el mecanizado).

El rendimiento es considerado a través del coste de los inventarios entre los diferentes periodos considerados, así como, el coste de no satisfacer un pedido. A través de la minimización de estos dos factores, se considera que se maximiza el rendimiento del sistema.

El artículo se centra en sistemas de fabricación altamente automatizados, que puede producir una gama diferente de productos, a partir de diferentes planes de producción, generados a partir de las diferentes operaciones y máquinas existentes.

Para cada pedido de productos, se dispondrá de un plan de procesado que define las posibles combinaciones de operaciones y máquinas, de forma que, cada plan estará asociado a diferentes consumos totales.

Se presenta un modelo de programación lineal cuya variable de decisión es la cantidad de producto procesado según determinado plan para un periodo dado.

Se estudia un caso práctico del sector industrial del mecanizado, se cuenta con 6 máquinas-herramienta, un sistema de manejo de producto (robot y sistema lanzadera), sistema de transporte de fluido de refrigeración (3 bombas de alta y 3 de baja presión) y de viruta. Se considera una familia de 4 cilindros de motores con 3, 1, 2, 2 planes de procesado respectivamente.

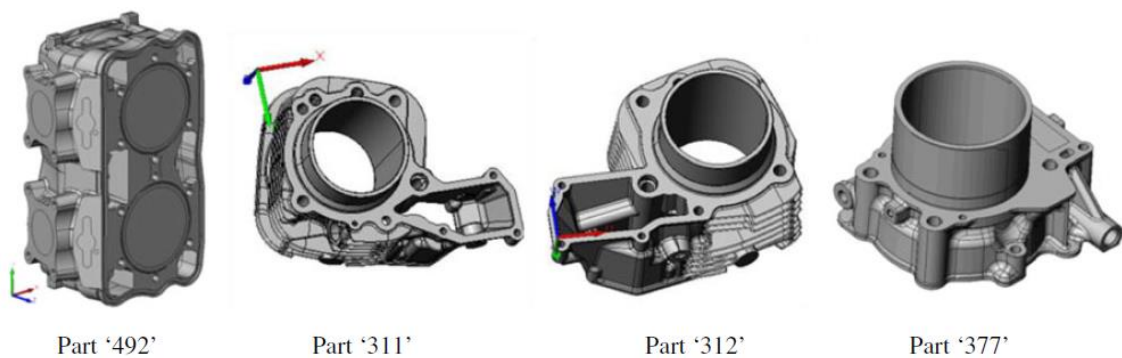


Figura 22: Familia de productos considerados en el caso práctico (Choi Y-C. & Xirouchakis P., 2014)

El modelo se muestra eficiente para hacer un análisis del consumo energético de cada plan, y en base a esto selecciona los de menor consumo.

▪ **Mariano E. et al. (2015).**

Se propone un modelo mono-objetivo de minimizar la **energía total consumida** por las máquinas, considerando el consumo global de cada operación en cada máquina. El objetivo temporal se plantea como restricción ligada a las fechas de entrega.

El problema planteado se encuentra dentro de un contexto de fabricación con máquinas altamente flexibles (automatizadas) y pequeños y medianos lotes con diferente número y tipo de productos y fechas de entrega.

Se consideran dos tipos de máquinas, unas de mayor productividad con un mayor consumo y otras con menor productividad y consumo. Cada trabajo tiene una secuencia de operaciones y éstas tienen su compatibilidad con las máquinas existentes. Cada máquina solo podrá procesar un producto a la vez.

Se presenta un modelo de programación con variables por intervalos [Comienzo, Final] cuya variable de decisión es el intervalo en el que se procesa la operación de un producto dado de un lote dado en una determinada máquina.

En el caso práctico se consideran 3 productos del entorno industrial a procesar con 3 tipos de procesos de fabricación que quedan definidos dentro del vector [cortado, deformado plástico, taladrado], cuyos elementos indican el número total de tareas en cada operación. Cada producto necesitará el siguiente número de operaciones definidas según los vectores [0,6,1], [1,1,1] y [0,7,1]. Se realiza un análisis del caso base y un análisis de sensibilidad sobre la fecha de entrega.

Este problema práctico planteado se podría enmarcar dentro de un *Job Shop* con recirculación.

Los resultados muestran cómo se consigue un ahorro energético si en los procesos que no sean cuellos de botella se usan máquinas de bajo consumo.

Como investigación futura se propone incluir el *Makespan* como segundo objetivo, así como, considerar costes productivos, de equipamiento, operaciones auxiliares y producción de materias primas.

3.7. Sistemas celulares.

En los sistemas de fabricación celulares (CMS, en inglés) se aplica la teoría de la agrupación de tecnologías, que es capaz de mezclar las características de la producción continua y el Job-Shop, de forma que puede darse una mayor respuesta a las necesidades del mercado y superar debilidades tradicionales. Las principales ventajas de usar el CMS son: la reducción de inventarios, del trabajo en proceso, de los movimientos de los productos y la reducción de los tiempos de *Setup* y de procesamiento.

En estos sistemas, los productos son agrupados basándose en sus similitudes (forma, tolerancia y plan de procesado) formando familias. Una célula estará compuesta por diferentes máquinas, siendo la formación de las células el primer paso para diseñar un CMS. El segundo consiste en diseñar el *Layout* para el conjunto de células, buscando minimizar el movimiento entre células.

Es poco frecuente que un producto necesite todas las máquinas de una célula y también es usual que algunos productos tengan que visitar otras células para terminar de ser procesado.

El problema puede ser considerado desde un punto de vista estático y dinámico. En el primero no se considera cambios en la demanda, mientras que en el segundo sí, así como, el coste de reconfiguración y la inversión necesaria para cambiar la célula (Houshyar A.N. et al., 2014).

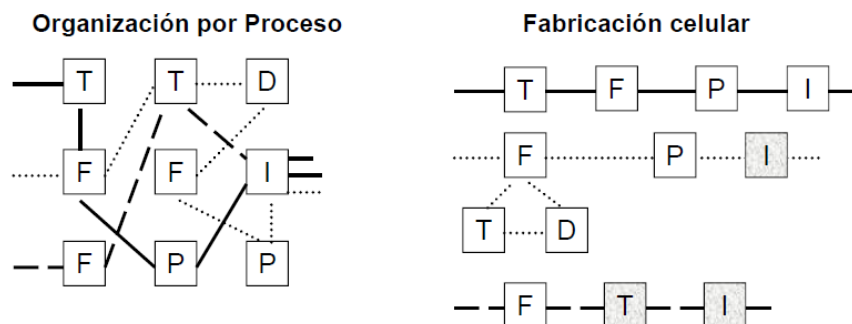


Figura 23: Esquema de los CMS, diferencia entre organización pro proceso y celular (Eguía I., 2010-3)

▪ **Niakan F. et al. (2014-1).**

Los autores estudian la formación dinámica de células considerando criterios económicos y sociales. Se presenta el multi-objetivo de minimizar los costes totales y la maximización de los **aspectos sociales**.

Dentro de los costes totales a minimizar se consideran:

- Costes fijos y variables asociados a las máquinas.
- Coste de movimientos de productos dentro de las células y entre las mismas.
- Coste de adquisición de maquinaria.
- Beneficio por venta de máquinas no usadas (Aparecerá en negativo en la función objetivo, para ser maximizado).

- Coste de reubicación de máquinas.
- Sueldo de los trabajadores contratados.

Dentro de los aspectos sociales a maximizar se consideran:

- Variación de las oportunidades de trabajo, que vendrán determinadas por la contratación o despido de trabajadores, así como, por la compra, venta de máquinas y la capacidad de las mismas.
- Reducción del uso de máquinas con riesgos potenciales, cuantificado a partir de la cantidad de lesiones, enfermedades o daños que son causados por cada máquina. Este dato será definido por un decisor. Aparecerá en negativo en la función objetivo, para ser minimizado.

Se plantea un modelo de programación lineal entero mixto, cuyas variables de decisión son:

- Número de máquinas de determinado tipo, asignadas a una célula al comienzo del periodo.
- Número de máquinas de determinado tipo, añadidas a una célula al comienzo del periodo.
- Número de máquinas de determinado tipo, retiradas a una célula al comienzo del periodo.
- Número de máquinas de determinado tipo compradas al comienzo del periodo.
- Número de máquinas de determinado tipo vendidas al comienzo del periodo.
- Número de trabajadores contratados en un periodo dado.
- Número de trabajadores despedidos en un periodo dado.
- Si una operación de un producto es procesada en una determinada célula durante un periodo dado.

Para resolver este problema, se plantea un algoritmo genético.

Se realizan pruebas computacionales para dos problemas, aunque no se definen sus características, pero se muestran los frentes de Pareto obtenidos de la resolución de ambos.

Los resultados muestran cómo para obtener el máximo del criterio social, es necesario aumentar los costes entre un 60 y 90% según el problema, respecto a la mejor solución encontrada desde el criterio económico.

▪ **Niakan F. et al. (2014-2).**

Los mismos autores amplían su anterior artículo añadiendo un nuevo objetivo, la minimización de la **energía total perdida** por el sistema, de forma que cada máquina tendrá asociado un índice basado en su eficiencia que resumirá la energía perdida media.

En este artículo se realiza una mayor definición del problema estudiado. Se parte de una serie de productos de demanda y secuencia de procesado conocidas, a procesar en un

grupo de máquinas de capacidad definida y cuyos tiempos de procesado son conocidos. Cada tipo de máquina puede realizar diversas operaciones, así como cada producto puede ser procesado en diferentes máquinas.

Se parte del modelo descrito anteriormente al añadirle el objetivo energético, se procede a su linealización. Este nuevo modelo se usa como base para desarrollar un modelo de programación lineal *Fuzzy* y metodología de resolución.

Como caso de estudio se usan dos conjuntos de datos generados aleatoriamente, a continuación se define su configuración:

Tabla 8: Características de los problemas de estudio.

