



**SISTEMA DE CONTROL RECONFIGURABLE Y SOSTENIBLE PARA
APLICACIÓN EN SISTEMAS DE MANUFACTURA FLEXIBLES**

María Teresa Días Lares

**Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Unidad de Posgrados
Bogotá-Colombia**

2019

SISTEMA DE CONTROL RECONFIGURABLE Y SOSTENIBLE PARA APLICACIÓN EN SISTEMAS DE MANUFACTURA FLEXIBLES

María Teresa Días Lares

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial

Director
Ing. Jose Fernando Jimenez Gordillo, PhD.

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Unidad de Posgrados
Bogotá-Colombia

2019

DEDICATORIA

A la Pontificia Universidad Javeriana,
A Jose Fernando,
A María Teresa, María Gabriela y Guillermo

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	1
1. Planteamiento del problema:	1
1.1 Antecedentes:	1
1.2 Justificación de la investigación:	8
1.3 Coherencia con temáticas de la maestría:	10
2. Objetivo general:	10
3. Objetivos específicos:	11
4. Métodos y metodología empleadas (limitaciones y supuestos):	11
CAPÍTULO I	13
REVISIÓN DE LA LITERATURA	13
1.1 Introducción:	13
1.2 Revisión sistemática:	14
1.2.1 Identificación de artículos:	15
1.2.2 Criterios de inclusión y exclusión:	16
1.2.3 Selección de artículos:	16
1.2.4 Análisis de calidad:	17
1.2.5 Extracción de artículos:	17
1.2.6 Compilación de artículos:	17
1.3 Temáticas:	22
1.3.1 Sostenibilidad:	22
1.3.2 Reconfiguración:	25
1.3.3 Sostenibilidad y reconfiguración:	30
1.4 Resumen:	32
CAPÍTULO II	33
PROPUESTA DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL SOSTENIBLE	33

2.1	Introducción:	33
2.2	Pollux: descripción y especificaciones:.....	34
2.3	Sistema de control reconfigurable y sostenible:	37
2.3.1	Descripción:	37
2.3.2	Arquitectura de control:.....	38
2.3.3	Mecanismo de reconfiguración:.....	47
2.4	Resumen:	51
CAPÍTULO III		52
CASO DE ESTUDIO		52
3.1	Introducción:	52
3.2	Sistemas flexibles de manufactura (FMS):	53
3.2.1	Flexible Job Shop Problem (FJSP):	53
3.2.2	Caso de estudio:	55
3.3	Particularización del caso de estudio en propuesta:.....	61
3.3.1	Capa de coordinación:	63
3.3.2	Capa de operación:.....	67
3.3.3	Reconfiguración:	71
3.4	Escenarios:.....	75
CAPÍTULO IV		77
VALIDACIÓN DE RESULTADOS		77
4.1	Introducción:	77
4.2	Modelo predictivo:	77
4.3	Modelo reactivo:	83
4.4	Modelo predictivo-reactivo:.....	86
4.5	Modelo reconfigurado:	89
4.6	Comparación:	91
4.7	Resumen:	95
CAPÍTULO V		96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		96
5.1	Introducción:	96
5.2	Conclusiones y perspectivas de investigación:.....	96

GLOSARIO	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXO 1	109
ANEXO 2	115
ANEXO 3	120
ANEXO 4	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ambiente de un sistema de control.....	2
Figura 2. Componentes de un sistema de control.....	3
Figura 3. Tipos de estructuras en sistemas de control.....	4
Figura 4. Diagrama de la revisión sistemática.....	15
Figura 5. Tres dimensiones de la sostenibilidad (TBL).....	23
Figura 6. Tipos de cambios en la reconfiguración de un sistema.....	29
Figura 7. Proceso de cambio de configuración de una arquitectura.....	35
Figura 8. Sistema de control reconfigurable basado en Pollux.....	38
Figura 9. Componentes de una entidad decisional.....	39
Figura 10. Proceso de una entidad decisional.....	40
Figura 11. Definición de comportamiento y estructura según parámetros de gobernabilidad.....	43
Figura 12. Definición de modo de operación según parámetros de gobernabilidad.....	45
Figura 13. Dinamismo de la arquitectura de control.....	46
Figura 14. Mecanismo de reconfiguración y su interacción con la arquitectura de control.....	48
Figura 15. Proceso del mecanismo de reconfiguración.....	49
Figura 16. Sistema flexible de manufactura.....	54
Figura 17. Representación del sistema flexible de manufactura AIP-PRIMECA.....	56
Figura 18. a) Componentes y productos y b) Ejemplo operaciones producto P.....	58
Figura 19. Sistema de control propuesto.....	62
Figura 20. Caracterización de las EDG.....	63
Figura 21. Variables de decisión de búsqueda local.....	66
Figura 22. Caracterización de las EDL y EDR.....	68
Figura 23. Condición de intención <i>PF</i>	70

Figura 24. Implementación mecanismo de reconfiguración.	72
Figura 25. Cambio de modos de operación tomando como referencia 1 EDG, 2 EDL y 2 EDR.....	74
Figura 26. Representación de reconfiguración a través de algoritmo voraz.....	74
Figura 27. Arquitectura inicial y final según enfoque.	76
Figura 28. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados con distribución Bernoulli 30,70 y simulación de 35 productos.	78
Figura 29. Resultados modelo predictivo.	79
Figura 30. Valores dupla tiempo y energía.....	80
Figura 31. Resultados modelo predictivo con perturbación.....	82
Figura 32. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados de atracción e intención y simulación de 70 productos.	84
Figura 33. Resultados modelo reactivo.....	85
Figura 34. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados de perturbación en 20% y simulación de 35 productos.	87
Figura 35. Resultados modelo predictivo-reactivo.	88
Figura 36. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados de perturbación en 80% y simulación de 140 productos.	90
Figura 37. Comparación de C_{max} escenario 70 productos.	92
Figura 38. Comparación de C_{max} escenario 140 productos.	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de evaluación de artículos.	18
Tabla 2. Compilación de artículos por área.	19
Tabla 2. Compilación de artículos por área (cont).	20
Tabla 2. Compilación de artículos por área (cont).	21
Tabla 3. Características principales de un RMS.	26
Tabla 4. Descripción breve del modelo matemático de <i>FJSP</i>	55
Tabla 5. Recursos disponibles del FMS a implementar.	57
Tabla 6. Secuencia de operaciones por producto en orden descendente.	59
Tabla 7. Tiempos de procesamiento de operación en máquina (segundos).	59
Tabla 8. Tiempos de transporte entre nodos y máquinas (segundos).	60
Tabla 9. Suposiciones del caso de estudio.	61
Tabla 10. Modelos de control a evaluar.	75
Tabla 11. Resultados modelo reconfigurado.	91
Tabla 12. Comparación de resultados.	94

RESUMEN

Dado el continuo y acelerado crecimiento de la economía global, la producción mundial se ha visto afectada por un incremento significativo de recursos y energía. Este incremento ha traído diversos avances tecnológicos y digitales en el sector industrial que han evolucionado el área de sistemas de control reconfigurables. Específicamente, esta nueva tecnología ha surgido para dar respuesta a la volatilidad de sistemas de manufactura y satisfacer niveles adecuados de efectividad y reactividad. Sin embargo, los sistemas enfrentan el reto de generar un balance entre sus indicadores. En las últimas décadas, se ha visto la necesidad de incluir la sostenibilidad como una nueva métrica de eficiencia para los sistemas de manufactura. Igualmente, existe la necesidad mundial de incorporar la sostenibilidad en las operaciones industriales y se evidencia una falta de estudios en la integración entre productividad y sostenibilidad. Por esta razón, este trabajo de investigación propone un sistema de control con una arquitectura que hace el balance de eficiencia y efectividad entre indicadores de productividad y sostenibilidad. Dicho sistema propuesto consta de una arquitectura compuesta por distintos tipos de entidades. Así mismo, la propuesta también incluye un mecanismo de reconfiguración compuesto por tres módulos. Para mostrar los beneficios del sistema propuesto, se presenta la validación mediante la realización de experimentos en un ambiente simulado haciendo uso del software basado en agentes denominado Netlogo. Se evalúa la aplicación en un sistema de manufactura real ubicado en Francia. Como resultados, se evidencia que sí es posible integrar eficiencia y efectividad en un sistema de control. Esto mejora el desempeño de la energía hasta en un 69% y el del tiempo en 30%.

Palabras clave: sostenibilidad, reconfiguración, eficiencia, efectividad, productividad, reactividad, sistemas flexibles de manufactura, arquitectura de control, eventos disruptivos.

INTRODUCCIÓN

PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1. Planteamiento del problema:

1.1 Antecedentes:

La economía global ha crecido a un ritmo acelerado marcada por una creciente producción mundial. Este período de expansión coincide con la aparición y difusión significativa de las tecnologías de información y comunicación, ICTs (por sus siglas en inglés). Sus aplicaciones hacen que se cambien tanto el pensamiento de las personas como su comportamiento, comunicación y forma de generar conocimiento. Como ejemplo, existen cientos de nuevas tecnologías que hacen parte de esta revolución tecnológica, como lo son: *Cyber-Physical Systems (CPS)*, *Big data analytics (BDA)*, *Internet of things (IoT)*, *cloud computing*, entre otras. Las ICTs hacen parte de una nueva revolución tecnológica o digital que consiste en un “grupo de tecnologías sólidas y dinámicas, donde productos e industrias se pueden llevar al crecimiento sostenido y al desarrollo a largo plazo” (Radziewska, 2016). Así mismo, el mismo autor establece que “estas tecnologías representan un gran avance que asegura un potencial en la productividad de casi todas las actividades económicas”. Por otra parte, Jimenez (2017) plantea que “las próximas generaciones se van a enfrentar a mayores retos en la

complejidad de los sistemas de manufactura, logística, operaciones y sistemas sociales dados los nuevos requerimientos globales en términos de sostenibilidad y productividad”.

Por otra parte, “el rápido crecimiento en tecnología, así como las necesidades industriales de hoy, han hecho que exista una evolución en las arquitecturas de los sistemas de control” (Dilts, Boyd and Whorms, 1991). De hecho, “un gran número de investigadores entienden que los sistemas de control deben proporcionar soluciones satisfactorias, robustas y adaptables en vez de soluciones basadas en modelos de optimización que asumen gran parte de sus parámetros y decisiones”. (Trentesaux, 2009). Por esta razón, los sistemas de control se consideran una de las principales estrategias con las que se puede manejar la denominada revolución tecnológica. En consecuencia, se pueden tener mejores resultados en distintas ramas industriales. Siendo así, para este trabajo de investigación un sistema de control se define como “un arreglo de componentes y métodos que gestionan el comportamiento de otro sistema” (Jimenez, 2017). La Figura 1 ilustra el concepto de control, que se refiere a “la definición y organización de un ciclo con realimentación y su interacción entre dos sistemas” (Trentesaux, 2002):

Sistema controlado/físico: primer subsistema con un propósito definido que es manejado y guiado para alcanzar su propia meta.

Sistema de control: segundo subsistema como una interconexión entre componentes con el objetivo general de influenciar el comportamiento del sistema controlado de la manera en la que se desee. Suele manejar indicadores internos para regular el sistema como eficacia, eficiencia, reactividad y sostenibilidad.

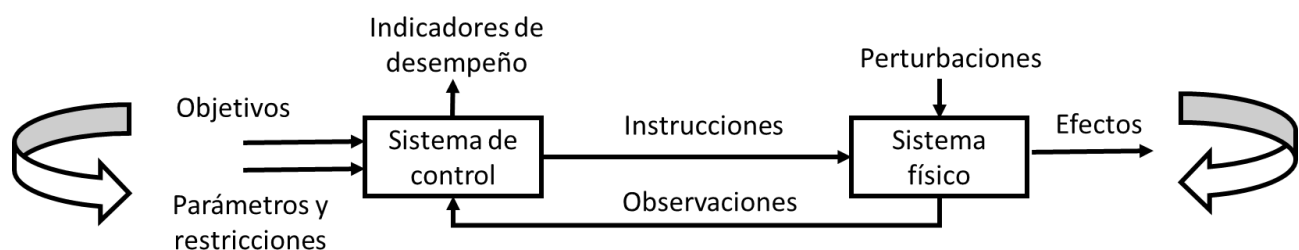


Figura 1. Ambiente de un sistema de control.
Fuente: Elaboración propia (2018. Adaptado de Trentesaux, 2002).

Los sistemas de control han sido objeto de estudio durante las últimas décadas. Básicamente, esto se da porque existe la necesidad industrial de crear procesos eficientes y confiables para manejar grandes cantidades de información que permitan procesar, responder, reaccionar y obtener la mejor solución posible que satisfaga la necesidad presentada. Igualmente, “la evolución de las arquitecturas de control se debe a los avances en computación, comunicación y tecnología; y se demuestra una mejora y una reducción de costos que continuarán por las próximas décadas” (Dilts, Boyd and Whorms, 1991). Por otra parte, Wills et al. (2001), afirman que “los nuevos avances en tecnología permiten revolucionar el diseño de los sistemas de control a la vez que acceden a su reconfiguración y evolución cuando están aún en proceso”. Finalmente, “la tecnología moderna es el resultado de la revolución tecnológica que ha venido ocurriendo desde inicios de la humanidad avanzando cada vez más para incluir la menor cantidad de recursos como energía, materiales, procesos e infraestructura” (Radzievska, 2016).

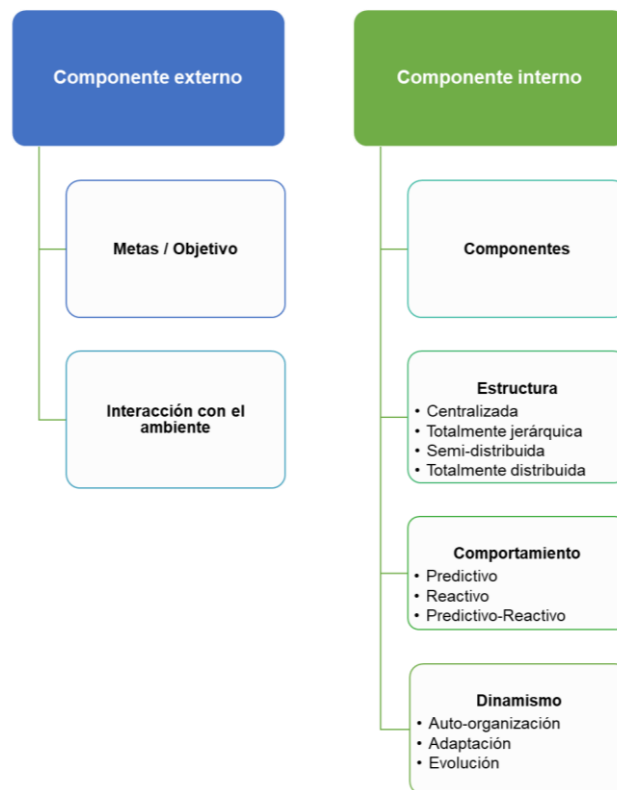


Figura 2. Componentes de un sistema de control.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Un sistema de control se caracteriza desde dos grandes componentes (Jimenez, 2017): a) componente externo y b) componente interno (ver Figura 2). El componente externo de un sistema de control está compuesto por los objetivos que guían las actividades generales del sistema controlado para lograr metas pre-establecidas y la relación con el medio ambiente que vincula la interacción entre el sistema y el mundo exterior. Por otra parte, el componente interno está definido por una arquitectura de control de la que forman parte los componentes modelados por medio de entidades de decisión como un conjunto de elementos, equipos, aplicativos y/o programas que interactúan entre sí para solucionar el problema del sistema y/o cumplir los objetivos, la estructura de la arquitectura como un arreglo u organización de los componentes definida por los tipos de comunicación y relación existentes entre las entidades de decisión (ver Figura 3), el comportamiento funcional que define las acciones individuales de los componentes y que está basado en la técnica de toma de decisiones de la entidad y el dinamismo que se refiere a las acciones y progreso que ocurre durante la ejecución del sistema según la interacción de los componentes, estructura y comportamiento.