	Operaciones	Productos	Máquinas	Nº Max. Células	Nº Periodos
Problema 1	3	2	4	3	2
Problema 2	4	3	5	5	3

Los resultados del problema 1 muestra cómo un incremento en los costes del 35% lleva a un incremento de los aspectos sociales de un 19% y una reducción de la pérdida de energía del 17%. En el problema 2, un incremento en los costes del 32% lleva a un incremento de los aspectos sociales de un 17% y una reducción de la pérdida de energía del 14%.

▪ **Liu C., Dang F. et al. (2014).**

Se presenta un modelo que busca minimizar el *Makespan* y las **emisiones de carbono**, consideradas como una parte proporcional de la energía total consumida por unidad de producto.

Se presenta un sistema celular en el que cada producto tiene diversas rutas posibles de fabricación. Cada una de esas rutas forma una posible célula para dicho producto. Las decisiones a tomar son la selección de las células para procesar un producto y la cantidad a procesar en cada uno de ellas.

Se establece un límite superior para las emisiones medias de carbono.

Se desarrolla un modelo de programación cuyas variables de decisión son: si una determinada célula es seleccionada para producir un producto dado; y la cantidad de un tipo de producto procesado en una determinada célula. Para resolver el problema se desarrolla un algoritmo genético.

Se presentan diferentes casos prácticos para testear el modelo, en todos ellos se conoce los tiempos de procesado, el consumo, la demanda, la fecha de entrega, y el nivel superior de las emisiones totales de carbono.

El primero se basa en el caso propuesto por He Y. et al., 2012, existen 3 productos en diferentes cantidades (20, 40 y 30 unidades) con diferentes rutas de fabricación para cada uno (3, 2 y 3 células). En este caso solo se permitirá seleccionar una célula por producto.

Un segundo con 4 productos con diferentes cantidades (20, 70, 40 y 30 unidades) y diferentes rutas (2, 7, 5 y 6 células). Y un tercero con 10 productos (20, 70, 40, 30, 20, 30, 20, 30, 40 y 20 unidades) con diferentes rutas posibles (2, 5, 5, 6, 6, 5, 2, 3, 6 y 2 células).

Como investigación futura se propone reducir el número de suposiciones adoptadas en el modelo. En segundo lugar, se propone la consideración del pico de emisiones en lugar de establecer un límite superior. Para terminar, considerar la concurrencia de varios productos en una misma célula.

3.8. Sistemas reconfigurables.

Un sistema reconfigurable de fabricación (RMS, en inglés) está diseñado para un cambio rápido de su estructura para rápidamente ajustar su capacidad y funcionalidad, dentro de una familia de productos, en respuesta a cambios de requerimientos del mercado (ElMaraghy H.A., 2006).

Este enfoque se basa en la posibilidad de ir creando dinámicamente diferentes sistemas de fabricación donde un grupo de máquinas, células, sistema de manejo de materiales, etc., puede ser añadido, modificado, retirado e intercambiado.

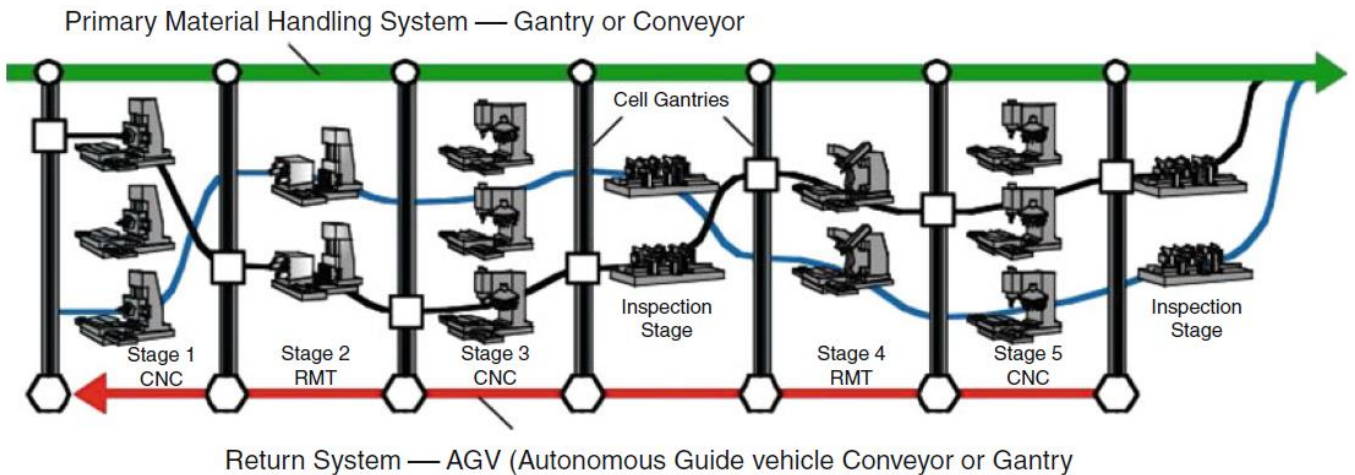


Figura 24: Esquema de los RMS (Koren Y., 2014)

Las características de un RMS son las siguientes (Koren Y. et al., 1999):

- Modularidad, de los componentes del sistema.
- Integrabilidad, para una fácil integración de la tecnología presente y futura.
- Convertibilidad, para permitir cambios rápidos entre productos.
- Diagnosticabilidad, para encuadrar la capacidad y flexibilidad del sistema dentro de las posibles aplicaciones.
- Escalabilidad, para incrementar rápida y económicamente un cambio en la capacidad.

En este punto del trabajo, se han definido números métodos de fabricación con amplias diferencias entre ellos, en la siguiente tabla pueden verse las diferencias entre los mismos (ElMaraghy H.A., 2006):

Tabla 9: Características de los sistemas dedicados, flexibles y reconfigurables.

	Sist. Dedicado	FMS	RMS
Estructura	Fijo	Ajustable	Ajustable
Maquinaria	Fijo	Fija	Ajustable
Enfoque	Producto	Máquina	Familia de productos
Flexibilidad	No	General	Customizado
Escalabilidad	No	Si	Si
Herramientas operando simultáneamente	Si	No	Si
Coste	Bajo	Alto	Intermedio

▪ **Choi Y-C y Xirouchakis P. (2015).**

Estos mismos autores, que aparecen en la sección de FMS, proponen una variante del sistema estudiado con el triple objetivo de maximizar el número de productos por periodo y minimizar el **inventario** entre periodos y la **energía total** consumida, basado en el modelo energético ya presentado.

En su anterior artículo contaban con una célula de fabricación predefinida con 5 máquinas. En este nuevo enfoque, se cuenta con una serie de máquinas-herramienta que deben ser asociadas para crear células en un periodo de tiempo a largo plazo.

Los flujos de fluido de corte y viruta son considerados elementos que afectan al impacto medioambiental. Se observa una relación entre la viruta evacuada y la cantidad de fluido de corte utilizado, a mayor cantidad de viruta, mayor degradación del fluido, por lo que, se establece una restricción para la cantidad de viruta máxima evacuada.

Se plantea un enfoque holístico para la optimización de los sistemas reconfigurables, en un primer lugar, se generan los diferentes planes de procesado posibles para cada trabajo. En un segundo paso, se generan todas las reconfiguraciones posibles del sistema dado, siguiendo el método descrito en Urgo M.L. et al., 2012, que se basa en un modelo estocástico de dos etapas que busca minimizar la inversión y coste operacional del sistema.

Para terminar, se plantea un modelo de programación lineal que analiza y selecciona la reconfiguración más adecuada para cada producto de acorde a los objetivos planteados. Las variables de decisión del modelo son: cantidad producida de un trabajo según un determinado plan por periodo, y la cantidad producida en exceso de un trabajo según un determinado plan por periodo.

Para el caso práctico se considera una familia de 6 cilindros de motores. Se consideran 11 máquinas-herramientas alternativas. Se consideran 8 escenarios posibles a largo plazo: diferentes agrupaciones de productos a producir durante una serie de años.

Como investigación futura, se propone aplicar la metodología en otros sistemas para validar su aplicabilidad, así como, considerar un entorno dinámico de resecuenciación.



Capítulo 4

ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Introducción.

La finalidad de este trabajo es identificar una línea de investigación futura en base a la revisión del estado del arte realizada en el capítulo anterior y que en este capítulo va a ser analizada. Tras extraer las conclusiones pertinentes, las necesidades detectadas se concretarán en una propuesta de estudio, definiendo los objetivos de la misma y la metodología para desarrollarla.

En un primer lugar, para facilitar un acceso más rápido a los artículos, se van a clasificar según el sistema de fabricación que estudien y el objetivo a optimizar. El resultado puede verse en la Tabla 10, dónde los artículos están referenciados según la numeración que tienen en el capítulo de referencias.

Tabla 10: Clasificación de artículos por sistemas y objetivo.

Sistema	ENERGÍA			HUELLA DE CARBONO			ENERGÍA y HUELLA DE CARBONO			OTROS
	- Tardanza	Tiempo Term.	Makespan Tardanza	Tardanza	Tiempo Term.	Makespan	- Tardanza	Makespan	Makespan	
Single Machine	91	74	75, 107	6			62	61		35
Parallel Machine	59		39, 71							
Flow Shop			11, 63 67, 95	5 105		15		109	62	26
Job Shop		64, 65	37, 69 88		45	57, 96 106				
FMS	83, 55	54	82	110	7, 68					
CMS					78	60				77
RMS					8					

4.2. Análisis del estado del arte.

Una vez descritos los artículos de una forma sistematizada, detallando aspectos característicos de cada uno de ellos, se considera necesario un análisis numérico para poder observar conclusiones derivadas de la revisión de una forma más sencilla. Los 41 artículos estudiados se clasifican de la siguiente forma.