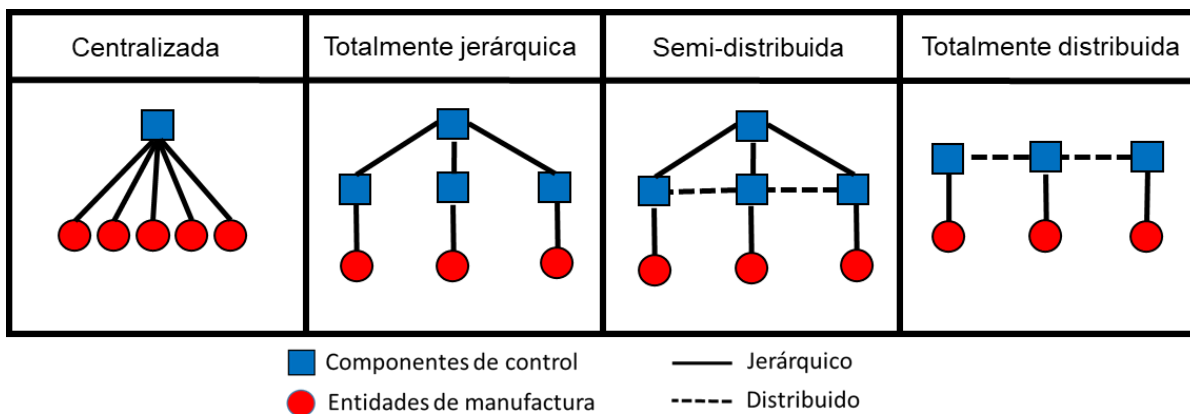


Figura 3. Tipos de estructuras en sistemas de control.

Fuente: Elaboración propia (2018. Adaptado de Dilts, Boyd and Whorms, 1991).

Los sistemas de control de manufactura “iniciaron implementando arquitecturas centralizadas o jerárquicas para obtener indicadores óptimos y cuyo comportamiento fuera predictivo” (Jimenez et al., 2015). Posteriormente, “estos sistemas de control

migraron y adoptaron estructuras distribuidas, también llamadas heterárquicas, permitiendo tener un comportamiento reactivo y capacidad de reaccionar a perturbaciones cada vez que sea necesario”. A largo plazo, una estructura distribuida le permite al sistema reconfigurarse para alcanzar un mejor desempeño ya que sus entidades locales gozan de autonomía y un enfoque cooperativo para la toma de decisiones.

Este tipo de arquitecturas son usadas en sistemas flexibles de manufactura (*FMS*) por las amplias ventajas que poseen. Entre estas se destacan: “a) menor complejidad de los programas (softwares), b) habilidad de reconfiguración y adaptabilidad, c) rápida difusión de la información y d) menor probabilidad de que el sistema completo falle al tener entidades autónomas y no centralizadas” (Dilts, Boyd and Whorms, 1991). Al poder reconfigurarse, “los sistemas de control distribuidos son capaces de solucionar problemas de detección de perturbaciones y brindan niveles óptimos de productividad” (Jimenez, 2017). Adicionalmente, los sistemas flexibles de manufactura (*FMS*) “se enfrentan al reto de alcanzar un desempeño óptimo global y reactividad en ambientes de manufactura dinámicos”.

Aunque ésta problemática ya cuenta con una solución aproximada en el objetivo de poder reaccionar a escenarios perturbados, hasta el momento los sistemas de control carecen de la capacidad de generar un balance entre la productividad y sostenibilidad del sistema. “A pesar de que a nivel mundial existe una necesidad urgente de desarrollos sostenibles, no hay suficientes estudios que discutan acerca de la integración entre sostenibilidad y reconfiguración” (Lee, Ryu, Shin, 2017). Es por esta razón que el presente trabajo de investigación plantea, a partir del problema anterior, una propuesta de control que proporciona un balance entre los indicadores de productividad y sostenibilidad.

Para que un sistema de control alcance un máximo nivel de eficiencia, es necesario que tome en cuenta los problemas económicos, sociales y medio-ambientales en conjunto. Estos problemas se asocian a los conceptos de sostenibilidad estratégica, táctica y operacional, y constituyen uno de los mayores retos de los sistemas de manufactura sostenibles ya que “el proceso de toma de decisiones debe alcanzar los

objetivos sociales, ambientales y económicos en simultáneo” (Montoya-Torres, 2015). De esta manera, para este trabajo de investigación, la **manufactura sostenible** se entiende como el proceso que integra tanto las metas económicas como las sociales y ambientales con el objetivo de abarcar mayor cantidad de criterios que optimicen la producción.

La literatura de manufactura sostenible está creciendo en las últimas décadas. Sin embargo, esta literatura “tiende a enfocarse en la eficiencia de la tecnología o procesos individuales en vez de la eficiencia global del sistema de manufactura” (Giret et al. 2017). Adicionalmente, cada vez son más y más estrictas las regulaciones ambientales impuestas a nivel global en cuanto a sostenibilidad. Por ejemplo: la disminución de recursos no-renovables, los problemas ambientales, costos y consumo de energía, el incremento de la producción de bienes ecológicos, la restricción de sustancias peligrosas, reciclaje, reutilización, reducción, entre otros. Es por esta razón que, “en el campo de procesos industriales, restringir el impacto ambiental adverso del consumo de energía es la mayor iniciativa de los países” (Giret et al., 2017). Dentro de las regulaciones ambientales, “la energía es una de las métricas más importantes a dirigir en procesos de manufactura sostenibles ya que las industrias consumen una porción significativa en la economía global” (Jimenez et al., 2016). Es por todo lo anteriormente explicado que el presente trabajo de investigación se enfoca en la sostenibilidad en el medio ambiente, específicamente en el consumo de energía.

Dada la problemática planteada en cuanto a sostenibilidad como un problema multi-objetivo, existen las siguientes estrategias para dar solución al mismo: a) arquitecturas de control reconfigurables (Jimenez, 2017), b) re-programación o *re-scheduling*, c) tecnología orientada a meta o *goal-orientation technology* (Lee, Ryu, Shin, 2017) y d) metodología de negociación o *negotiation methodology* (Lee, Ryu, Shin, 2017). Una breve definición de cada una de ellas se menciona a continuación:

- a) Sistemas cuyo diseño e implementación constan de arquitecturas de control reconfigurables, es decir, sistemas flexibles, dinámicos y con capacidad de adaptación de su estructura y comportamiento como manera de reacción a fallas o perturbaciones en el sistema.

- b) Sistemas en los que cada vez que ocurre una falla o perturbación en el sistema, se vuelve a correr el modelo desde el inicio, no se modifican sus componentes.
- c) Sistemas en los que las entidades de decisión deciden sus objetivos individuales para alcanzar el objetivo global. Se generan nuevos procesos de manufactura para alcanzar un nuevo objetivo.
- d) Los sistemas están compuestos por máquinas que tienen entidades de decisión. Estas entidades tienen propósitos de negociación únicos y pueden intercambiar información mientras se reconfigura el proceso de manufactura, a la vez que propician la negociación entre distintas máquinas para alcanzar el objetivo.

Aunque existen estos y otros acercamientos a la solución de la problemática planteada, este estudio se enfoca en la reconfiguración de la arquitectura de sistemas de control de tal manera que exista un balance entre eficiencia (sostenibilidad) y efectividad (rendimiento o productividad). Esta estrategia permite tener una solución satisfactoria y robusta en cuanto a eficiencia y un comportamiento reactivo según la necesidad del sistema controlado.

Es por la problemática anteriormente explicada que el presente trabajo de investigación se plantea la siguiente pregunta:

¿Cómo se puede reconfigurar la arquitectura de un sistema de control de manera que éste realice un balance entre las métricas de productividad y las métricas de sostenibilidad?

Para dar respuesta a esta interrogante, el presente trabajo de investigación pretende hacer la evaluación de un sistema de control reconfigurable teniendo en cuenta un balance entre eficiencia y efectividad en un ambiente de manufactura flexible. Esto, dada la importancia mencionada que tiene la sostenibilidad en los sistemas de manufactura, la falta de estudios en cuanto a su integración en sistemas de control y su impacto a corto, mediano y largo plazo en la industria. Para este estudio se analizará una emulación de una célula de manufactura ubicada en el laboratorio LAMIH de la

Universidad de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis (Francia). Para mayor información consultar <https://www.uphf.fr/aipnpsc/site-de-valenciennes>.

1.2 Justificación de la investigación:

Los sistemas de control “pueden clasificarse en estáticos o dinámicos según su necesidad de ser más reactivos a cambios en el sistema y a su capacidad de cambiar su estructura o comportamiento durante la ejecución del proceso” (Trentesaux, 2009). Los sistemas de control estáticos son aquellos en donde se inicia con una configuración inicial de arquitectura de control y mantienen su estructura y comportamiento igual a lo largo de todo el proceso. Esto hace que pueda alcanzar los objetivos propuestos y un nivel de desempeño óptimo, más no es capaz de responder o reaccionar a ningún cambio o perturbación en el ambiente. Por otro lado, existen los sistemas de control dinámicos, también llamados reconfigurables, cuya única diferencia se basa en que éstos son capaces de responder a cualquier requerimiento del sistema o evento durante la ejecución modificando su estructura y comportamiento. Con esto se logra que exista un alto nivel de reactividad y robustez. Con los sistemas de control se busca la optimización del sistema ya que, dependiendo de la configuración de la arquitectura de control definida, se alcanzarán los niveles deseados de eficiencia y efectividad; es decir, “el nivel óptimo de desempeño depende significativamente de la configuración de la estructura, comportamiento y dinamismo que fueron previamente definidos para el sistema” (Jimenez, 2017).

Según Jimenez et al (2016), existen “muy pocos estudios enfocados en la inclusión de conceptos sostenibles en dominios de sistemas de control de manufactura y su implementación ha sido muy limitada por la dificultad que existe de mantener y cumplir los objetivos sociales, ambientales y económicos del sistema”. Adicionalmente, “no es suficiente para las compañías adoptar una estrategia de mínimo cumplimiento ambiental, sino que deben considerar la sostenibilidad como uno de los principales catalizadores de innovación y competitividad” (Giret et al. 2017). Por último, “la sostenibilidad en manufactura ha ganado interés en campos académicos e industriales

como una oportunidad para mejorar la eficacia y eficiencia en operaciones empresariales” (Jimenez et al. 2016).

Es por este planteamiento que el presente trabajo de investigación se enfoca en desarrollar una propuesta para incorporar la sostenibilidad como una nueva medición en los sistemas de control dinámicos. Estos sistemas serían capaces de responder en tiempo real a perturbaciones del sistema al mismo tiempo que alcanzan niveles satisfactorios de eficiencia. Para este caso de estudio, se analizarán sistemas de control reconfigurables específicamente en procesos de manufactura y su relación entre comportamiento predictivo y reactivo y estructuras centralizadas y distribuidas para alcanzar la máxima eficiencia y efectividad del sistema. Específicamente se estudiarán sistemas flexibles de manufactura (*FMS*) que incorporen el *Flexible Job Shop Problem (FJSP)* en sus operaciones y algoritmo. Esto debido a que, según Trentesaux et al. (2013), “las actividades de investigación en manufactura y control de producción están en constante crecimiento, lo que lleva a un incremento en la variedad de programaciones y soluciones de control, cada una de ellas con premisas específicas y posibles ventajas”. Adicionalmente, los mismos autores plantean que “se requiere investigar la relación del *FJSP* con los sistemas de control ya que el nivel de implementación en la industria ha sido muy bajo por la dificultad que tienen de proveer una evaluación y desempeño robusto y confiable en los sistemas de control propuestos”.

Con el presente trabajo de investigación se espera contribuir con una aproximación de solución a una problemática que afecta local y globalmente a la industria manufacturera. También se espera contribuir al aumentar y expandir la base de literatura nacional deficiente actual que identifica la importancia de la integración de la sostenibilidad en los sistemas de control reconfigurables en ambientes de manufactura dinámicos. Finalmente, se espera también crear un trabajo innovador mediante el diseño y construcción de un sistema de control reconfigurable capaz de generar un balance entre sus indicadores y sirva de referencia a futuros investigadores e industrias.

1.3 Coherencia con temáticas de la maestría:

El objeto de estudio del presente trabajo de investigación se relaciona directamente con la temática de producción de la Maestría ya que se analizarán sistemas de control en procesos de manufactura creando un balance entre su eficiencia y efectividad. Adicionalmente, el trabajo se vincula fuertemente con materias como:

- Modelos de Optimización Avanzada: al utilizar el FJSP como caso aplicado, la materia se relaciona al haber explicado los distintos problemas clásicos de optimización y el procedimiento para resolverlos: conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y restricciones. Todos estos criterios y conocimientos obtenidos fueron necesarios para poder diseñar y desarrollar la arquitectura propuesta. También se relaciona al haber visto distintas metaheurísticas, entre ellas algoritmos genéticos, que sirvieron de base para la solución de este trabajo de investigación.
- Gestión de la Cadena de Abastecimiento: al implementar el caso de estudio en un sistema de manufactura flexible (FMS), se utilizaron los conocimientos obtenidos en esta materia ya que la producción junto con su planeación y programación son un eslabón en la cadena de suministro de cualquier industria.
- Modelos de Producción: los conceptos de planeación y programación de la producción aprendidos en esta materia se encuentran relacionados con el trabajo de investigación ya que se detalló cómo funciona el proceso productivo y cómo se planea la producción en una empresa hasta el nivel más detallado de agregación. Adicionalmente también se reforzaron los conceptos de optimización y formulación de problemas.

2. Objetivo general:

- Desarrollar un sistema de control reconfigurable que haga un balance, en tiempo real, entre los niveles de productividad y sostenibilidad al momento de responder a perturbaciones del sistema.