▪ Por sistema estudiado.

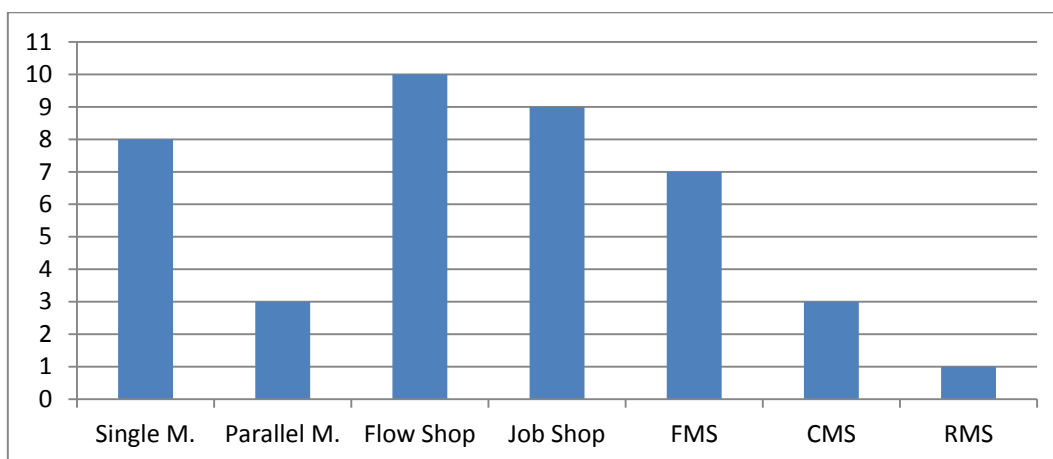


Figura 25: Número de artículos por sistemas de fabricación.

▪ Por año de publicación.

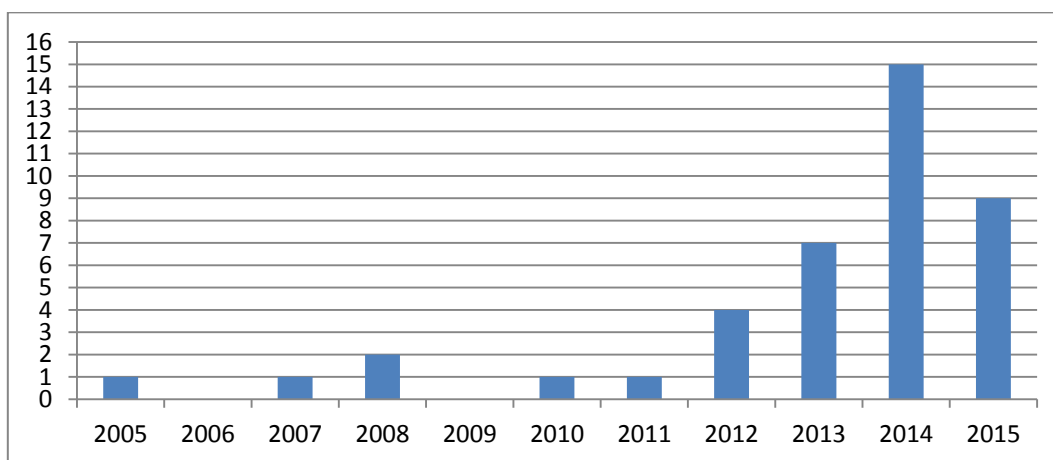


Figura 26: Número de artículos por año de publicación.

▪ **Por objetivo a optimizar.**

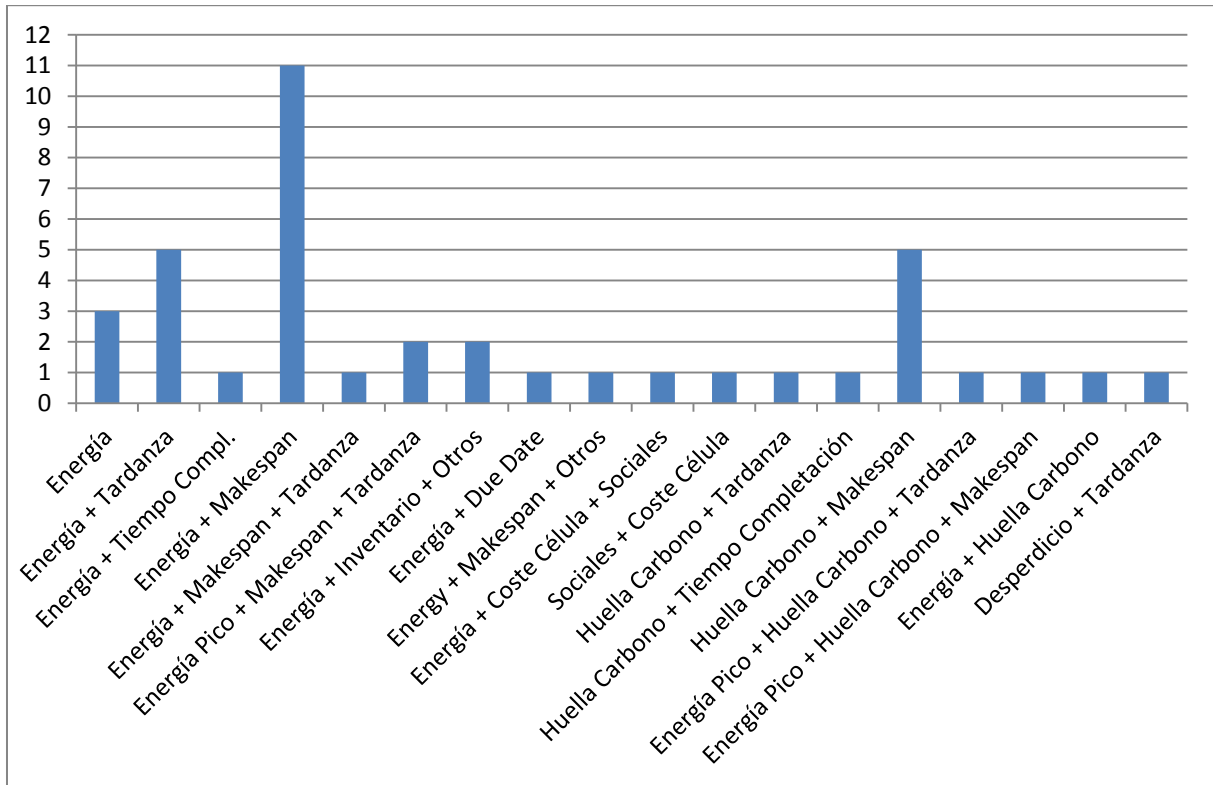


Figura 27: Número de artículos por objetivo.

▪ **Por estrategia empleada.**

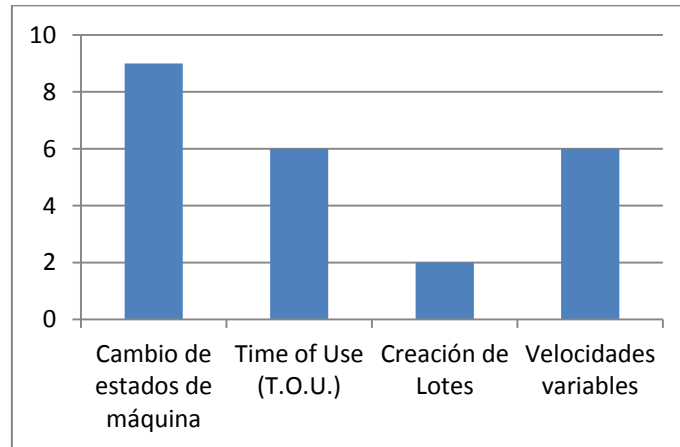


Figura 28: Número de artículos por estrategia empleada.

▪ **Por heurística empleada.**

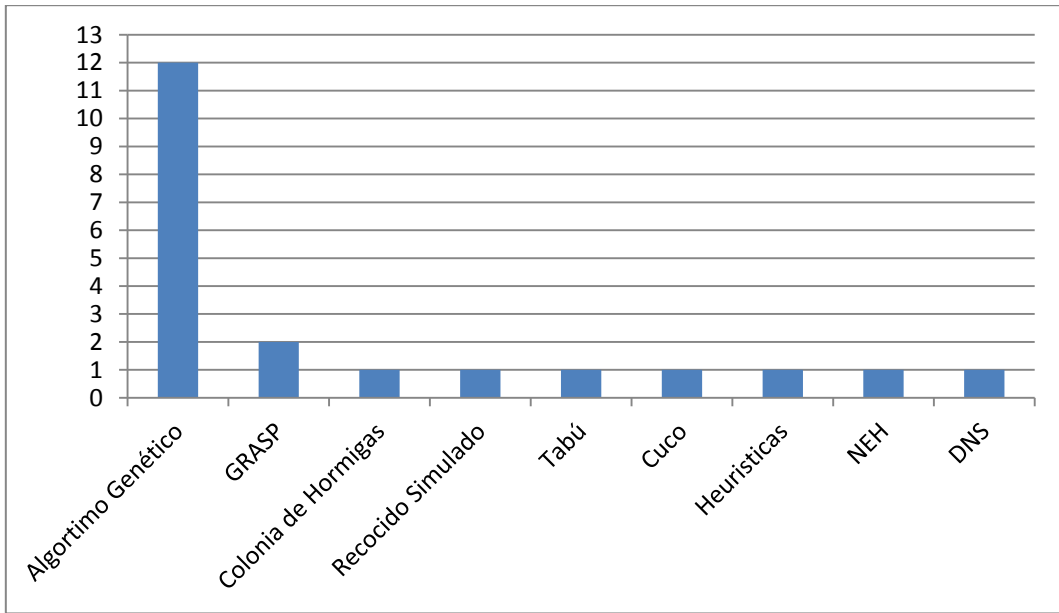


Figura 29: Número de artículos por heurística empleada.