3. Objetivos específicos:

Los objetivos específicos de este trabajo de investigación son:

- Realizar una revisión sistemática de la literatura acerca de sistemas de control reconfigurables, sus objetivos en cuanto a la productividad y la importancia de su interacción con la sostenibilidad operativa.
- Proponer un sistema de control reconfigurable de manufactura que proporcione niveles adecuados de productividad y sostenibilidad tanto en la ejecución como en las reacciones a perturbaciones y cambios en el sistema.
- Implementar el sistema de control reconfigurable propuesto en un caso de estudio basado en un ambiente de manufactura flexible.
- Realizar la validación del sistema de control propuesto basado en la implementación realizada.
- Analizar los indicadores de productividad y sostenibilidad obtenidos para determinar la relación existente entre ellos y posibles mejoras.

Es importante mencionar que la estructura del documento se basa en los objetivos específicos mencionados. Es decir, cada capítulo del presente trabajo de investigación hace referencia a un objetivo específico en particular.

4. Métodos y metodología empleadas (limitaciones y supuestos):

El alcance del presente trabajo de investigación incluirá el diseño y construcción de un sistema de control reconfigurable que genere balance entre sus indicadores de eficiencia y efectividad a través de sus entidades de decisión y la estructura, comunicación y comportamiento entre ellas. Es por eso que es importante mencionar las siguientes especificaciones principales:

- Se entiende **productividad** como la efectividad y reactividad del sistema de control. Esta productividad será medida a través de un indicador de rendimiento del sistema.

- El sistema de control debe diseñarse con una arquitectura reconfigurable que permita modificar la estructura y comportamiento en tiempo real para ser capaz de responder a fallas y perturbaciones del medio ambiente.
- El foco será únicamente la dimensión ambiental de la sostenibilidad, es decir, sostenibilidad a nivel operacional. Quedan fuera del alcance del presente trabajo las dimensiones social y económica.
- Se incluye únicamente indicadores sostenibles de consumo de energía. Queda fuera del alcance del presente trabajo otros tipos de indicadores medio-ambientales.
- El trabajo incluye la validación del sistema ejecutando distintos experimentos en la herramienta de simulación denominada NetLogo.

Vale la pena mencionar que las limitaciones y supuestos, así como la metodología implementada en el sistema de control propuesto en este trabajo de investigación, serán desarrolladas y explicadas con mayor detalle a lo largo del desarrollo del proyecto, específicamente en el capítulo 3.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1 Introducción:

Esta sección presenta una revisión de la literatura relacionada a sistemas de control sostenibles y reconfigurables en manufactura. Este análisis sirvió de base para la presente investigación ya que de él se reconoce la importancia de integrar sostenibilidad en sistemas de manufactura flexibles así como la falta de estudios que contemplen indicadores medio-ambientales en arquitecturas de control. Las publicaciones encontradas son recientes e incluyen contribuciones en el campo de la reconfiguración y sostenibilidad, específicamente en ambientes de manufactura. En específico, los sistemas de control encontrados son capaces de responder a perturbaciones teniendo en cuenta el impacto social, económico y/o ambiental.

Específicamente en el área de la sostenibilidad, la manufactura sostenible ha adquirido mayor importancia en el campo académico e industrial por los beneficios que trae consigo en las industrias. Entre estas ventajas se encuentran poder reducir los desperdicios, controlar el consumo de desechos, disminuir los costos asociados a energía, conservar los recursos naturales, mitigar el riesgo operacional, entre otros. Cabe destacar que la sostenibilidad está compuesta por tres dimensiones principales: social, ambiental y económica. La dimensión social abarca la problemática de las comunidades, empleados y consumidores. La dimensión ambiental toma en cuenta el daño ecológico

y minimiza su impacto al mismo tiempo que conserva la energía y los recursos naturales. La dimensión económica incluye los costos relacionados del sistema tanto internos (producción, mantenimiento, compras) como externos (mercado, precios). La combinación de las tres dimensiones es comúnmente conocida como ***Triple-Bottom-Line (TPL)*** en donde se integran las 3 áreas para lograr un mejor desempeño como industria. Para el presente trabajo de investigación, el foco será únicamente la dimensión ambiental expresada a través de indicadores de consumo de energía del sistema.

Por otra parte, en el área de reconfiguración existen varios enfoques como la reconfiguración a) física que es aquella que involucra un cambio físico en el sistema como agregar, sustituir o eliminar módulos o elementos y b) lógica o decisional que involucra cambios internos del agente y su estructura y comportamiento así como la relación con otros agentes del sistema. Como fue mencionado anteriormente, existen distintos tipos de estructuras como a) centralizada, b) totalmente jerárquica, c) semi-distribuida y d) totalmente distribuida. Por otra parte, la arquitectura de un sistema de control puede ser centralizada o descentralizada (distribuida) dependiendo de la composición, relación e interacción entre los agentes o entidades que forman parte de él.

1.2 Revisión sistemática:

La investigación se llevó a cabo a través de una revisión sistemática, que consistió en seis etapas representadas en la Figura 4 y explicadas a continuación:

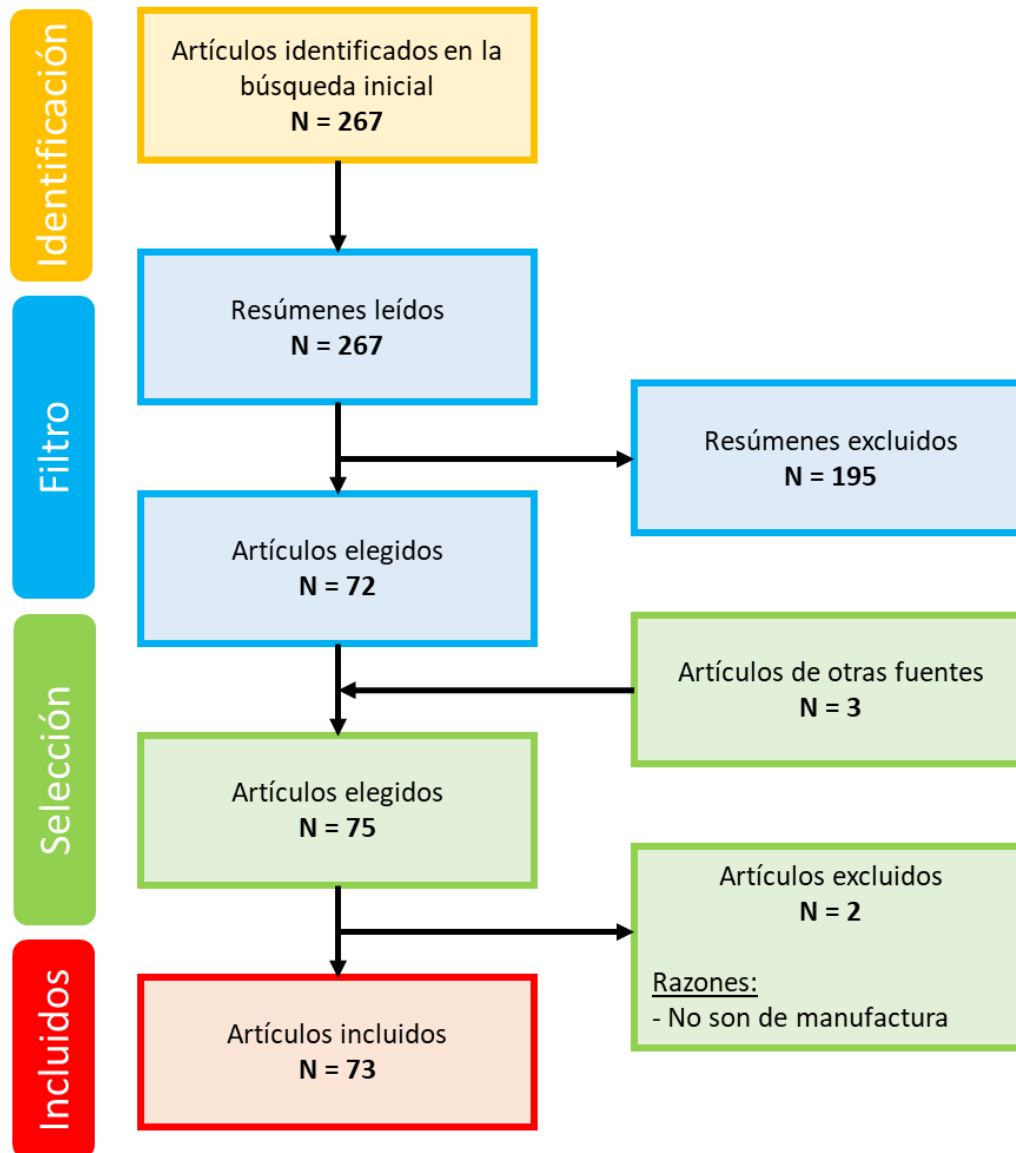


Figura 4. Diagrama de la revisión sistemática.
Fuente: Elaboración propia (2019).

1.2.1 Identificación de artículos:

Basada en las definiciones hechas a inicios de este capítulo, inicialmente se hizo una revisión preliminar en la que se identificaron palabras clave según los temas a desarrollar y combinaciones entre ellas. Luego, estas palabras clave se utilizaron como filtro para la búsqueda inicial en distintas bases de datos reconocidas como Elsevier, IEEE, EBSCO, Springer y Google Scholar. Estas palabras clave fueron escogidas porque tienen relación y contenido relevante para la investigación y sirven de base para

encontrar estudios precedentes. Algunas de las palabras utilizadas en esta revisión preliminar son: sistemas de manufactura flexibles, sistemas de control sistemas de manufactura sostenibles, arquitectura reconfigurable, arquitectura sostenible, **productividad** en arquitecturas de control, productividad y sostenibilidad en sistemas de control, *green manufacturing* en sistemas de control. La búsqueda se aplicó a títulos de artículos en su mayoría y solo se tomaron en cuenta publicaciones desde el año 2000. Como resultado, se obtuvieron 267 artículos (ver Anexo 1).

1.2.2 Criterios de inclusión y exclusión:

En este paso se procedió a leer todos los resúmenes de los artículos obtenidos en la revisión inicial. De esta lectura se hizo un filtro para determinar cuáles estudios son relevantes para el objetivo de la presente investigación. Esto se hizo tomando en cuenta ciertos criterios de inclusión como: a) artículos cuyo idioma es inglés y b) artículos que consideran ambientes de manufactura obligatoriamente. Así mismo, como criterio de exclusión se tomó en cuenta: a) todo artículo cuyo campo de aplicación es distinto a manufactura y b) artículos con vigencia de las últimas 2 décadas. Adicionalmente, para el caso de los artículos de sostenibilidad, se tomó como criterio de inclusión a) todo artículo que tiene el consumo de energía (*energy-aware*) como una de sus principales variables de estudio, y se excluyeron aquellos que a) únicamente miden otras fuentes sostenibles como desperdicios o gases tóxicos.

1.2.3 Selección de artículos:

Los criterios de inclusión y exclusión usados como segundo filtro son de gran utilidad ya que permitieron obtener artículos realmente relevantes para la investigación. Estos artículos son recientes y tienen contenido selecto lo que permitió eliminar todo tipo de estudio cuyo propósito no está alineado con el actual. La aplicación de estos criterios de inclusión y exclusión a títulos, resúmenes, introducciones y conclusiones llevó a la eliminación de 195 artículos, por lo que hubo una reducción significativa que hizo que quedaran únicamente 72 artículos seleccionados. Luego, se procedió a buscar

nuevamente en bases de datos tomando en cuenta los mismos criterios de inclusión y exclusión y se encontraron 3 artículos nuevos con fecha anterior al año 2000 que se adicionaron a los anteriores para hacer un total de 75 artículos elegidos.

1.2.4 Análisis de calidad:

En esta fase se examinó cada uno de los artículos elegidos con el fin de obtener criterios o parámetros que de alguna manera se pudieran evidenciar en todos los artículos para evaluar su propósito y aplicación. De aquí se obtuvieron distintos atributos presentados y explicados en la Tabla 1:

1.2.5 Extracción de artículos:

Finalizando la revisión sistemática, se procedió a leer cada uno de los artículos seleccionados con el propósito de entender conceptos básicos de sostenibilidad y reconfiguración. Adicionalmente, se analizaron estados del arte y aplicaciones hechos previamente para evaluar su alcance y resultados. De esta lectura se extrajeron 2 artículos porque se identificó que estos no fueron realizados en ambientes de manufactura.

1.2.6 Compilación de artículos:

Por último, se indexaron 73 artículos en 3 grandes áreas: sostenibilidad, reconfiguración o ambas dependiendo del alcance de cada uno de ellos y el propósito de estudio. A través de estos artículos se confirmó la falta de estudios en cuanto a arquitecturas de control que involucren el consumo de energía como criterio de sostenibilidad para la toma de decisiones del sistema. La Tabla 2 muestra los artículos finalmente seleccionados según su año y área:

Tabla 1. Criterios de evaluación de artículos.
Fuente: Elaboración propia (2019).

SOSTENIBILIDAD	Alcance	Productos	Grado de influencia de los indicadores de sostenibilidad del artículo en el sistema, lugar de aplicación.
		Recursos	
		Procesos	
		Sistemas	
	Dimensión	Económico	Dimensión de la sostenibilidad que influye en la situación económica de los <i>stakeholders</i> y en sistemas económicos locales, naciones e internacionales. Incluye indicadores como costos logísticos, ganancias e inversiones.
		Ambiental	Dimensión de la sostenibilidad que se enfoca en el desarrollo ecológico de procesos de manufactura, productos y actividades. Incluye indicadores como consumo de agua, energía, materiales, desechos y emisiones.
		Social	Dimensión de la sostenibilidad que se enfoca en los sistemas sociales con los cuales una compañía opera que impactan en las decisiones y actividades de la sociedad. Incluye indicadores como salud y bienestar en el trabajo, relación con las comunidades, cantidad de empleos, desarrollo de empleados.
	Diseño	Operacional	Tareas diarias y de corto plazo como programación de máquinas y asignación de trabajos que involucran aparatos y personal.
		Táctico	Tareas de mediano plazo que involucran mayor alcance y requieren mayor tiempo de implementación como estrategias <i>green y/o lean</i> o modificar módulos de sistemas ERP.
		Estratégico	Tareas de largo plazo como diseño de <i>layout</i> , mejorar estructura o configuración del sistema, entre otras.
	Ciclo de vida	Diseño	Etapa que contempla la creación y esquema de un producto.
		Desarrollo	Etapa que contempla avances y mejoras en el diseño de un producto.
		Manufactura	Etapa que contempla la elaboración de un producto.
		Utilización	Etapa que contempla la vida útil de un producto.
Entradas	Reutilización y reciclaje	Etapa que contempla el uso de un producto en procesos ecológicos luego de su uso.	
	Consumo energía	Medida <i>input</i> de un sistema sostenible que mide el consumo de energía en máquinas en ambientes de manufactura.	
Salidas	Consumo recursos	Medida <i>input</i> de un sistema sostenible que mide el consumo de recursos (materiales, inventario, agua) en máquinas en ambientes de manufactura.	
	Desperdicios	Medida <i>output</i> de un sistema sostenible que mide el nivel de desechos generados por máquinas en ambientes de manufactura.	
RECONFIGURACIÓN	Lugar de aplicación	Emisión de gases tóxicos	Medida <i>output</i> de un sistema sostenible que mide el nivel de emisiones (CO2) generadas por máquinas en ambientes de manufactura.
		Sistema	Grado de influencia de la reconfiguración aplicada en el sistema.
		Software	
		Control	
		Máquina	
	Proceso		
	Tipo de control	Centralizado	Sistema de control donde las decisiones globales y locales son tomadas por una sola entidad.
		Decentralizado	Sistema de control donde las decisiones globales y locales son tomadas por distintas entidades.
	Arquitectura	Centralizada	El control está centralizado en un solo componente que mantiene una relación jerárquica con el resto. Una sola entidad tiene la autonomía y la decisión sobre todo el sistema.
		Totalmente jerárquica	El control se divide entre componentes que están conectados jerárquicamente. La autonomía y la decisión del sistema está distribuida en distintas capas que disminuyen la complejidad de la comunicación entre entidades.
		Semi-heterárquica / Semi-distribuida	El control se divide entre componentes que están conectados jerárquica o heterárquicamente y se divide en distintos tipos de relaciones que facilitan las necesidades del sistema.
		Totalmente heterárquica / Totalmente distribuida	El control se divide entre componentes que están conectados heterárquicamente entre ellos. Los componentes tienen la autonomía y la reactividad necesarias para facilitar la colaboración.
	Comportamiento	Reglas condicionales	Se incluyen problemas de optimización y aquellos donde la entidad tiene varias opciones de escogencia.
		Heurísticas / Simulación	Algoritmos iterativos que aplican únicamente a ese proceso en particular.
Meta-heurísticas		Algoritmos iterativos que son aplicables en varios procesos.	
Analítica		Se incluyen técnicas de inteligencia artificial como machine learning, lógica difusa, redes neuronales, entre otras.	

Tabla 2. Compilación de artículos por área (cont).
Fuente: Elaboración propia (2019).

ÁREA	AUTORES	PROPIEDADES DE SOSTENIBILIDAD												PROPIEDADES DE RECONFIGURACIÓN																												
		Alcance			Dimensión			Diseño		Ciclo de vida				Entradas		Salidas	Lugar de aplicación				Tipo de control		Arquitectura			Comportamiento																
		Productos	Tecnologías	Procesos	Sistemas	N/A	Económico	Ambiental	Social	Operacional	Táctico	Estratégico	Diseño	Desarrollo	Manufactura	Utilización	Reutilización y reciclaje	Consumo energía	Consumo recursos	Desperdicios	Emisión de gases tóxicos	Sistema	Software	Control	Máquina	Proceso	N/A	Centralizado	Decentralizado	Centralizada	Totalmente jerárquica	Semi-hierárquica	Totalmente heterárquica	Reglas condicionales	Heurísticas / Simulación	Meta-heurísticas	Análítica					
Sostenibilidad y reconfiguración	ElMaraghy. (2005)	REVISIÓN LITERARIA																																								
	Rauch et al. (2015)	REVISIÓN LITERARIA																																								
	Pach et al. (2014)	•			•		•	•		•					•			•		•			•		•																	
	Trentesaux & Giret. (2015)				•			•		•					•				•		•																					
	Pach et al. (2015)				•					•					•				•		•																					
	Jimenez et al. (2016)				•					•					•				•		•																					
	Aljuneidi & Bulgak. (2016)				•					•					•				•		•																					
	Xu et al. (2016)				•					•					•				•		•																					
	Li et al. (2017)				•					•					•				•		•																					
	Giret et al. (2017)				•					•					•				•		•																					
Salido et al. (2017)				•					•					•				•		•																						
Lee et al. (2017)				•					•					•				•		•																						

1.3 Temáticas:

De la revisión de la literatura se identificaron tres grandes grupos relacionados con la temática del presente trabajo de investigación: a) sostenibilidad, b) reconfiguración y c) sostenibilidad y reconfiguración. Se procedió a resumir algunos de los aportes más significativos de cada uno de ellos y se resaltan a continuación los aspectos más relevantes obtenidos del estado del arte:

1.3.1 Sostenibilidad:

El surgimiento de la 4ta Revolución Industrial hoy en día, también llamada **Industria 4.0**, es un hecho que trae consigo una sincronización de varias tecnologías que pueden ser conectadas en máquinas, productos, plantas de manufactura, sociedades y personas. Según Prinz et al. (2018), estas tecnologías de información y comunicación o ICTs (por sus siglas en inglés), “mejoran la eficiencia en manufactura, crean nuevos modelos para productos personalizados y minimizan el daño ambiental a través del ciclo de vida del producto”. Entre estas tecnologías se encuentran: ***Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS), Big data, cloud computing, additive manufacturing y data analytics***. Adicionalmente, Carvalho et al. (2018) mencionan que este paradigma de la Industria 4.0 “será un paso más en la creación de valor sostenible en la industria. La asignación de recursos (agua, energía, materiales y productos) se puede desempeñar de una manera más eficiente basada en creación de valor inteligente.

La Industria 4.0 “tiene el potencial de crear valor sostenible en las 3 dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, económico y social” (Stock & Seliger, 2016). Esta combinación, como se aprecia en la Figura 5, suele conocerse como *Triple Bottom Line* (TBL).

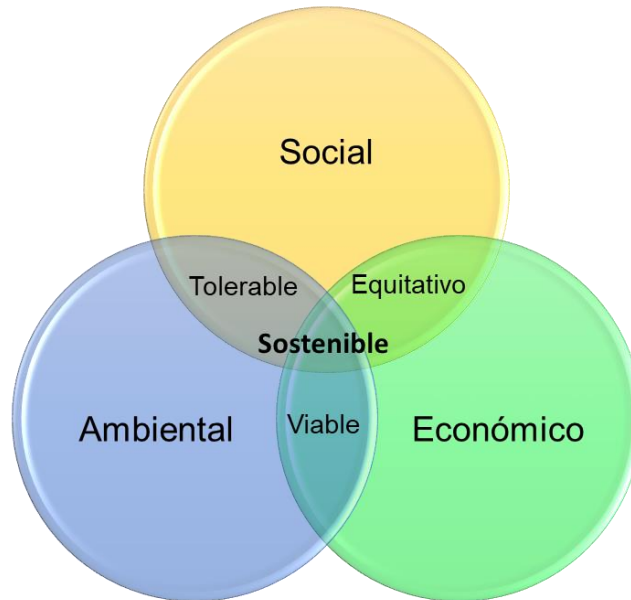


Figura 5. Tres dimensiones de la sostenibilidad (TBL).
Fuente: Zhou et al (2017).

En la dimensión social, Kluczek (2017) presentó un nuevo modelo para evaluar el desempeño de la sostenibilidad a nivel operativo a través de la metodología AHP. Este autor toma en cuenta indicadores como a) número de empleados, b) salud y seguridad en el trabajo y c) tasa de empleo local. Así mismo, Sezen & Çankaya (2013), concluyeron que el proceso de innovación en una empresa tiene resultados positivos en el desempeño de su sostenibilidad, tomando en cuenta factores sociales como a) nivel de empleo, b) relación con las comunidades, c) ética y d) impacto social del producto.

En la dimensión económica, Greinacher et al (2015) simularon un modelo de producción incluyendo costos directos e indirectos como materia prima, consumo de energía, sobrecostos y gastos generales. De manera similar, Nujoom et al (2018), desarrollaron un modelo multi-objetivo para minimizar los costos de manufactura, inventario y distribución, minimizar el consumo de energía y las emisiones de CO₂ y concluyeron que este método es útil y efectivo para soportar la optimización de sistemas de manufactura tradicionales bajo las premisas ecológicas y económicas.

Por último, en la dimensión ambiental es mucha la literatura encontrada por lo que se mencionan únicamente algunos de los aportes más relevantes. De igual manera, es

importante destacar que el presente trabajo de investigación se enfoca únicamente en esta dimensión de la sostenibilidad, por lo que tomará en cuenta únicamente criterios ambientales que incluyan indicadores de energía. En ese sentido, De Carvalho & De Oliveira (2015) propusieron un método sistemático que incrementa la eficiencia energética y hace posible reducir el consumo de energía de una máquina en estado de reposo. Sun & Li (2013), desarrollaron un modelo analítico para estimar el control de energía en sistemas de manufactura en tiempo real considerando comportamientos estocásticos. Brossog et al (2015) desarrollaron y simularon un modelo para analizar el consumo de energía de robots industriales y su comportamiento dinámico y concluyeron que la reducción de energía se puede dar a) optimizando la velocidad del robot, b) reduciendo el peso de herramientas del sistema y c) suavizando el movimiento del robot. Finalmente, Bajpai et al (2018) desarrollaron y simularon un modelo que analiza la estructura dinámica de energía y su consumo en un sistema de manufactura. Plantearon un indicador de desempeño de energía definido como *consumo de energía por unidad sin eventos disruptivos / consumo de energía total por unidad* e incluyeron cuellos de botella en la simulación.

El desarrollo sostenible en estas 3 dimensiones permite desarrollar una estrategia que hoy en día es cada vez más relevante para una empresa ya que permite crear un balance ideal entre las 3. Es así como surge el concepto de **manufactura sostenible** como “la creación de productos manufacturados en procesos que minimizan el impacto ambiental negativo, conservan la energía y los recursos naturales, son seguros para los empleados, comunidades y consumidores y son sólidos económicamente” (Giret et al., 2015). Sin embargo, Zhang (2015) menciona que “el creciente costo del uso de energía y problemas ambientales han llevado a una presión creciente para las empresas de manufactura de tener que disminuir el consumo de energía”. Zhou et al (2017) coinciden al afirmar que “la manufactura, al ser el principal pilar de la sociedad, consume una gran cantidad de energía y materiales para proveer productos a humanos y tiene un rol muy importante en el desarrollo de la sostenibilidad”. Igualmente, Yuan et al (2012) consideran que “el impacto ambiental en la industria de manufactura es muy significativo por la cantidad de emisiones y desperdicios que genera. Es por eso que la manufactura sostenible ha atraído una atención enorme en los últimos años como una estrategia

comprehensiva para reducir el impacto ambiental y mejorar el desempeño económico de esta industria”. Como es notable, existe una necesidad mundial de incorporar la sostenibilidad en las operaciones industriales ya que con esto se espera, a través de las nuevas tecnologías, que una empresa mejore su competitividad y desempeño ambiental, económico y social. Finalmente, según Trentesaux & Giret (2015), “hay muy poco trabajo en proceso en lo que a diseñar arquitecturas de control sostenibles en manufactura se refiere”.

Por último, vale la pena mencionar que las actividades de producción y manufactura tienen muchas áreas a nivel operativo como: compras, manejo de inventario, programación o *scheduling* de tareas, control de calidad, distribución, mantenimiento, entre otras. Aunque Saygin & Kilic (1999) afirman que “existe una necesidad de integrar procesos de planeación y sistemas de programación o secuencias para generar planes más flexibles y reales”, el presente trabajo de investigación se enfocará únicamente en el área de *scheduling*, específicamente tomando en cuenta objetivos sostenibles.

1.3.2 Reconfiguración:

Dado el continuo crecimiento de la economía global, la competitividad de una industria puede ser entendida como la capacidad que tiene de adaptarse y satisfacer rápidamente las necesidades de sus clientes para entregar el producto correcto en el tiempo y cantidades correctas. Es así como esta adaptación a cambios en el ambiente tiene una importancia vital para poder reaccionar a situaciones dinámicas y volátiles sin afectar el rendimiento del sistema. Para lograr esto, un sistema debe ser capaz de reconfigurarse al ocurrir eventos disruptivos externos como cambios en la demanda o eventos disruptivos internos como cambios en la programación, máquinas dañadas, etc. Es así como los sistemas de control evolucionan a sistemas de arquitecturas reconfigurables según las necesidades puntuales de la producción. De esta manera, los **sistemas de manufactura reconfigurables (RMS)** se definen como “la habilidad que tiene el sistema de manufactura de modificar su comportamiento y estructura a nivel de *software* y *hardware* para hacer frente a condiciones inusuales y cambios en el ambiente

productivo como falla de máquinas, productos innovadores, pedidos urgentes, etc” (Vrba & Marik, 2010). Estos sistemas tienen como objetivo mejorar la capacidad de respuesta a estos cambios y eventos disruptivos de diferentes tipos. Las principales características de un RMS se definen en la Tabla 3:

Tabla 3. Características principales de un RMS.
Fuente: Koren et al (2018).

Característica	Interpretación
Escalabilidad	Capacidad de modificar capacidad de producción adicionando, eliminando y/o cambiando recursos componentes.
Convertibilidad	Capacidad de transformar la funcionalidad de un sistema para ajustar los nuevos requerimientos de producción.
Capacidad de diagnóstico	Capacidad de monitorear la calidad del producto y de diagnosticar rápidamente las raíces de sus defectos.
Personalización	Flexibilidad del sistema o de una máquina alrededor de un producto para tener mayor personalización del mismo.
Modularidad	Capacidad de dividir funciones operativas en unidades para alternar esquemas de producción.
Integrabilidad	Capacidad de integrar módulos rápida y precisamente a través de interfaces de hardware y software.

En este sentido, existen varias aproximaciones de sistemas de manufactura reconfigurables. Dentro de estas instancias, este estudio se enfoca solamente en las aplicaciones de reconfiguraciones a nivel de software, específicamente en los sistemas de control. Basado en esto, Leitao & Restivo (2008) implementaron y validaron una arquitectura de control denominada ADACOR (*adaptive holonic control architecture*) haciendo uso de tecnologías con sistemas multi-agentes para mejorar la agilidad y reconfiguración de un sistema productivo. Da Silva et al (2016) presentaron una arquitectura de control y su diseño para sistemas de manufactura reconfigurables aplicando *Petri Nets* en su modelación para solucionar demandas imprevistas e implementar un comportamiento tolerante a fallas. Indrayadi et al (2002) presentaron el

diseño de un sistema de control para sistemas de manufactura flexibles con comportamiento dinámico en la llegada de órdenes. El diseño es la implementación de una arquitectura multi-agente de la arquitectura holónica PROSA ya implementada. Van Brussel et al (1998) describieron la arquitectura holónica denominada PROSA que consiste en tres tipos de holones (agentes) básicos: recursos, productos y órdenes. Así mismo, discutieron su estructura, componentes, responsabilidades e interacciones. Finalmente compararon PROSA con otras arquitecturas existentes y concluyeron, entre otras cosas, que esta arquitectura abarca todos los aspectos jerárquicos y heterárquicos de una arquitectura de control. Por último, Holvoet et al. (2009), especificaron tres patrones de soluciones reutilizables para la coordinación en sistemas distribuidos, dinámicos y de gran escala basados en la arquitectura PROSA. Definieron y describieron cada uno de estos patrones denominados: a) *smart messages*, b) *delegate MAS* y c) *delegate ant MAS* para finalmente comparar las diferencias y retos de cada uno y tener mayor claridad en qué enfoque seleccionar al momento de usar un sistema dinámico.