▪ **Por caso de estudio.**

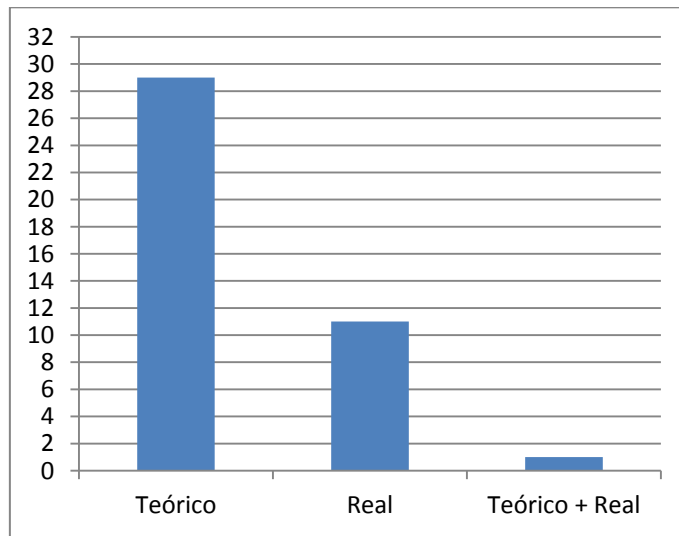


Figura 30: Número de artículos por caso de estudio.

▪ **Por tipo de resultados presentados.**

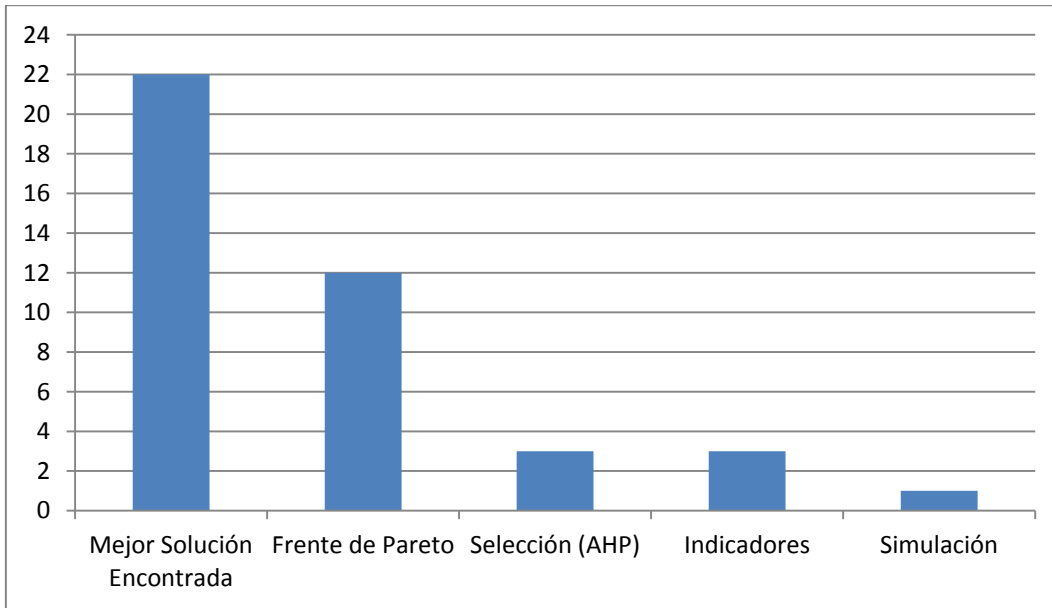


Figura 31: Número de artículos por resultados presentados.

▪ **Por tipo de comparación del método empleado.**

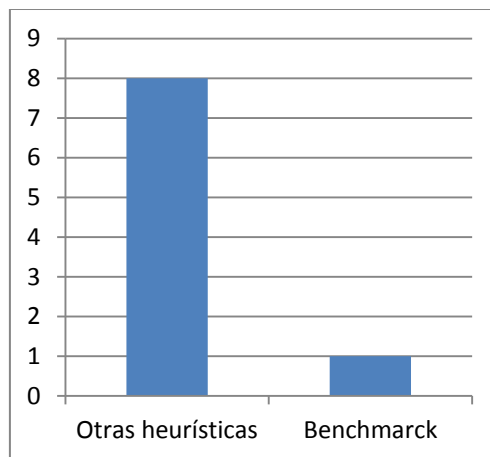


Figura 32: Número de artículos por comparación empleada.

A partir de las gráficas anteriores, se pueden detectar ciertas conclusiones y aspectos a desarrollar:

- Existe **poca investigación** para los sistemas de fabricación avanzados (FMS, CMS y RMS) en comparación con los tradicionales (Figura 25).
- La programación multi-objetivo con criterios sostenibles es un campo de investigación reciente, teniendo su **auge en los últimos 4 años** (Figura 26).
- Dentro de los objetivos de índole económico destaca el *Makespan* y la tardanza; dentro de los medioambientales la energía y la huella de carbono (como parte proporcional de la energía). Los **objetivos sociales** son los menos estudiados, siendo uno de los campos de futura investigación posibles (Figura 27).
- Existen principalmente 4 estrategias empleadas para modificar el comportamiento del sistema. Sería interesante seguir profundizando en el uso combinado de ellas o incluso **desarrollar nuevas** (Figura 28).
- El algoritmo genético es el más aplicado con diferencia para resolver los diferentes problemas planteados. Sería interesante estudiar cómo se comportan **otros algoritmos** (Figura 29).
- Se observa una amplia predominancia de casos de estudio teóricos, generados aleatoriamente o mediante distribuciones estadísticas. Sería interesante realizar observaciones de **casos reales de la industria** y aplicarle las diferentes técnicas observadas (Figura 30).
- En la mayoría de los artículos se presentan los resultados como la mejor solución encontrada o mediante el frente de Pareto de forma aproximada. Pocos son los autores que usan alguna técnica de selección como el AHP. Se ve interesante la incorporación de **técnicas de selección multicriterio** para realizar la selección de las diferentes alternativas generadas (Figura 31).
- Respecto a la forma de analizar los resultados, la mayoría de artículos se centran en conseguir el frente de Pareto, algunos realizan comparaciones con otras metaheurísticas o modelos aplicándolos al mismo caso y solo se realiza en un caso un Benchmark estudiando un caso antiguo. Aquí se detecta otro campo en el que se puede profundizar, aplicando las **nuevas técnicas en casos estudiados** en estos últimos 4 años para demostrar su potencialidad (Figura 32).

4.3. Propuesta de investigación.

Llegado a este punto del trabajo, se han localizado ciertas líneas de investigación futura dentro del campo de la fabricación sostenible, en concreto, en el área de la programación de la producción. Se ha considerado interesante detallar una propuesta de investigación que se apoye en los resultados encontrados.

El objetivo principal de la propuesta de investigación es el diseño, optimización y evaluación de sistemas avanzados de fabricación considerando aspectos económicos,

medioambientales y sociales, que servirá como apoyo a la toma de decisiones para gestores en entornos de fabricación dinámicos.

Los sistemas avanzados de fabricación (AMS en inglés) son aquellos que incorporan herramientas tecnológicas para mejorar los productos y procesos, en concreto, a través del uso de sistemas electrónicos controlados por ordenador para el diseño, fabricación o manejo de un producto. Dentro de este contexto se usan técnicas como el CAD (*Computer-Aided Design*), CAE (*Computer-Aided Engineering*), centro de mecanizado flexibles, robots, vehículos guiados automáticamente, sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados, conectado por un sistema de comunicación que integre la totalidad de la fábrica (OECD, 2015-2).

Algunas de las características de los AMS que los diferencian de los sistemas tradicionales son: el aumento significativo de la velocidad, reducción del coste o del uso de materiales, una precisión de operación mejorada y el uso de materiales compuestos. A esto se le suma la aplicación de las tecnologías de información y comunicación que ayudan a mejorar las fases de diseño, producción, testado, manejo, distribución, y reciclado de productos (HLGKET, 2010).

En el nuevo escenario global al que se enfrentan las empresas de fabricación, la competitividad es un factor clave. Una de las técnicas para mejorarla es la eficiencia, traducida en una mejor utilización tanto de materias primas como de recursos materiales y humanos, que puede ser obtenido a través de la utilización de los AMS.

4.3.1 Objetivos específicos.

El anterior objetivo principal se concretará a partir de los siguientes objetivos específicos:

1. Estado del arte científico-técnico sobre herramientas y metodologías para el diseño, la optimización y la evaluación de sistemas avanzados de fabricación.
2. Estado del arte científico-técnico sobre herramientas y metodologías para la optimización de los recursos y materias primas con criterios sostenibles en sistemas avanzados de fabricación.
3. Estado del arte científico-técnico sobre metodologías exactas y metaheurísticas de optimización multi-objetivo para la programación de la producción en sistemas avanzados de fabricación.
4. Estado del arte científico-técnico sobre métricas y metodologías de evaluación sostenibles de sistemas avanzados de fabricación.
5. Estado del arte científico-técnico sobre la influencia de los parámetros sobre los aspectos medioambientales y sociales en los principales procesos de mecanizado.
6. Diseño de una metodología para la formación de células de fabricación y de familias de productos en sistemas avanzados de fabricación considerando criterios sostenibles: económicos, energéticos, medioambientales y sociales, en un sistema de fabricación en el entorno del mecanizado.

7. Diseño de una metodología para la optimización sostenible de la planificación y programación de sistemas avanzados de fabricación.
8. Diseño de una metodología para la evaluación de las soluciones generadas considerando criterios sostenibles, obteniendo una valoración cuantitativa del desempeño de cada una de ellas que facilite la toma de decisiones.
9. Desarrollo de una herramienta que englobe las metodologías propuestas y testado de las mismas con casos teóricos.
10. Aplicación de la herramienta en un caso real de la industria de mecanizado.