Tomando en cuenta la necesidad de implementar sistemas de manufactura reconfigurables, Chokshi & McFarlane (2008) afirman que “la habilidad de los procesos de soportar reconfiguraciones dinámicas y suaves junto con los requerimientos cambiantes de las operaciones será importante en un futuro. Se requieren enfoques más distribuidos que puedan soportar el alto nivel de reconfiguración en sistemas de control, especialmente en los niveles jerárquicos bajos donde la visibilidad de eventos disruptivos es muy alta”. Basado en este enfoque distribuido, Renna (2010) propuso una arquitectura multi-agente para el problema de reconfiguración de capacidad en sistemas de manufactura reconfigurables ya que “durante una operación de manufactura, pueden ocurrir excepciones dinámicas e impredecibles. Su ocurrencia puede llevar a la degradación del desempeño del sistema o, en el peor de los casos, puede interrumpir el proceso productivo”. Así mismo, “la tecnología multi-agente es reconocida como una herramienta poderosa para desarrollar soluciones de control industriales flexibles y robustas. Los **sistemas multi-agentes (MAS)** están compuestos de unidades o agentes distribuidos heterárquicamente, donde cada agente gestiona sus propias actividades basados en su estado local y la información que recibe de otros agentes” (Vallee et al, 2011). Es así como da Silva et al (2015) presentaron un método para modelar un sistema

de control reconfigurable distribuido en manufactura combinando *Service-Oriented Architecture* (SOA), *Petri Nets* (PN), sistemas holónicos y multi-agentes (HMAS) y otras buenas prácticas que permitieron el desarrollo de un enfoque innovador. Por otra parte, Indriago et al (2016) implementaron y simularon una arquitectura holónica (basada en agentes) en sistemas de control híbridos con el propósito de confirmar la simplicidad y flexibilidad de estos sistemas. Rodrigues et al (2018) propusieron un enfoque basado en agentes para ejecutar una reconfiguración dinámica, descentralizada y en tiempo real donde agentes de software inteligentes aplican distintas estrategias para identificar oportunidades de reconfiguración. Silva et al (2017) presentaron un enfoque basado en modelos para sintetizar controladores capaces de coordinar múltiples componentes de una fábrica en entornos dinámicos y concurrentes. Zbib et al (2012) propusieron y aplicaron un modelo de campos potenciales en sistemas de manufactura flexibles. Los campos potenciales son “una técnica reactiva donde el sistema toma una decisión basado en los campos emitidos por las entidades correspondientes”. Básicamente el objetivo es lograr que a través de las entidades de decisión locales y de recursos se dé solución a la asignación de máquinas de un producto y al modo *online* y *standby* de un recurso por campos emitidos por cada uno de estos componentes. La propuesta fue simulada en el software de simulación llamado **NetLogo** y sirvió de referencia para el presente trabajo de investigación. Por último, Perez et al (2016) propusieron un algoritmo que identifica las fallas del sistema en relación al tiempo que le toma al sistema hacer un producto. La literatura en sistemas reconfigurables es sumamente amplia y extensa, entendiendo así que es un criterio de vital importancia a incluir en el diseño de un sistema para lograr optimalidad y gran desempeño.

Es por esta razón que el enfoque de reconfiguración de este trabajo se basó en una reconfiguración decisional y en lo descrito por Walsh et al (2006), quienes definieron reconfiguración según la manera en la que el sistema evoluciona y se adapta a nuevas condiciones y clasificaron la reconfiguración en seis categorías, como se aprecia en la Figura 6:

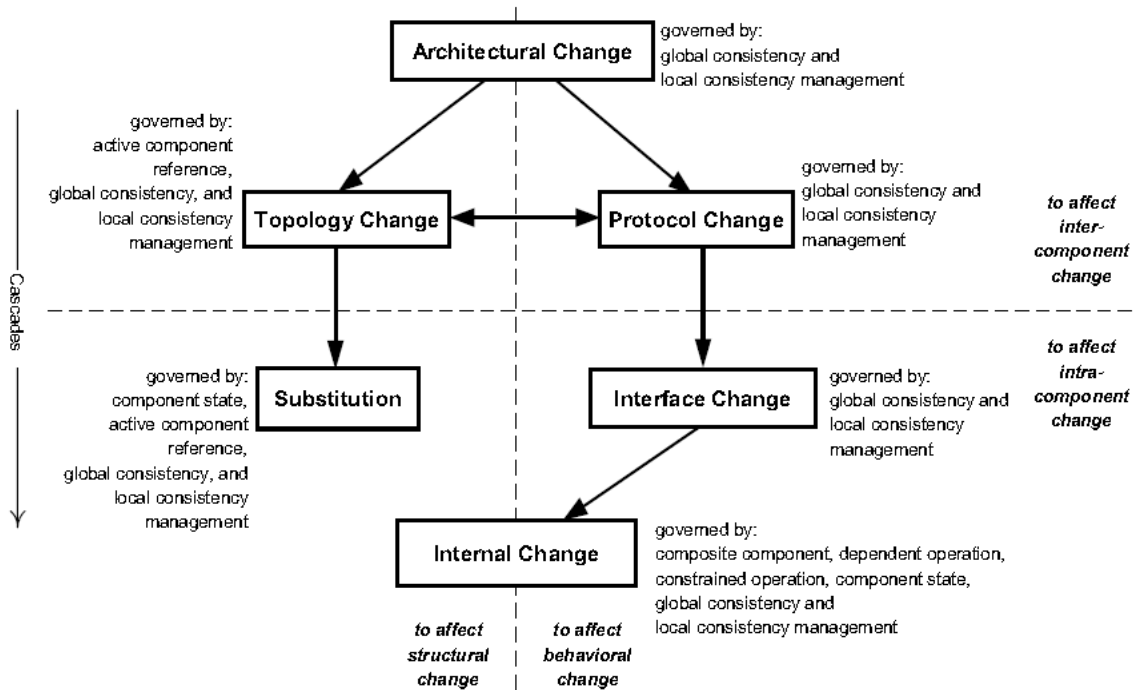


Figura 6. Tipos de cambios en la reconfiguración de un sistema.
Fuente: Walsh et al (2006).

Según Walsh et al (2006), hay distintos tipos de reconfiguración dependiendo del tipo de cambio (estructural o de comportamiento) y del lugar del cambio (cambio interno en la entidad o cambio entre entidades). Para el presente trabajo de investigación se hará enfoque únicamente en los cambios de reconfiguración que se apliquen entre entidades/componentes, siendo estos: cambio en topología y cambio en protocolo que conllevan a un cambio en la arquitectura a nivel estructural y de comportamiento. Un cambio en la arquitectura significa cambiar las propiedades globales o locales del sistema y esto implica cambios en la estructura y/o comportamiento del mismo para cumplir y satisfacer estas nuevas propiedades. Con este cambio de arquitectura se requiere un cambio en topología, que hace referencia a adicionar, modificar o eliminar componentes lo que significa un cambio de estructura al tener que involucrar otras entidades y hacer que cambien también. Este cambio en topología automáticamente implica un cambio en el protocolo ya que se requiere un cambio de la interacción de un componente con otro y el flujo de información entre ellos, lo que significa un cambio de comportamiento.

1.3.3 Sostenibilidad y reconfiguración:

Basado en los conceptos previamente definidos y en la profundidad de la revisión sistemática realizada, se puede entender un **sistema de reconfiguración sostenible** como aquel que es capaz de cambiar su estructura y comportamiento tomando en cuenta objetivos sostenibles. Es así como ambos componentes (reconfiguración y sostenibilidad) se unen para, en conjunto con técnicas predictivas-reactivas de toma de decisiones, el sistema sea capaz de generar un balance entre indicadores reconfigurables y sostenibles.

Tal como fue mencionado anteriormente, el consumo de energía en las distintas actividades de un sistema de manufactura es vital para un buen desempeño sostenible. Un sistema de manufactura está compuesto de recursos como máquinas, robots, correas transportadoras, *programmable logic controllers* (PLC), entre otros. Dicho esto, según Pach et al (2014), “se espera que los futuros recursos puedan auto-gestionar su consumo energético permitiendo un cambio a un modo de consumo bajo si el recurso no está ejecutando ninguna tarea, haciendo que su nivel de energía baje considerablemente”. Para disminuir su consumo y detectar estos cambios, el recurso debe ser capaz de reconfigurar su proceso y cambiar sus parámetros de funcionamiento. Esto se define como la capacidad de reconfigurar su arquitectura e integrar nuevos criterios dinámicos según los eventos ocurridos (Jimenez et al, 2016). Por otra parte, de acuerdo a Bekrar et al (2015), “es deseable desarrollar un sistema de control de manufactura que acople eficientemente y en tiempo real los enfoques predictivos y reactivos de toma de decisiones para responder a las necesidades de manufactura mencionadas anteriormente”. Adicionalmente, Berger et al (2015) afirman que “en una fase productiva se pueden estudiar distintas soluciones para alcanzar el nivel de sostenibilidad deseado: recursos o procesos se pueden sustituir con otros que consuman menos energía, los recursos se pueden optimizar, los procesos se pueden afinar y se pueden agregar al sistema dispositivos externos que ahorren energía”.

Para alcanzar esta reconfiguración, existen distintos métodos centralizados y/o distribuidos que permiten dar solución a eventos inesperados (perturbaciones) e integrar nuevos parámetros. Es así como Pach et al (2014) propusieron una programación

reactiva y enfocada en energía para **sistemas de manufactura flexibles** basada en campos potenciales. Concluyeron que esta metodología es eficiente ya que permite que los productos tomen decisiones en tiempo real en procesos como asignación y distribución y permite que los recursos cambien de estados según los campos potenciales emitidos por productos que los hayan escogido en ambientes dinámicos. Así mismo, Trentesaux & Giret (2015) realizaron una extensión de una arquitectura de control heterárquica previamente establecida a una arquitectura de control holónica y sostenible por medio de la inclusión de agentes y campos potenciales. Jimenez et al (2016) propusieron e implementaron un sistema con una arquitectura de control dinámica e híbrida que integra indicadores sostenibles (consumo de energía) con actividades de manufactura a nivel operativo utilizando un algoritmo genético para los agentes globales y campos potenciales para agentes locales. Xu et al (2016) propusieron una programación sostenible en manufactura basado en energía en tiempo real y eficiencia de producción a través de un algoritmo denominado EPBA (*enhanced Pareto bees algorithm*) y simularon eventos dinámicos. También Li et al (2017) se enfocaron en un problema de programación para minimizar el consumo de energía en sistemas de manufactura flexibles y formularon un nuevo algoritmo genético de programación basado en las redes de Petri del sistema. Al mismo tiempo, propusieron calcular el consumo de energía de dos maneras: a) dividiendo los estados de los recursos en sostenido u ocioso o b) dividiendo los estados de los recursos en trabajando, ocupado u ocioso. Es así como Giret et al (2017) proponen el concepto de **Intelligent Manufacturing System (IMS)** como aquellos sistemas de manufactura basados en agentes u holones “en donde cada componente, elemento y/o recurso es modelado y controlado por agentes u holones que pueden cooperar para solucionar problemas complejos”. Basados en este concepto, los autores hicieron una extensión de trabajos previos incluyendo detalles del agente sostenible a incluir en el sistema (*Go-Green ANEMONA*) y su validación a través de tres distintos casos de estudio.

Para complementar la literatura encontrada que involucra e integra tanto sostenibilidad en cualquiera de sus tres dimensiones como reconfiguración del sistema, los autores Salido et al (2017) afirman que “en industrias de manufactura hay muchos eventos disruptivos e inesperados todos los días. Luego de una disrupción, la

programación original del sistema puede quedar inválida dadas las nuevas condiciones. En algunos casos, es posible modificar fácilmente la solución, pero, en muchos otros, es necesario una reprogramación para minimizar los efectos de la interrupción y recuperar la solución original cuanto antes”. Es por esta razón que los mismos autores propusieron dos técnicas distintas para gestionar la reprogramación en un sistema tomando en cuenta la energía: a) técnica *match-up* y b) algoritmo memético. Finalmente, Lee et al (2017) mencionan que “hasta ahora, no hay muchos estudios que discutan acerca de la integración entre sostenibilidad y reconfiguración de un sistema”.

1.4 Resumen:

Para concluir, se puede afirmar que el principal aporte de esta revisión sistemática de la literatura realizada es entender los conceptos básicos de reconfiguración y sostenibilidad en sistemas de control de manufactura. Al mismo tiempo, analizar los criterios que tienen en cuenta estos sistemas y cuáles aplican al presente trabajo de investigación. Por otra parte, se presentan los desafíos más representativos de estos sistemas en donde el principal es generar un balance entre métricas de criterios ambientales (eficiencia) y rendimiento (eficacia). Finalmente, se confirma la falta de literatura existente de sistemas que generen el balance mencionado, razón por la cual se realiza el presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO II

PROPUESTA DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL SOSTENIBLE

2.1 Introducción:

El presente capítulo plantea una arquitectura de control sostenible y reconfigurable basada en la revisión literaria del capítulo anterior y de los conceptos claves que se han presentado. El objetivo de esta propuesta es describir detalladamente la arquitectura y su composición tanto externa: a) metas y b) interacción con el ambiente como interna: c) estructura, d) comportamiento y e) dinamismo. Así mismo se detallan sus entidades globales y locales y el mecanismo de reconfiguración a seguir.

El objetivo de dicha arquitectura es lograr un balance entre la **efectividad** del sistema (cumplimiento de objetivos) y la **eficiencia** del sistema (uso apropiado de recursos). En este trabajo, la efectividad será expresada a través de un indicador de rendimiento del sistema y la eficiencia a través de un indicador de consumo de energía del mismo.

Es importante mencionar que esta propuesta es una extensión de una arquitectura ya existente y que es reconfigurable. Dicha arquitectura se denomina Pollux (Jimenez, 2017) y contempla únicamente objetivos de efectividad del sistema. Es por esta limitación que se plantea llevar a cabo el presente trabajo de investigación con el objetivo de incluir

en la medición del sistema su eficiencia. Los lectores interesados en detallar más la arquitectura base de Pollux se pueden dirigir al documento “*Dynamic and hybrid architecture for the optimal reconfiguration of control systems: application to manufacturing control*” para mayor información.

2.2 Pollux: descripción y especificaciones:

Pollux es un sistema de control reconfigurable diseñado para eventos discretos con el fin de gestionar y ajustar la arquitectura de un sistema de control de manera óptima y en tiempo real para a) guiar la ejecución de una operación o b) como respuesta a cambios imprevistos en el sistema controlado. Pollux contiene tres etapas en su mecanismo de reconfiguración que a) detecta una intención de reconfiguración, b) ejecuta una técnica de reconfiguración y c) implementa una nueva arquitectura para ajustar y mejorar el desempeño del sistema. Para este fin, Pollux ejecuta un proceso de reconfiguración que busca una configuración más apropiada según las necesidades actuales y condiciones del sistema.

El proceso de cambiar la configuración de una arquitectura, como se aprecia en la Figura 7, inicia asumiendo que un sistema de control se construye con una configuración flexible y cambiante capaz de adoptar distintas configuraciones factibles dependiendo del nivel de influencia entre las estructuras centralizadas y distribuidas. Al mismo tiempo, cada una de estas configuraciones factibles supe distintos comportamientos emergentes del sistema de control; es por esto que el sistema puede encontrar una configuración óptima entre otras configuraciones factibles.

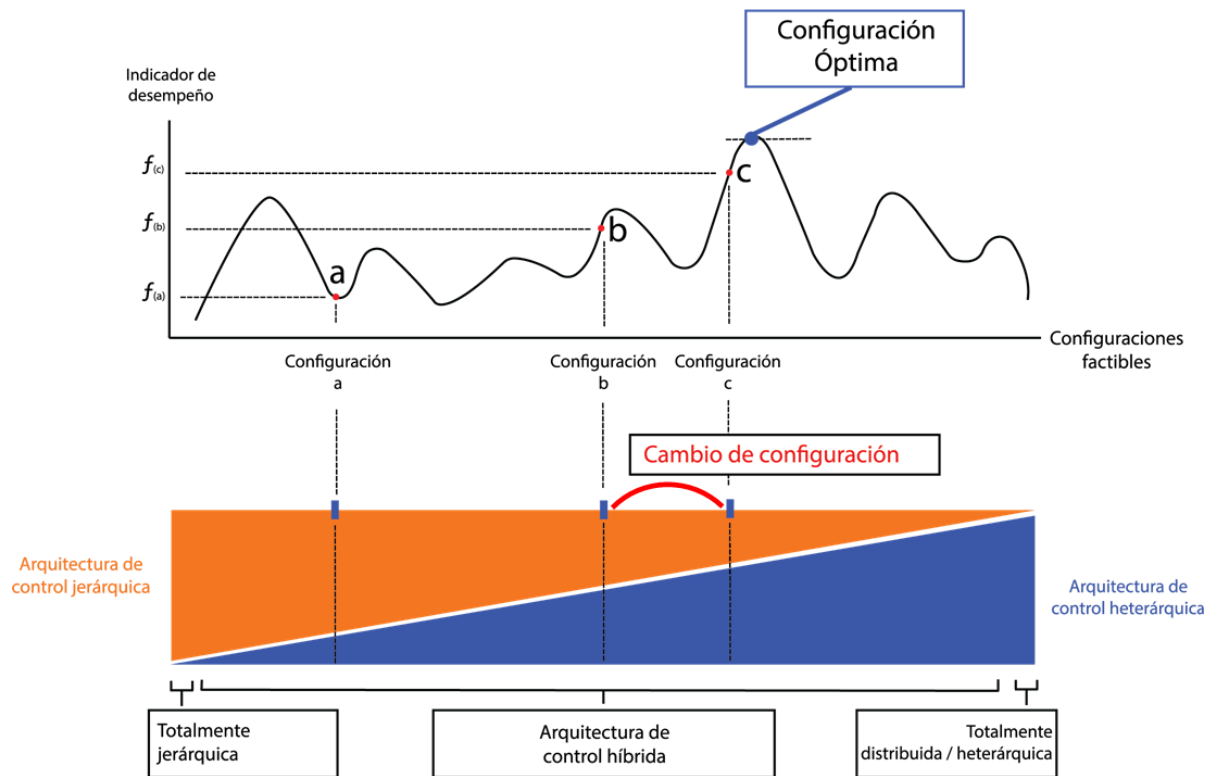


Figura 7. Proceso de cambio de configuración de una arquitectura.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

Como se observa en la Figura 7, hay distintos tipos de configuraciones factibles (A, B y C) que, según su arquitectura y composición, alcanzan varios niveles de desempeño. Las arquitecturas varían entre aquellas centralizadas en un extremo y las totalmente distribuidas en el otro extremo, haciendo que todas aquellas arquitecturas que se encuentren en este rango sean consideradas híbridas. Dado que el sistema debe desempeñarse lo mejor posible, se toma el mejor indicador como punto para definir la arquitectura del sistema y su configuración y así ejecutar su reconfiguración de una arquitectura previamente construida con la que no se alcanza el mejor desempeño global.

Para lograr este cambio, Pollux consiste en una arquitectura de control con características flexibles que pueden ser cambiadas en tiempo real durante la ejecución en distintos niveles: a) componente, b) estructura y c) comportamiento. Al mismo tiempo, Pollux sirve como una arquitectura de referencia de un sistema de control al ser aplicable

a operaciones de cualquier tipo de dominio. Siendo así, Pollux tiene las siguientes especificaciones:

- Divide el problema global en sub-problemas que trabajan en conjunto para alcanzar los objetivos del sistema de control.
- Construye la arquitectura de control en dos capas según las responsabilidades y contribuciones requeridas en el sistema de control. Pueden asignarse entidades a la capa de coordinación si estos agentes contribuyen a la coordinación de tareas y organización de las entidades decisionales. Por otro lado, pueden asignarse entidades a la capa de operación si contribuyen a la ejecución del sistema de control y a completar los sub-problemas asignados.
- Está compuesto de entidades decisionales que representan los componentes de un sistema controlado y que, a través de técnicas de decisión, asumen responsabilidad por completar los sub-problemas asignados.
- Considera entidades decisionales cambiables que permiten tener comportamientos flexibles durante la ejecución. Pollux selecciona parámetros para la constitución de estas entidades conocidos como parámetros de gobernabilidad que pueden cambiarse repetidamente.
- Introduce un modo de operación como una representación de la configuración de la arquitectura de control, cuya composición representa una solución de control con su propio objetivo y estrategia para controlar el sistema controlado.
- Construye un mecanismo de reconfiguración específico que sigue un proceso de iteraciones para mejorar la reactividad del sistema y minimizar la degradación y el deterioro del desempeño global.
- Incluye un módulo que detona la reconfiguración y es responsable por activar el mecanismo de reconfiguración cuando detecta una degradación en el sistema tanto a nivel global como local.
- Incluye un módulo de técnicas de reconfiguración con principios basados en optimización. Esto incluye metaheurísticas, redes neuronales, heurísticas, algoritmos evolucionales, entre otros.

- Incluye un módulo de sincronización de la reconfiguración que implementa un nuevo modo de operación y realiza las acciones y cambios necesarios para que este cambio sea factible.

2.3 Sistema de control reconfigurable y sostenible:

2.3.1 Descripción:

Como se aprecia en la Figura 8, un sistema de control está compuesto por dos sub-sistemas: **mecanismo de reconfiguración** y **arquitectura de control**. El mecanismo de reconfiguración es el sub-sistema que rige las capacidades flexibles y cambiables de la arquitectura de control para mejorar su desempeño. Por otra parte, la arquitectura de control es una composición híbrida y dinámica que controla al sistema controlado de una manera jerárquica o distribuida. Esta arquitectura está compuesta de a) entidades de decisión globales, b) entidades de decisión locales y c) entidades de decisión de recursos conectadas entre sí para interactuar y participar en el proceso de alcanzar los objetivos globales y locales del sistema. Con esta configuración, el sistema de control reconfigurable es capaz de resolver un problema global de control asignado.

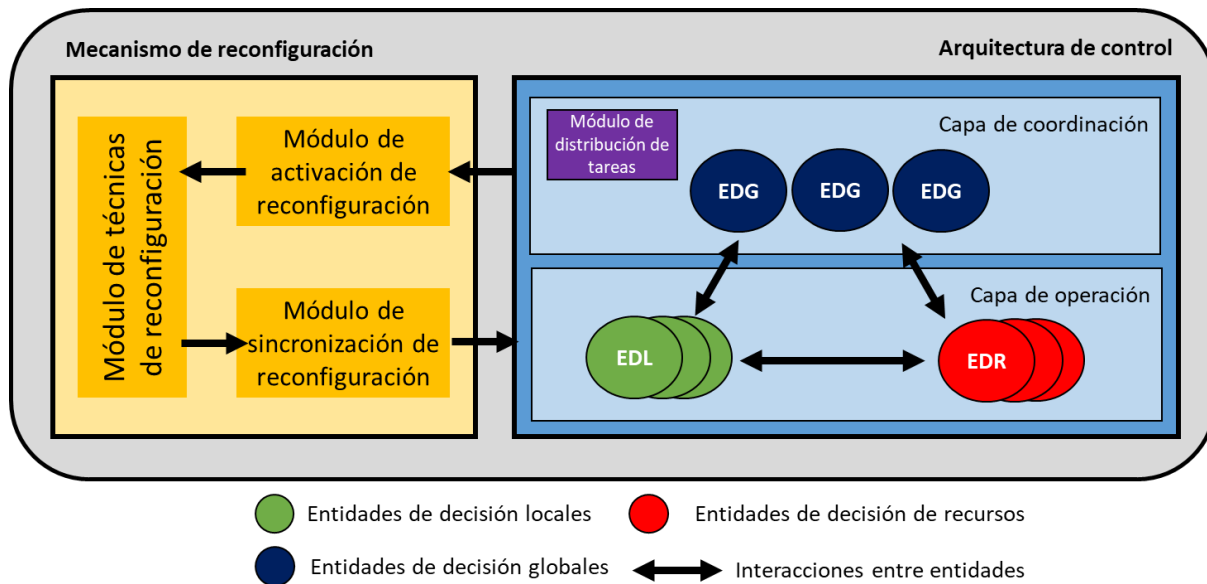


Figura 8. Sistema de control reconfigurable basado en Pollux.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

A continuación se explican los dos sub-sistemas de un sistema de control y los procedimientos y métodos empleados en su arquitectura:

2.3.2 Arquitectura de control:

La arquitectura de control es un conjunto de entidades decisionales, cada una responsable por completar una tarea para dar solución al problema de decisión global.

- **Entidad de decisión:**

Las **entidades de decisión** actúan en conjunto para lograr un objetivo definido por el problema de control global a través de habilidades de reacción y cooperación y de una técnica de toma de decisiones que evalúa la acción a seguir. El objetivo de estas entidades es alcanzar un estado deseable de la entidad, ya sea a través de una métrica o de alguna característica en particular de la misma. Las entidades de decisión son capaces de sentir o percibir, procesar, almacenar y actuar a través del ambiente del sistema de control. En la Figura 9 se aprecia como cada una de ellas tiene componentes de a) decisión que gestionan el comportamiento y las acciones de la entidad basado en

una técnica de toma de decisiones (programación, metaheurísticas, *big data analytics*, heurísticas, entre otras), b) comunicación que accionan la transmisión de información en el sistema físico y de control y otras entidades, c) almacenamiento de información que consolidan la información actual e histórica de la entidad y d) ejecución que inician las acciones de la entidad.

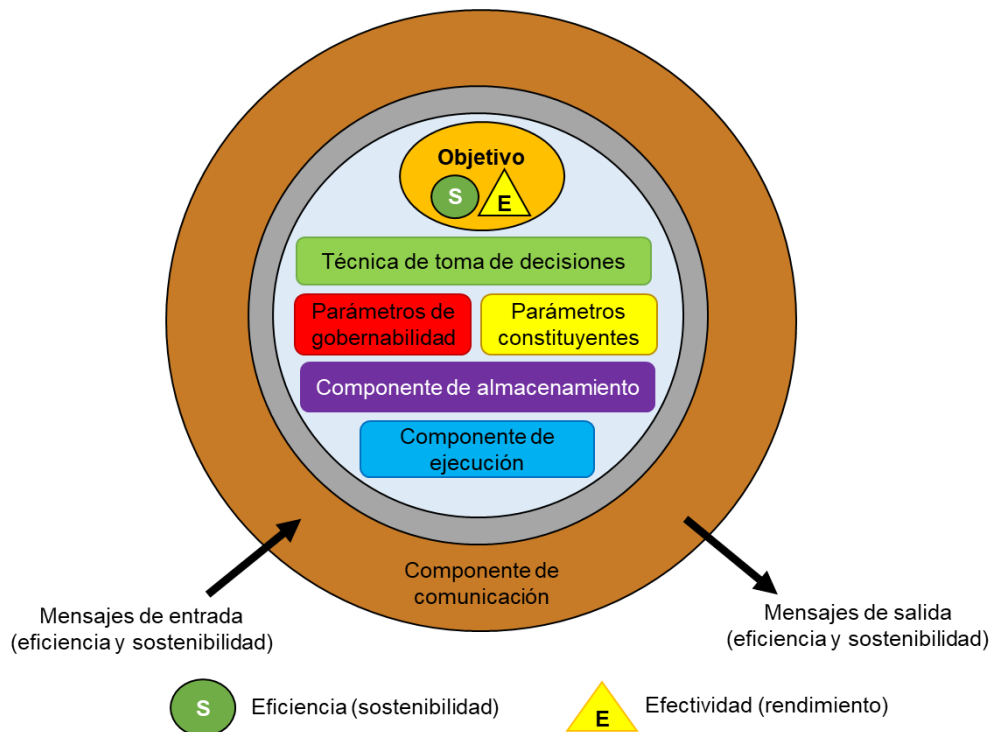


Figura 9. Componentes de una entidad decisional.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

El proceso de una entidad decisional del presente trabajo de investigación inicia cuando percibe del ambiente el status actual del sistema a través del componente de comunicación, como se aprecia en la Figura 10. De este primer paso se obtienen dos tipos de percepciones: a) eficiencia a través de un indicador de sostenibilidad y b) efectividad a través de un indicador de rendimiento. Seguidamente, para poder lograr el objetivo, se activa el componente de decisión a través de la técnica de toma de decisiones que evalúa distintas alternativas de acciones, selecciona una solución basada en el objetivo de la entidad o en su estado de referencia (existe un objetivo de eficiencia

y un objetivo de efectividad) e implementa las acciones correspondientes de eficiencia y efectividad a través del componente de ejecución. Durante la ejecución del proceso, también se miden y almacenan los indicadores de desempeño de eficiencia y efectividad para luego ser comparados con los límites establecidos como aceptables. Es importante mencionar que la configuración de esta entidad decisional es propia del presente trabajo de investigación, donde se incluyen métricas de sostenibilidad en todos los niveles (global, local y de recursos) a las métricas de reconfiguración ya existentes, de aquí la importancia de este sistema propuesto.