4.3.2 Metodología.

El desarrollo de la propuesta se divide en 6 tareas principales.

- **Estado del arte científico-técnico del estudio.**

El objetivo de esta tarea consistirá en realizar un análisis de la optimización de la producción en sistemas de fabricación desde un punto de vista sostenible, es decir, considerando no sólo aspectos económicos u operativos, sino también desde los puntos de vista energético, medioambiental y social. Se analizarán los métodos y herramientas existentes en la evaluación de impactos energéticos, medioambientales, sociales y económicos de los sistemas de fabricación. También se analizarán las metodologías, guías de actuación y herramientas para el diseño, la planificación y la programación de la producción en sistemas avanzados de producción.

La metodología de trabajo para elaborar el estado del arte científico-técnico consistirá, por un lado, en un análisis exhaustivo de artículos publicados en revistas y congresos de referencia en el contexto de las áreas científico-técnicas involucradas, y por otro, en un análisis de proyectos de I+D+I en los ámbitos europeo y español relacionados con las áreas involucradas. Igualmente, se analizarán las mejores prácticas de empresas y consultoras en este ámbito.

- **Captura de requerimientos de usuarios.**

El objetivo de esta tarea consistirá en identificar potenciales grupos de usuarios (multisectoriales) o de interés en el estudio, y a continuación identificar los requerimientos particulares que sus actividades demandan para el diseño, la planificación y la programación de la producción.

- **Desarrollo de modelos de programación matemática multiobjetivo para el diseño, la planificación y la programación de la producción.**

Una vez adquirida toda la información relevante, en la tercera tarea de este estudio se desarrollarán nuevos modelos de programación matemática que resuelvan de forma eficiente y realistas varios retos de las empresas con sistemas avanzados de fabricación, y que se centran en:

- Diseño de modelos para la formación de células de fabricación y de familias de productos en sistemas avanzados de fabricación considerando aspectos sostenibles.
- Diseño de modelos para la optimización sostenible de la planificación y programación de sistemas avanzados de fabricación.
- Diseño de modelos para la evaluación de las soluciones generadas considerando criterios sostenibles.

Los modelos matemáticos se plantearán como problemas multiobjetivos con asignación a priori de preferencias, en el que se consideran los objetivos tradicionales de reducción de costes y tiempos junto con objetivos adicionales que reducen los consumos energéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero, así como factores sociales. El modelo buscará la solución que proporcione un mejor compromiso entre las diferentes funciones objetivo, satisfaciendo las restricciones del sistema de fabricación.

La formulación del modelo matemático facilita el manejo del problema en su totalidad y forma un puente para el análisis mediante el empleo de técnicas matemáticas y ordenadores de alta capacidad de computación.

Los modelos matemáticos se formularán usando el lenguaje de propósito general C++ y se emplearán paquetes comerciales de programación como el LINGO o CPLEX para su resolución.

- **Resolución de los modelos de programación mediante algoritmos evolutivos.**

Esta tarea consiste en el desarrollo de algoritmos que resuelvan los modelos planteados en la tarea anterior. El tipo de problema es claramente combinatorio y de gran complejidad en su resolución por lo que se propone el desarrollo de metodologías capaces de obtener soluciones de alta calidad en tiempos de computación razonables.

Los Algoritmos Híbridos Evolutivos se están incorporando con fuerza en la resolución de problemas combinatorios complejos con un alto grado en las restricciones del problema. Este tipo de algoritmos se basan en el uso de varios métodos de forma híbrida, que unido a la capacidad de la búsqueda de soluciones en la vecindad de las soluciones mediante el operador de recombinación, mejoran el resultado final. El cómputo evolutivo ha sido utilizado para resolver problemas de optimización más complejos y en la mayoría de casos ha dado mejores resultados que los métodos tradicionales de optimización.

El desarrollo de los nuevos algoritmos híbridos evolutivos para resolver los problemas de optimización multiobjetivos, se realizará en el lenguaje C++.

- **Integración de los algoritmos en una Herramienta de apoyo a la toma de decisiones**

Esta tarea consiste en la integración de la nueva herramienta propuesta para el diseño y gestión de sistemas avanzados de producción con criterios eco-eficientes con los sistemas de información de las empresas (PLM y ERP). Para ello se utilizarán los estándares más recientes de integración, para abordar esta tarea de forma sencilla y eficiente.

La integración de la herramienta con los PLM y ERP habilita a las posibles empresas interesadas a unificar la gestión, mejorar la calidad de la información, permitiendo la visualización de las propuestas eco-eficientes y la comparación entre diferentes alternativas en la solución. La herramienta proporcionará un Panel Dinámico de Indicadores que mostrará indicadores de tipo socio-económico, energético y medioambiental para la evaluación del impacto producido por la implantación de las soluciones propuestas.

▪ **Experimentación del sistema.**

El objetivo de esta tarea se dedica a la validación del sistema en un entorno real. Para tal fin, se llevará una instalación piloto del prototipo en una empresa de mecanizado. A partir de esta instalación, se realizarán una serie de experiencias que permitan validar los distintos elementos desarrollados en el estudio.

4.3.3 Plan de trabajo.

El plan de trabajo propuesto desglosado por tareas y subtareas es el siguiente:

1. Estado del arte científico-técnico del estudio.
 - 1.1. Captura de información, sistemas de gestión y evaluación de costes.
 - 1.2. Evaluación de impactos energéticos y medioambientales.
 - 1.3. Herramientas y metodologías existentes.
2. Captura de requerimientos de usuarios.
 - 2.1. Análisis de Requerimientos de usuarios.
3. Desarrollo de modelos de programación matemática.
 - 3.1. Desarrollo del modelo de diseño celular.
 - 3.2. Desarrollo del modelo de planificación.
 - 3.3. Desarrollo del modelo de programación (*Scheduling*).
 - 3.4. Resolución mediante software de optimización.
 - 3.5. Limitaciones de la resolución óptima.
4. Resolución de los modelos de programación mediante algoritmos evolutivos.
 - 4.1. Diseño del algoritmo evolutivo.
 - 4.2. Desarrollo del algoritmo evolutivo.
 - 4.3. Resolución de problemas mediante algoritmo evolutivo.
5. Integración en los sistemas de información de la empresa.
 - 5.1. Diseño de herramienta integradora del algoritmo.
 - 5.2. Desarrollo de la herramienta de integración.
 - 5.3. Desarrollo de Panel Dinámico de Indicadores.

6. Experimentación del sistema.

6.1. Diseño de escenarios y pruebas.

6.2. Desarrollo de pruebas.

4.3.4 Impacto esperado de los resultados de la propuesta.

Los resultados de la propuesta son de interés tanto para la comunidad científico-técnica sobre los estudios en fabricación sostenible, como para la de responsables de producción por el uso de una herramienta de ayuda a la toma de decisiones en optimización de recursos. El interés viene motivado tanto por la importancia socio-económica del sector Industrial, como por la necesidad de la introducción y desarrollo de criterios de sostenibilidad en el mismo.

El **impacto científico-técnico** esperado de los **resultados de la propuesta** se centra en el creciente interés en las investigaciones sobre el problema de optimización de recursos en sistemas de fabricación considerando aportaciones metodológicas desde el punto de vista de **modelos sostenibles**, puesto de manifiesto en el estado del arte y su análisis expuesto en el presente trabajo. Existe un hueco investigador en este tipo de problemas, donde los criterios socio-económicos tienen también que ser considerados. El **enfoque metodológico multiobjetivo** planteado en esta propuesta es de enorme interés a nivel social y económico pues se consideran de forma ponderada los impactos económicos y sociales en el cálculo de planes y programas de producción.

4.4. Propuesta de caso de estudio.

Para completar la propuesta anteriormente descrita, se ha diseñado un caso de estudio teórico sobre la tarea 3.1 antes expuesta de “Desarrollo de un modelo celular”. En concreto, se propone un sistema celular donde el proceso se aplica en dos pasos de optimización y uno de selección, como se puede ver en la Figura 33:

- En un primer paso, se optimiza el diseño de las células considerando criterios de costes de formación, medioambientales y sociales. Debido a la complejidad del sistema, será necesario emplear técnicas metaheurísticas que generen más de una configuración posible.
- El segundo paso consistirá en realizar la programación de la producción de cada una de las células de trabajo, prestando especial interés a aquellos trabajos que tengan que realizar visitas a otras células. Al igual que en el paso anterior, se generarán diferentes secuenciacines posibles.
- En el último paso, se realiza la toma de decisiones. Con una metodología de selección multicriterio se evaluará los diferentes sistemas generados y se le asignará una valoración numérica a cada uno.