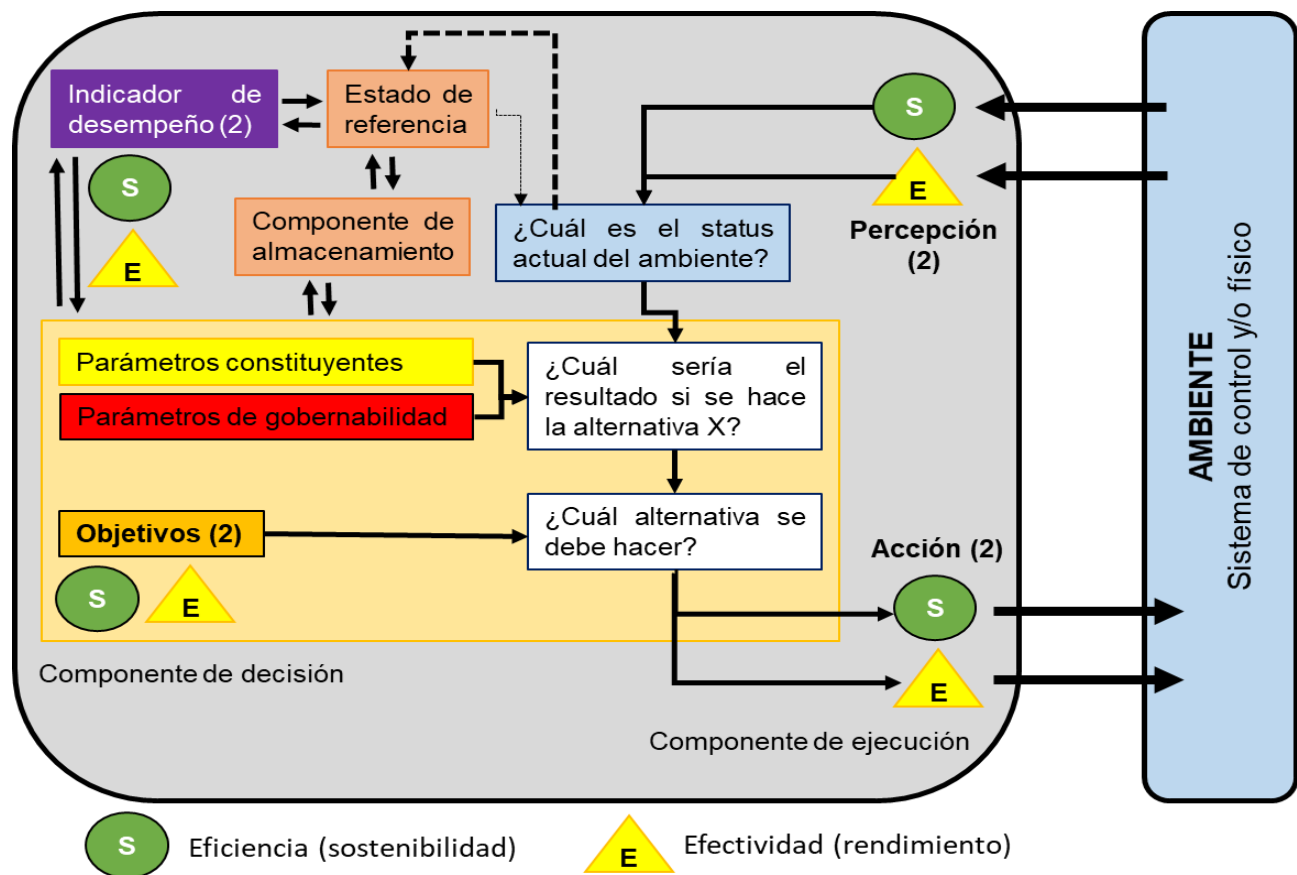


Figura 10. Proceso de una entidad decisional.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

Existen distintos tipos de entidades de decisión. A continuación se detalla brevemente cada una de ellas:

- **Entidad de decisión local (EDL):** representan las entidades que tienen una actividad por completar y su objetivo es completar dicha actividad. Como se mencionó en las especificaciones de Pollux, esta actividad consiste en un sub-problema del problema global del sistema de control. El indicador de desempeño de estas entidades es una métrica que mide la completitud de los objetivos asignados y sirve como estado de referencia para la funcionalidad de la entidad.
- **Entidad de decisión de recursos (EDR):** gestionan los recursos orientados a brindar servicios ubicados en el sistema controlado y son responsables de llevar a cabo las solicitudes hechas por las EDL's y de dar soporte al sistema controlado completando los objetivos asignados en el problema global. El indicador de desempeño de estas entidades es una métrica de eficiencia y efectividad en la completitud de las tareas de las EDL's.
- **Entidad de decisión global (EDG):** colaboran en la completitud del problema global del sistema de control brindando coordinación de las actividades y asegurando el cumplimiento de los objetivos globales. Estas entidades le transmiten información a las EDL's y EDR's para mejorar las operaciones globales. El indicador de desempeño de estas entidades son métricas relacionadas a la completitud y efectividad de la ejecución del sistema.

Como fue mencionado anteriormente, existen dos tipos de capas según las responsabilidades y contribuciones en el sistema de control. Para el presente trabajo de investigación, las entidades de decisión globales se ubican en la capa de coordinación mientras que las entidades de decisión locales y las entidades de decisión de recursos se ubican en la capa de operación.

- **Parámetros de gobernabilidad:**

El comportamiento y estructura del sistema de control está dirigido por los **parámetros de gobernabilidad** de cada una de las entidades de decisión. Estos son un

conjunto de parámetros que definen los atributos, reglas de conducta e interconexión de la entidad decisonal. Estos parámetros son definidos al inicio de la configuración, pero pueden evolucionar durante la ejecución del sistema. Los parámetros de gobernabilidad definen los objetivos, la relación con otras entidades, los roles de las entidades, las técnicas de toma de decisiones y cualquier otro atributo que defina el comportamiento de la entidad decisonal.

La arquitectura de control propuesta en este trabajo de investigación brinda una composición flexible capaz de modificar su estructura y comportamiento durante la ejecución de acuerdo a las necesidades del sistema. La estructura puede ser centralizada, totalmente jerárquica, semi-distribuida o totalmente distribuida; mientras que el comportamiento está dado por las técnicas de toma de decisiones que pueden ser reactivas, predictivas o predictivas-reativas. Dicho esto, los parámetros de gobernabilidad de una entidad de decisión definen la configuración de la estructura y comportamiento de una arquitectura de control como se observa en la Figura 11. Estos parámetros determinan la relación e interacción entre dos entidades de decisión y son la base de la reconfiguración del presente trabajo de investigación, ya que un cambio en estos parámetros altera completamente la arquitectura de control del sistema.

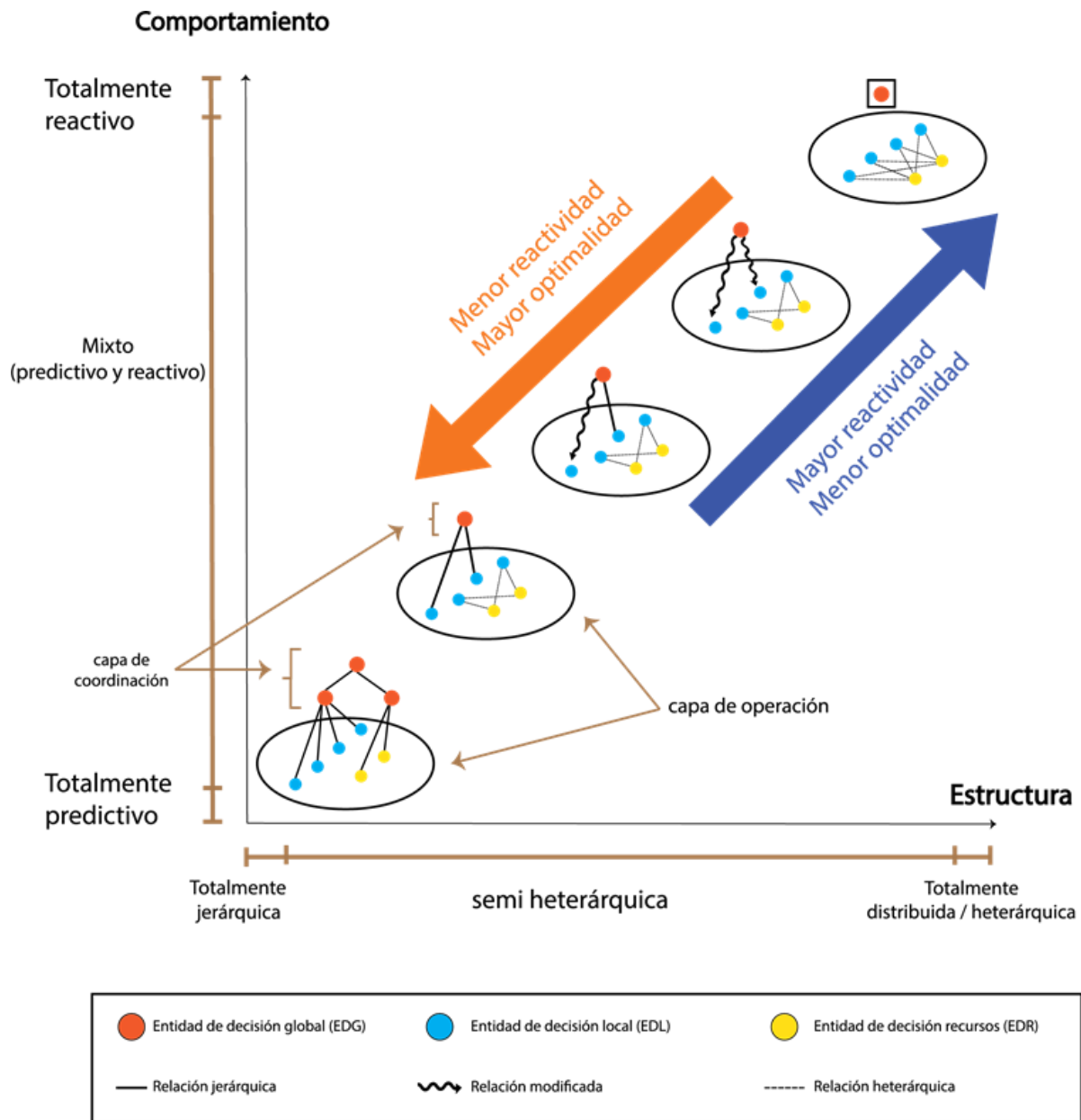


Figura 11. Definición de comportamiento y estructura según parámetros de gobernabilidad.

Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

Los parámetros de gobernabilidad definen: a) el tipo de relación entre dos entidades (centralizada o distribuida) y b) la fuerza o intensidad de la relación entre dos entidades (grado de influencia entre ellas) a través de distintos roles e interacciones como:

- **Coercivo:** instrucciones directas de acciones a ser realizadas por EDL's o EDR's.
 - **Limitante:** relación centralizada modificada en donde la EDG propone un conjunto de alternativas a las EDL's o EDR's que le permiten a estas entidades tomar decisiones dentro de unos límites.
 - **Permisivo:** relación distribuida entre entidades en donde la EDG delega completa autonomía a las EDL's y EDR's según sus propios objetivos, decisiones y acciones.
 - **Coordinación/Negociación:** relación entre entidades del mismo nivel como EDL's con EDR's o viceversa. Las entidades negocian entre ellas según el nivel de atracción e intención que cada una tenga tanto de procesarse como de brindar un servicio.
-
- **Modo de operación:**

El **modo de operación** es una organización o agregación de los parámetros de gobernabilidad de todas las entidades de decisión presentes en el sistema. Es una parametrización específica que establece un ajuste único de la arquitectura de control. Esta representación caracteriza la arquitectura de control, evalúa sus beneficios, distingue sus capacidades y brinda una visión de los resultados esperados. El modo de operación representa, caracteriza y personaliza la arquitectura de control. Dependiendo de la configuración de los parámetros de gobernabilidad, el modo de operación brinda una identificación simple de la estructura y comportamiento de la arquitectura de control. Un ejemplo se ilustra en la Figura 12, donde se aprecia a) un ejemplo de una arquitectura de control y sus entidades de decisión, b) representación de un modo de operación a través de los roles de los parámetros de gobernabilidad y c) el rango de los distintos tipos de modos de operación según los parámetros de gobernabilidad definidos.

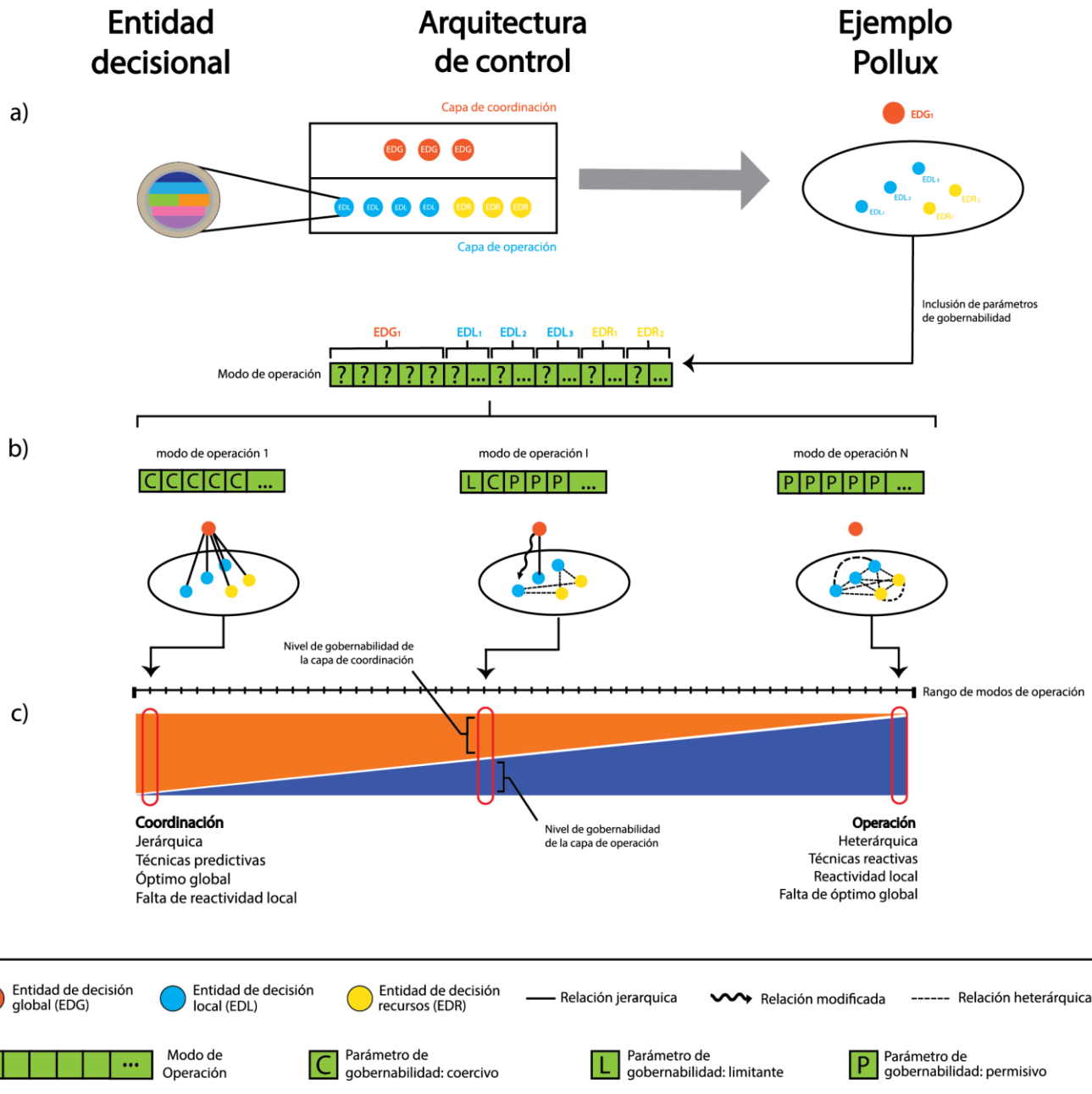


Figura 12. Definición de modo de operación según parámetros de gobernabilidad.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

• **Dinamismo de la arquitectura de control:**

El dinamismo de la arquitectura de control depende del modo de operación ya que su proceso de ejecución sigue una rutina basada en la interacción entre las entidades globales, locales y de recursos. Como se observa en la Figura 13, el proceso inicia antes

de la ejecución en modo *offline* cuando (1) las EDG ejecutan y coordinan las acciones mediante su técnica de toma de decisiones. En este mismo momento, (2) todas las entidades de decisión del sistema están configuradas con un modo de operación inicial definido a través de sus parámetros de gobernabilidad. Luego, (3) cuando inicia la ejecución del sistema o el modo *online*, las EDG de la capa de coordinación envían las acciones a las entidades de decisión de la capa de operación. Por su parte, (4) el sistema físico monitorea el estatus de las entidades de decisión de la capa de operación periódicamente. Así mismo, (5) las EDL ejecutan su técnica de toma de decisiones y actúan según sus parámetros de gobernabilidad. Seguidamente, (6) las EDL buscan una EDR que ejecute sus tareas y (7) actúan sobre el sistema físico. Luego, (8) si el monitoreo del paso 4 resulta en que ya la tarea se está procesando, espera a que sea completada. Si no, inicia la búsqueda de una EDR como menciona el paso 6. El paso (9) hace referencia a que el sistema físico informa cuando la tarea culmina su procesamiento y seguidamente las EDL evalúan si la tarea asignada fue completada (10). Por último, el paso (11) se realiza cuando la EDL culmina su operación o por el contrario (12) si la EDL aún tiene operaciones por realizar vuelve al paso 6.