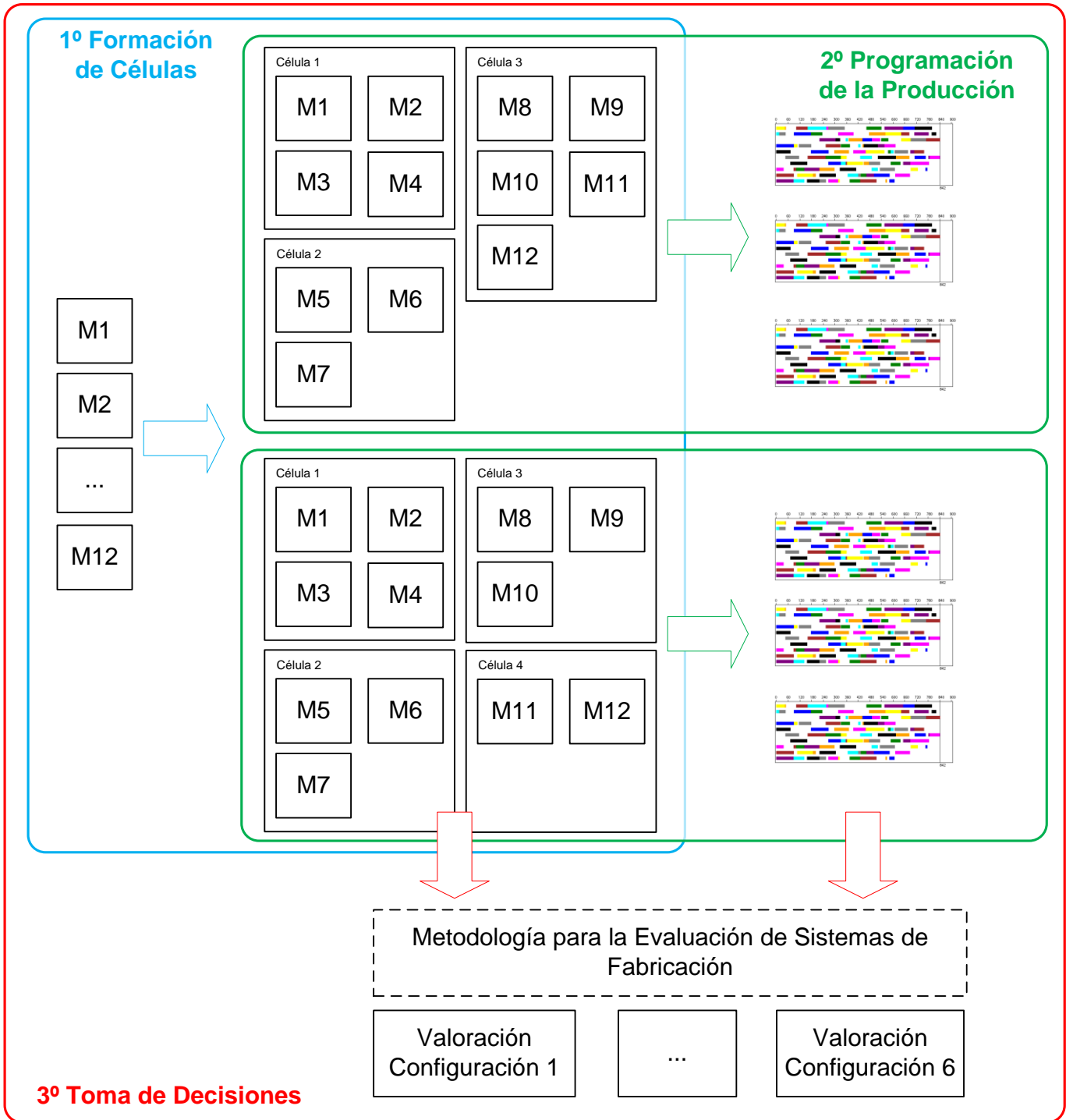


Figura 33: Caso de estudio propuesto, esquema.



Capítulo 5

CONCLUSIONES

La sostenibilidad es un concepto que está en auge y que puede ser aplicado a todos los aspectos de la vida. Partiendo de la definición de desarrollo sostenible se ha hecho un repaso del nuevo paradigma introducido a través de la **fabricación sostenible**, definiendo las principales tendencias, necesidades y aplicaciones observadas.

De entre todas las estrategias expuestas para responder este nuevo paradigma, la amplia mayoría requieren una alta inversión económica para llevarlas a cabo. La **planificación sostenible** destaca por encima del resto debido a tres factores principales: la implementación de planes de fabricación diseñados considerando criterios sostenibles no requieren una gran inversión; se trata de un campo de investigación relativamente nuevo, con mucho potencial, en el que aún existen muchos aspectos por desarrollar; por último, los resultados serían extrapolables fácilmente a cualquiera tipo de industria de producción.

El **reto** presentado se basa en responder a las nuevas necesidades planteadas por las empresas de producción en el marco de un desarrollo sostenible, centrándonos en la planificación y programación de la producción considerando criterios sostenibles.

Para responder a este reto, se ha realizado una **revisión de la literatura** existente sobre el tema. Como se ha visto en el capítulo 3, existe una investigación creciente en los estudios que analiza la optimización de los sistemas de fabricación considerando criterios de sostenibilidad. Los estudios iniciales se han centrado en sistemas más tradicionales y simples (*Single Machine, Job Shop, Flow Shop, etc.*), mientras que los estudios sobre los sistemas avanzados están en una fase de inicio y su potencial sigue siendo amplio. También se puede observar cómo los casos prácticos estudiados son mayoritariamente generados con datos aleatorios, con pocos productos y máquinas, por lo que, la aplicación a casos reales extraídos de la industria es necesaria, así como, la inclusión de los aspectos sociales dentro de los objetivos.

Los aspectos a profundizar detectados tras el análisis han sido plasmados en una **propuesta de estudio** cuyo objetivo es el diseño, optimización y evaluación de sistemas avanzados de fabricación considerando aspectos económicos, medioambientales y sociales, que servirá como apoyo a la toma de decisiones para gestores en entornos de fabricación dinámicos.

Esta propuesta se completa con la descripción de objetivos específicos, metodología a seguir, plan de trabajo detallando las tareas e impacto esperado. Para finalizar se ha planteado una **hipótesis de caso de estudio**, con el fin de clarificar, de una forma práctica, parte de la propuesta.

5.1. Publicaciones.

Como base para la justificación del desarrollo de esta propuesta y para mostrar la profundización en el tema de la sostenibilidad, se adjuntan las referencias de varias publicaciones del autor de este trabajo.

Awanis Romli, Miguel P. De La Pisa, Rossitza Setchi, Paul Prickett, Shwe Soe (2015) *“Eco-Case Based Reasoning (Eco-CBR) for Supporting Sustainable Product Design”* en Second International Conference on Sustainable Design and Manufacturing.

Awanis Romli, Miguel P. De La Pisa, Rossitza Setchi, Paul Prickett (2016). *“Eco-CBR: Integration of Eco-QFD and CBR for Supporting Sustainable Product”* (Pendiente de ser publicado).



Capítulo 6

REFERENCIAS

1. Agnetis, A., Flamini, M., Nicosia, G., & Pacifici, A. (2011). "A job-shop problem with one additional resource type". *Journal of Scheduling*, 14, 225–237.
Doi:10.1007/s10951-010-0162-4
2. Bi, Z. (2011). Revisiting System Paradigms from the Viewpoint of Manufacturing Sustainability. *Sustainability*, 3, 1323–1340. doi:10.3390/su3091323
3. Boulanger, P-M. (2008). "Sustainable development indicators: a scientific challenge, a democratic issue". *Sapiens*, 1, 44–59.
Doi:10.5194/sapiens-1-59-2008
4. Brandimarte, P. (1993). "Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search". *Annals of Operations Research*, 41, 157–183.
Doi:10.1007/BF02023073
5. Bruzzone, A.A.G., Anghinolfi, D., Paolucci, M., & Tonelli, F. (2012). "Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), 459–462.
Doi:10.1016/j.cirp.2012.03.084
6. Cheng, J., Chu, F., Xia, W., Ding, J., & Ling, X. (2014). "Bi-objective optimization for single-machine batch scheduling considering energy cost". *2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 236–241.
Doi:10.1109/CoDIT.2014.6996899
7. Choi, Y.-C., & Xirouchakis, P. (2014). "A production planning in highly automated manufacturing system considering multiple process plans with different energy requirements". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 853–867. Doi:10.1007/s00170-013-5306-1
8. Choi, Y.-C., & Xirouchakis, P. (2015). "A holistic production planning approach in a reconfigurable manufacturing system with energy consumption and environmental effects". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28 (June 2015), 379–394. Doi:10.1080/0951192X.2014.902106
9. Cleantechnica.com. "Renewable Energy & Clean Technology: Keys to a Revitalization of US Manufacturing & Job Creation". Acceso: Noviembre 2015.
<http://cleantechnica.com/2012/04/15/green-manufacturing/>
10. Dahmus, J. (2007). "Applications of industrial ecology: manufacturing, recycling, and efficiency". *THESIS*. Retrieved from <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/39901>
11. Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M.A., & Li, W. D. (2013). "Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 418–429. Doi:10.1016/j.rcim.2013.04.001
12. Dambhare, S.G., Deshmukh, S.J., & Borade, A.B. (2015). "Machining parameter optimization in turning process for sustainable manufacturing". *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6, 327–338. Doi:10.5267/j.ijiec.2015.3.002

13. Dauzère-Pérès, S., & Paulli, J. (1997). "An integrated approach for modeling and solving the general multiprocessor job-shop scheduling problem using tabu search". *Annals of Operations Research*, 70, 281–306. Doi:10.1023/A:1018930406487
14. Deb, K., Member, A., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. doi:10.1109/4235.996017
15. Ding, J.-Y., Song, S., & Wu, C. (2015). "Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization". *European Journal of Operational Research*, 248(3), 758–771. Doi:10.1016/j.ejor.2015.05.019
16. Dornfeld, D., Yuan, C., Diaz, N., Zhang, T., Vijayaraghavan, A. (2013). "Introduction to green manufacturing". *Green Manufacturing: Fundamentals and Applications*, pp. 1-23. Doi: 10.1007/978-1-4419-6016-0_1
17. Drake, R., Yildirim, M. B., Twomey, J. M., Whitman, L. E., Ahmad, J. S., & Lodhia, P. (2006). "Data collection framework on energy consumption in manufacturing". *2006 IIE Annual Conference and Exhibition*, 6 p.
18. Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Kellens, K. (2012). "Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 587–609. Doi:10.1016/j.cirp.2012.05.002
19. EC, European Commission (2004). "Manufuture, a Vision for 2020. Assuring the Future of Manufacturing in Europe".
20. Eguía I. (2010-1). "Introducción a los Sistemas de Fabricación". *Apuntes de la asignatura Sistemas Avanzados de Producción*, Máster Organización Industrial y Gestión de Empresas, Universidad de Sevilla.
21. Eguía I. (2010-2). "Sistemas de Fabricación Flexible (SFF)". *Apuntes de la asignatura Sistemas Avanzados de Producción*, Máster Organización Industrial y Gestión de Empresas, Universidad de Sevilla.
22. Eguía I. (2010-3). "Sistemas de Fabricación Celular (SFC)". *Apuntes de la asignatura Sistemas Avanzados de Producción*, Máster Organización Industrial y Gestión de Empresas, Universidad de Sevilla.
23. Elkington, J., (1997). "Cannibals with Forks: the Triple Bottom Line of 21st Century Business", *Gabriola Island, BC: New Society Publishers*.
24. ElMaraghy, H.A. (2005). "Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*", 17, 261–276. Doi:10.1007/s10696-006-9028-7
25. Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). "Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review". *Omega*, 54, 11–32. Doi:10.1016/j.omega.2015.01.006

26. Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2011). "A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction". *Journal of Manufacturing Systems*, 30(4), 234–240. Doi:10.1016/j.jmsy.2011.08.004
27. Fang, K.-T., & Lin, B. M. T. (2013). "Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost". *Computers & Industrial Engineering*, 64(1), 224–234. Doi:10.1016/j.cie.2012.10.002
28. Feng, S. C., & Joung, C. B. (2009). "An Overview of a Proposed Measurement Infrastructure for Sustainable Manufacturing". *Proceedings of the 7th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 355-360.
29. Fisher, H., Thompson, G.L., 1963. "Probabilistic learning combinations of local jobshop scheduling rules". *Industrial Scheduling*, pp. 225-251.
30. Garetti, M., & Taisch, M. (2012). "Sustainable manufacturing: Trends and research challenges". *Production Planning and Control*, 23 (June 2015), 83–104. Doi:10.1080/09537287.2011.591619
31. Green-manufacturing.blogspot.com.es. "Resource Sustainability and Embedded Costs will Define Future Manufacturing Competitiveness". Acceso: Noviembre 2015. <http://green-manufacturing.blogspot.com.es/2013/08/resource-sustainability-and-embedded.html>.
32. Gunasekaran, A., y Gallear, D. (2012). "Special Issue on Sustainable development of manufacturing and services". *International Journal of Production Economics*, 140, 1–6. Doi:10.1016/j.ijpe.2012.07.005
33. Gunasekaran, A., y Spalanzani, A. (2012). "Sustainability of manufacturing and services: Investigations for research and applications". *International Journal of Production Economics*, 140(1), 35–47. Doi:10.1016/j.ijpe.2011.05.011
34. Haapala K.R., Fu Zhao, Jaime Camelio, John W. Sutherland, Steven J. Skerlos, David A. Dornfeld, I. S. Jawahir, Andres F. Clarens, J. L. R. (2013). "A Review of Engineering Research in Sustainable Manufacturing". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 16. Doi:10.1115/1.4024040
35. Hanoun, S., Nahavandi, S., Creighton, D., & Kull, H. (2012). "Solving a multiobjective job shop scheduling problem using Pareto Archived Cuckoo Search". *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*. Doi:10.1109/ETFA.2012.6489617
36. Hassine, H., Barkallah, M., & Bellacicco, a. (2015). "Multi Objective Optimization for Sustainable Manufacturing, Application in Turning". *International Journal of Simulation Modelling*, 14, 98–109. Doi:10.2507/IJSIMM14(1)9.292
37. He, Y., Liu F., and H. L. C. Cao. (2005). "A Bi-objective Model for Job-shop Scheduling Problem to Minimize Both Energy Consumption and Makespan." *Journal of Central South University of Technology*, 12 (2): 167–171. Doi: 10.1007/s11771-005-0033-x

- 38.He, Y., Liu, B., Zhang, X., Gao, H., & Liu, X. (2012). "A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system". *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 167–174. Doi:10.1016/j.jclepro.2011.10.033
- 39.He, Y., Liu, F. (2010). "Methods for integrating energy consumption and environmental impact considerations into the production operation of machining processes". *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 23 (4), pp. 428-435.
Doi: 10.3901/CJME.2010.04.428
- 40.HLGKET, High Level Group on Key Enabling Technologies, (2010). Thematic Report by the Working Team on Advanced Manufacturing Systems.
- 41.Houshyar, A.N., Leman, Z., Moghadam, H.P., & Sulaiman, R. (2014). "Literature Review on Machine Reliability in Cellular Manufacturing System". *American Journal of Applied Sciences*, 11, 1964–1968. Doi:10.3844/ajassp.2014.1964.1968
- 42.Hu, S., Liu, F., He, Y., & Hu, T. (2012). "An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools". *Journal of Cleaner Production*, 27, 133–140.
Doi:10.1016/j.jclepro.2012.01.013
- 43.Jawahir, I., Badurdeen, F., & Rouch, K. (2013). "Innovation in Sustainable Manufacturing Education". *11th Global Conference in Sustainable Manufacturing*. Gcsm.Eu, 9–16.
- 44.Jayal, a. D., Badurdeen, F., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2010). "Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2, 144–152.
Doi:10.1016/j.cirpj.2010.03.006
- 45.Jiang, Z., Zuo, L., & Mingcheng, E. (2014). "Study on Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem considering Energy Consumption". *Journal of Industrial Engineering and Management*, 7(3), 589–604. Doi: 10.3926/jiem.1075
- 46.Jin, M., Tang, R., & Huisingh, D. (2015). "Call for papers for a special volume on Advanced Manufacturing for Sustainability and Low Fossil Carbon Emissions". *Journal of Cleaner Production*, 87, 7–10. Doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.063
- 47.Joung, C. B., Carrell, J., Sarkar, P., & Feng, S. C. (2013). "Categorization of indicators for sustainable manufacturing". *Ecological Indicators*, 24, 148–157.
Doi:10.1016/j.ecolind.2012.05.030
- 48.Koho, M., Torvinen, S., & Romiguer, A.T. (2011). "Objectives, Enablers and Challenges of Sustainable Development and Sustainable Manufacturing". *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, ISAM*, Art. No. 5942343.
Doi: 10.1109/ISAM.2011.5942343
- 49.Koren Y. (2014). "Reconfigurable Manufacturing". *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Doi:10.1007/978-3-642-20617-7
- 50.Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., & Van Brussel, H. (1999). *Reconfigurable Manufacturing Systems*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48, 527–540. Doi:10.1016/S0007-8506(07)63232-6

51. Labuschagne, C., Brent, A. C., & van Erck, R. P. G. (2005). "Assessing the sustainability performances of industries". *Journal of Cleaner Production*, 13, 373–385.
Doi:10.1016/j.jclepro.2003.10.007
52. Lawrence S. (1984) "Supplement to resource constrained project scheduling: An experimental investigation of heuristic scheduling techniques (supplement)". *Graduate School of Industrial Administration*.
53. LCSP, Lowell Center of Sustainable Production. "What Is Sustainable Production?" <http://www.sustainableproduction.org/about/what.php>. Acceso: Noviembre 2015.
54. Le, C.V., & Pang, C.K. (2013). "Fast reactive scheduling to minimize tardiness penalty and energy cost under power consumption uncertainties". *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 406–417. Doi:10.1016/j.cie.2013.07.006
55. Le, C.V., & Pang, C.K. (2014). "Robust Total Energy Optimization of Flexible Manufacturing Systems Based on Renyi Mean-Entropy Criterion", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1–13. Doi: 10.1109/TASE.2014.2344685
56. Le, C.V., Pang, C.K., Gan, O.P., Chee, X.M., Zhang, D.H., Luo, M., Lewis, F.L. (2012). "Classification of energy consumption patterns for energy audit and machine scheduling in industrial manufacturing systems". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 35(5), 583–592. Doi:10.1177/0142331212460883
57. Lei, D., & Guo, X. (2015). "An effective neighbourhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective". *International Journal of Production Economics*, 159, 296–303. Doi:10.1016/j.ijpe.2014.07.026
58. Li, J., Morrison, J.R., Zhang, M.T., Nakano, M., Biller, S., Lennartson, B. (2013). "Editorial: Automation in green manufacturing". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10 (1), art. no. 6363490, pp. 1-4. Doi: 10.1109/TASE.2012.2227582
59. Li, Z., Yang, H., Zhang, S., & Liu, G. (2015). "Unrelated parallel machine scheduling problem with energy and tardiness cost". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14p. Doi:10.1007/s00170-015-7657-2
60. Liu, C., Dang, F., Li, W., Lian, J., Evans, S., & Yin, Y. (2014). "Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures". *Journal of Cleaner Production*, 105, pp. 285-289. Doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.033
61. Liu, C., Yang, J., Lian, J., Li, W., Evans, S., & Yin, Y. (2014). "Sustainable performance oriented operational decision-making of single machine systems with deterministic product arrival timdinge". *Journal of Cleaner Production*, 85, 318–330.
Doi:10.1016/j.jclepro.2014.07.025
62. Liu, C-H., & Huang, D-H. (2014). "Reduction of power consumption and carbon footprints by applying multi-objective optimisation via genetic algorithms". *International Journal of Production Research*, 52(May 2015), 337–352. Doi:10.1080/00207543.2013.825740
63. Liu, X., Zou, F., & Zhang, X. (2008). "Mathematical model and genetic optimization for hybrid flow shop scheduling problem based on energy consumption". *Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008*. 1002–1007.

64. Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., & Petrovic, S. (2015). "Reducing environmental impact of production during a Rolling Blackout policy – A multi-objective schedule optimisation approach". *Journal of Cleaner Production*, 102, 418–427.
Doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.038
65. Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., & Gindy, N. (2014). "An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops". *Journal of Cleaner Production*, 65, 87–96. Doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.060
66. Lu, T., Gupta, A., Jayal, A.D., Badurdeen, F., Feng, S.C., Dillon, O.W., & Jawahir, I.S. (2011). "Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing". *Springer Berlin Heidelberg*. Doi:10.1007/978-3-642-20183-7
67. Luo, H., Du, B., Huang, G. Q., Chen, H., & Li, X. (2013). "Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost". *International Journal of Production Economics*, 146(2), 423–439. doi:10.1016/j.ijpe.2013.01.028
68. Mariano, E., Nucci, F., Prete, A. Del, & Grieco, A. (2015). "Minimization of Energy Consumptions by Means of an Intelligent Production Scheduling", 639, 525–532. Doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.639.525
69. May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Prabhu, V. (2015). "Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling". *International Journal of Production Research*, (March), 1–19. Doi:10.1080/00207543.2015.1005248
70. Mihelcic, J. R., Crittenden, J. C., Small, M. J., Shonnard, D. R., Hokanson, D. R., Zhang, Q., Schnoor, J. L. (2003). "Sustainability science and engineering: the emergence of a new metadiscipline". *Environmental Science & Technology*, 37(23), 5314–5324. Doi:10.1021/es034605h
71. Moon, J. Y., Shin, K., & Park, J. (2013). "Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 523–535. Doi:10.1007/s00170-013-4749-8
72. Moss, M. L., & Grunkemeyer, W. T. (2007). "Using Resident Formulated Multi-Dimensional Indicators to Assess Urban Communities ' Progress Toward Meeting Sustainability Goals". *International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its Assessment, 2007*.
73. Mouzon, G. (2008). "Operational methods and models for minimization of energy consumption in a manufacturing environment". *THESIS*. Retrieved from: <http://soar.wichita.edu/handle/10057/1954>
74. Mouzon, G., & Yildirim, M. B. (2008). "A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine". *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(May 2015), 105–116. Doi:10.1080/19397030802257236
75. Mouzon, G., Yildirim, M. B., & Twomey, J. (2007). "Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment". *International Journal of Production Research*, 45(June 2015), 4247–4271. Doi:10.1080/00207540701450013

- 76.NACFAM, National Council for Advanced Manufacturing. "Sustainable Manufacturing". <http://www.nacfam.org/PolicyInitiatives/SustainableManufacturing/tabid/64/Default.aspx>. Acceso: Noviembre 2015.
- 77.Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., Botta-Genoulaz, V. (2014-1). "A Multi-objective Mathematical Model Considering Economic and Social Criteria in Dynamic Cell Formation". *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 439 (PART 2), pp. 46-53. Doi: 10.1007/978-3-662-44736-9_6
- 78.Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., Botta-Genoulaz, V (2014-2). "A new multi-objective mathematical model for dynamic cell formation considering sustainability criteria". *CIE 2014 - 44th International Conference on Computers and Industrial Engineering and IMSS 2014 - 9th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems, Joint International Symposium on "The Social Impacts of Developments in Information, Manufacturing and Service Systems"* - Proceedings, pp. 464-478.
- 79.OCDE-1, Organization for Economic Cooperation and Development. "Sustainable Development Indicator". *Glosary of Statistical Terms*. Acceso: Noviembre 2015. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=6586>.
- 80.OCDE-2, Organization for Economic Cooperation and Development. "Advanced Manufacturing Technology". *Glosary of Statistical Terms*. Acceso: Noviembre 2015. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=52>.
- 81.OECD – Organisation for Economic Cooperation and Development (2002). "An Update of the OECD Composite Leading Indicators".
- 82.Pach, C., Berger, T., Sallez, Y., Bonte, T., Adam, E., & Trentesaux, D. (2014). "Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields". *Computers in Industry*, 65, 434–448. Doi:10.1016/j.compind.2013.11.008
- 83.Pang, C. K., & Le, C. V. (2014). "Optimization of total energy consumption in flexible manufacturing systems using weighted P-timed petri nets and dynamic programming". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(4), 1083–1096. Doi:10.1109/TASE.2013.2265917
- 84.Pinedo, M.L., 2009. "Planning and Scheduling in Manufacturing and Services". *Springer*.
- 85.Rachuri, S., Sriram, R.D., Narayanan, A., Sarkar, P., Lee, J.H., Lyons, K. W., & Kemmerer, S. J. (2010). "Sustainable Manufacturing: Metrics, Standards, and Infrastructure - Workshop summary". *2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, CASE 2010*, 144–149. Doi:10.1109/COASE.2010.5584472
- 86.Romli, A., Prickett, P., Setchi, R., Shoe, S. (2014). "A conceptual model for sustainable product design". *Key Engineering Materials*, 572 (1), pp. 3-6. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.3
- 87.Rosen, M. a., & Kishawy, H. a. (2012). "Sustainable manufacturing and design: Concepts, practices and needs". *Sustainability*, 4, 154–174. Doi:10.3390/su4020154

88. Salido, M. a., Escamilla, J., Barber, F., Giret, A., Tang, D., & Dai, M. (2015). "Energy efficiency, robustness, and makespan optimality in job-shop scheduling problems". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 1–13. Doi:10.1017/S0890060415000335
89. Setchi, R., Liu, Y., & Li, W. (2015). "Editorial for the special issue of decision support for sustainable design and manufacturing". *Journal of Industrial and Production Engineering*, 32(July), 1–2. Doi:10.1080/21681015.2014.1000404
90. Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, a. K. (2012). "An overview of sustainability assessment methodologies". *Ecological Indicators*, 15(1), 281–299. Doi:10.1016/j.ecolind.2011.01.007
91. Shrouf, F., Ordieres-Meré, J., García-Sánchez, A., & Ortega-Mier, M. (2014). "Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs". *Journal of Cleaner Production*, 67, 197–207. Doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.024
92. Sustainablemeasures.com (1). "What is an indicator of sustainability?". Acceso: Noviembre 2015. <http://sustainablemeasures.com/node/92>.
93. Sustainablemeasures.com (2). "Characteristics of effective indicators". Acceso: Noviembre 2015. <http://sustainablemeasures.com/node/90>.
94. Sustainablemeasures.com (3). "Traditional vs. sustainability indicators". Acceso: Noviembre 2015. <http://sustainablemeasures.com/node/89>.
95. Tan, Y., Huang, Y., & Liu, S. (2013). "Two-Stage Mathematical Programming Approach for Steelmaking Process Scheduling Under Variable Electricity Price". *Journal of Iron and Steel Research, International*, 20(7), 1–8. Doi:10.1016/S1006-706X(13)60118-1
96. Tchomte, S. K., & Tchernev, N. (2014). "A GRASPxELS for Scheduling of Job-Shop Like Manufacturing Systems and CO2 Emission Reduction Job Shop with Different Speed Machine", *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*, pp. 130–137. Doi: 10.1007/978-3-662-44736-9_16
97. Trentesaux, D., Prabhu, V. (2014). "Sustainability in Manufacturing Operations Scheduling: Stakes, Approaches and Trends". *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 439 (PART 2), pp. 106-113. Doi: 10.1007/978-3-662-44736-9_13
98. UNCED, United Nations Conference on Environment & Development (1992). Rio de Janeiro, Brazil, 3 to 14 June 1992. Reproduction, (June), 351. Doi:10.1007/s11671-008-9208-3
99. UNEP, United Nations Environment Programme. Basics of Cleaner Production, session 2. www.unep.es. Acceso: Noviembre 2015.
100. UNCSO, United Nations Commission on Sustainable Development (2001). "Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies".

101. Urgo, M., L. Calegari, S. Dierssen, G. Fogliazza, K. Uffmann, A.Valente, and J. Zulaika Muniain. 2012. "Report on Holistic Digital Tools for the Design of Dematerialised Manufacturing System – Task 3.2 Deliverable D3.2." Technical Report-WP3-T3.2 in *Dematerialised Manufacturing System: A New Way to Design, Build, Use and Sell European Machine Tools (DEMAT)*.
102. USDOC, U.S. Department of Commerce. "How does Commerce define Sustainable Manufacturing?," Acceso: Noviembre 2015.
http://www.trade.gov/competitiveness/sustainablemanufacturing/how_doc_defines_S M.asp,
103. Vimal, K. E. K., Vinodha, S., & Muralidharan, R. (2015). "An approach for evaluation of process sustainability using multi-grade fuzzy method". *International Journal of Sustainable Engineering*, 8(April), 40–54. doi:10.1080/19397038.2014.912254
104. WCED, World Commission on Environment and Development (1987). "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (The Brundtland Report)". *Medicine, Conflict and Survival*, 4, 300. Doi:10.1080/07488008808408783
105. Xu, F., Weng, W., & Fujimura, S. (2014). "Energy-Efficient Scheduling for Flexible Flow Shops by Using MIP". *IIE Annual Conference and Expo 2014*, pp. 1040-1048.
106. Yi, Q., Li, C., Tang, Y., & Wang, Q. (2012). "A new operational framework to job shop scheduling for reducing carbon emissions". *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 58–63. Doi:10.1109/CoASE.2012.6386372
107. Yildirim, M. B., y Mouzon, G. (2012). "Single-machine sustainable production planning to minimize total energy consumption and total completion time using a multiple objective genetic algorithm". *IEEE Transactions on Engineering Management*, 59(4), 585–597. Doi:10.1109/TEM.2011.2171055
108. Zhang, H., y Haapala, K. R. (2014). "Integrating sustainable manufacturing assessment into decision making for a production work cell". *Journal of Cleaner Production*. Doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.038
109. Zhang, H., Zhao, F., Fang, K., & Sutherland, J. W. (2014). "Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(1), 37–40. Doi:10.1016/j.cirp.2014.03.011
110. Zhang, L., Li, X., Gao, L., & Zhang, G. (2013). "Dynamic rescheduling in FMS that is simultaneously considering energy consumption and schedule efficiency". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–13. Doi:10.1007/s00170-013-4867-3
111. Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm". *Evolutionary Methods for Design Optimization and Control with Applications to Industrial Problems*, 95–100. doi:10.1.1.28.7571