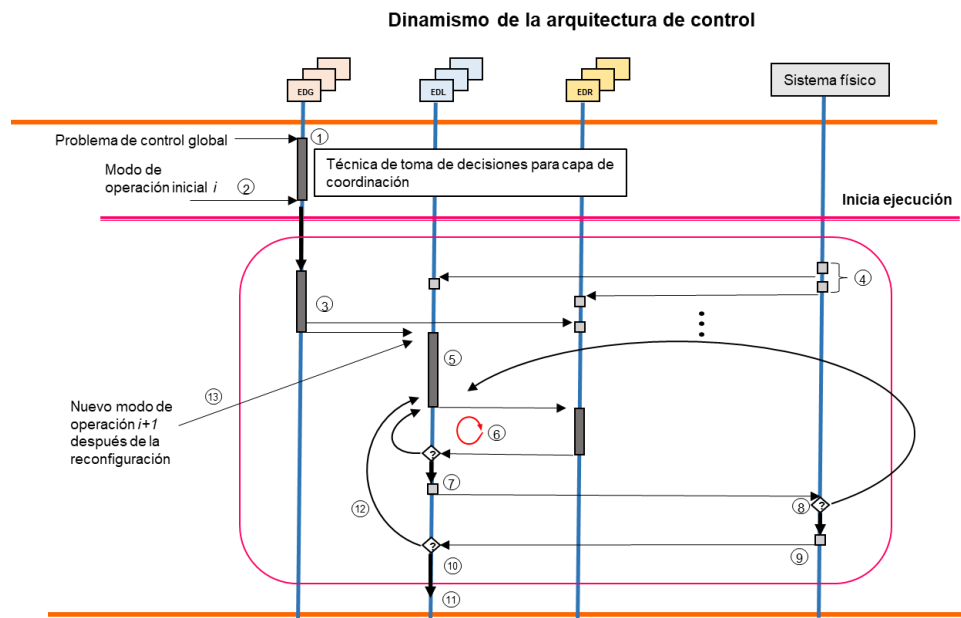


Figura 13. Dinamismo de la arquitectura de control.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

2.3.3 Mecanismo de reconfiguración:

El mecanismo de reconfiguración consiste de tres módulos que funcionan en serie y están diseñados para responder a los retos del sistema de control reconfigurable para mejorar su desempeño. A continuación se detalla cada uno de ellos:

- **Módulo de activación de reconfiguración:**

Este módulo responde a la pregunta ¿cuándo reconfigurar? y es el responsable de monitorear la ejecución de la arquitectura de control y activar su proceso de reconfiguración. La reconfiguración puede ser activada por un evento adverso o disruptivo que deteriora el desempeño del sistema, o también por la detección de una situación beneficiosa como una mejora en el desempeño del sistema. Este módulo monitorea la ejecución y los indicadores del sistema para detectar ya sea una violación de los límites establecidos o tendencias negativas en estas métricas. Finalmente, este módulo utiliza como entrada el status actual de la arquitectura de control y su salida es la activación del proceso de reconfiguración enviando una señal al módulo de técnicas de reconfiguración.

- **Módulo de técnicas de reconfiguración:**

Este módulo responde a las preguntas ¿cómo y qué reconfigurar? y es el responsable por desempeñar el cambio del modo de operación durante la ejecución del sistema y de encontrar un mejor modo de operación. Este proceso de búsqueda considera el status actual del sistema y un conjunto de soluciones posibles que cumplan con el objetivo de reconfiguración a través de un proceso de optimización. Finalmente, este módulo utiliza como entrada el status actual de la arquitectura de control y el punto de reconfiguración dado por el módulo de activación. Su salida es la información de la búsqueda de un nuevo modo de operación realizada y el nuevo modo de operación a ser implementado.

- **Módulo de sincronización de reconfiguración:**

Este módulo responde a la pregunta ¿cómo reconfigurar? y es el responsable de implementar el nuevo modo de operación en la arquitectura de control. Este módulo gestiona la activación de la reconfiguración en el sentido que ajusta el modo de operación para asegurar una implementación factible. Finalmente, este módulo utiliza como entrada el nuevo modo de operación, el estado del sistema al inicio de la implementación y el status actual del sistema. Su salida son las instrucciones a seguir para implementar el nuevo modo de operación, que generalmente consisten en realizar cambios necesarios a los parámetros de gobernabilidad correspondientes en las entidades de decisión.

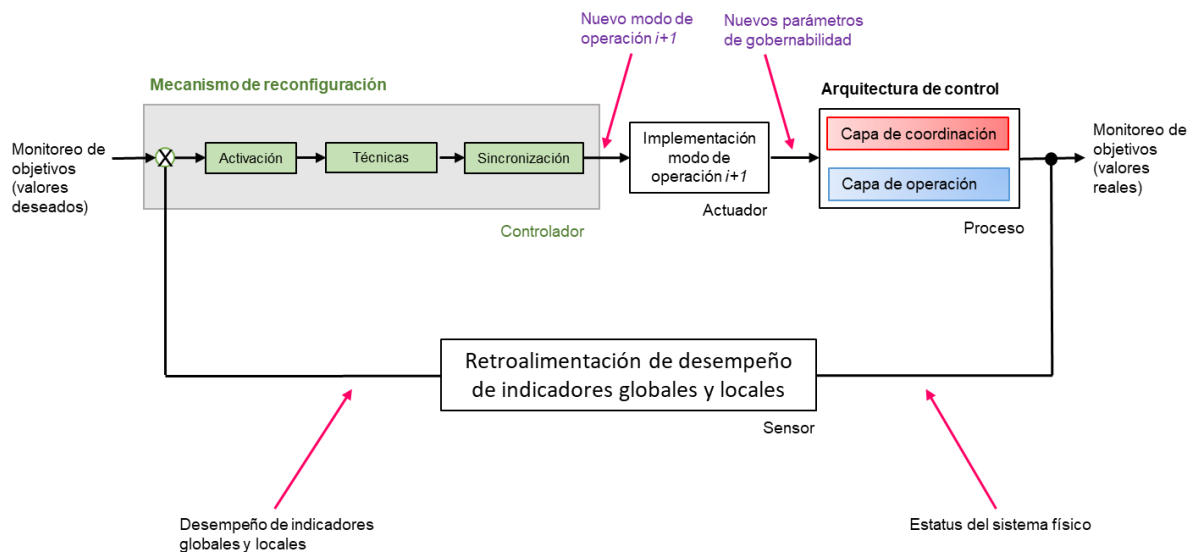


Figura 14. Mecanismo de reconfiguración y su interacción con la arquitectura de control.

Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

Como fue mencionado anteriormente, el mecanismo de reconfiguración es ejecutado para cambiar la configuración de una arquitectura de control a través del uso de un modo de operación particular y parámetros de gobernabilidad específicos (ver Figura 14). La reconfiguración está basada en lo descrito por Walsh et al (2006) previamente, en donde únicamente se contempla un cambio decisional durante el proceso. Durante la ejecución, este mecanismo gestiona los procesos de reconfiguración

y cambia a un modo de operación mejor adaptado a) como respuesta a la detección de una mejora o b) como respuesta a evento disruptivo. El modo de operación seleccionado caracteriza la arquitectura de control y refleja la solución y estrategia para un problema determinado. Así mismo, el mecanismo de reconfiguración pretende encontrar continuamente un modo de operación óptimo y brindar un cambio modificando los parámetros de gobernabilidad correspondientes.

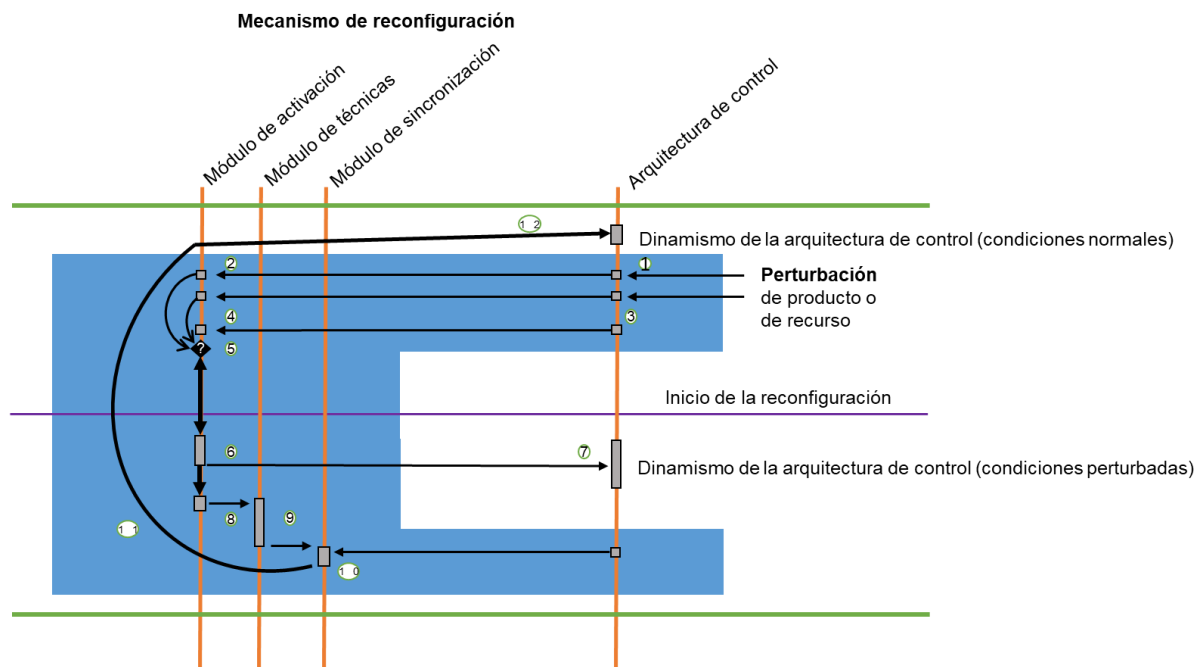


Figura 15. Proceso del mecanismo de reconfiguración.
 Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

Como se aprecia en la Figura 15, todo inicia cuando (1) y (3) el sistema físico detecta una perturbación o un evento disruptivo ya sea de una tarea/producto o de un recurso en las entidades decisionales de la capa de operación (EDL's o EDR's) o también en las entidades de decisión globales (EDG's) que detectan un cambio desde una perspectiva de desempeño global. Luego, (2) y (4) el módulo de activación de la reconfiguración recibe la necesidad de reconfiguración por parte de las EDL's, EDR's y/o EDG's ya sea a nivel local o global. Seguidamente, (5) el módulo de activación de la reconfiguración evalúa las intenciones y el desempeño del sistema y activa la

reconfiguración cuando lo considere necesario. Continuando con el proceso, (6) se evalúa el status de la arquitectura de control y se fija un modo de operación que continúa procesando tareas según su factibilidad. Es así como (7) la arquitectura de control inicia su ejecución siguiendo el modo de operación fijado y (8) el módulo de activación solicita la reconfiguración y brinda los requerimientos y ajustes del proceso de reconfiguración. Una vez llegado a este punto, (9) el módulo de técnicas de reconfiguración ejecuta un algoritmo de búsqueda para encontrar un mejor modo de operación más adaptado y óptimo. Una vez seleccionado el nuevo modo, (10) el módulo de sincronización de reconfiguración repara la acción según la desviación entre lo esperado del nuevo modo de operación y las condiciones reales y actuales de la arquitectura de control. Por último, (11) se implementa el nuevo modo de operación en conjunto con las acciones de reparación en la arquitectura de control a través de los parámetros de gobernabilidad y (12) la arquitectura de control resume su ejecución con el nuevo modo de operación.

Como fue planteado anteriormente, el módulo de técnicas de reconfiguración es responsable de buscar y encontrar un nuevo modo de operación. Este proceso es iterativo y utiliza principios basados en optimización para mejorar la optimalidad de la reconfiguración. A través de este cambio, el sistema puede pasar de tener modos de operación con configuraciones que tienen diversos niveles de gobernabilidad. Esto quiere decir que, basado en el desempeño de la configuración o modo de operación escogido, su nivel de gobernabilidad varía en un rango en donde tiene mayor o menor predominancia la capa de coordinación o la capa de operación de la arquitectura de control. Finalmente, esto se traduce en tener una arquitectura centralizada o distribuida, predictiva o reactiva y enfocada en un óptimo global o reactividad local.

Es importante mencionar que el proceso del mecanismo de reconfiguración en un sistema de control cambia el dinamismo de la arquitectura de control ya que esto depende principalmente de la interacción de las entidades decisionales en una configuración tanto estática como dinámica. Cuando el mecanismo de reconfiguración cambia el modo de operación y los parámetros de gobernabilidad, automáticamente cambia también el comportamiento y ejecución tanto del sistema de control como del sistema controlado.

2.4 Resumen:

Este capítulo describió en detalle la composición externa e interna de la arquitectura de control propuesta con la que se puede construir una arquitectura de control reconfigurable y sostenible que incorpore métricas de eficiencia y de efectividad y genere un balance entre estos indicadores. La importancia de esta arquitectura radica en que la sostenibilidad se incorpora como un nuevo indicador en todos sus niveles, desde las entidades globales hasta las entidades locales y de recursos, permitiendo así poder medir el consumo de energía de un sistema de manufactura flexible y manteniendo su flexibilidad para reconfigurarse. Así mismo, se planteó el mecanismo de reconfiguración con los tres módulos que lo componen, para que de esta manera el sistema de control pueda ser capaz de responder a perturbaciones y adaptarse a nuevas condiciones.

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO

3.1 Introducción:

El presente capítulo describe el modelo de aplicación de la propuesta de control reconfigurable y sostenible a un sistema de manufactura flexible. Lo que se busca con esta aplicación es demostrar distintos modelos y técnicas predictivas-reactivas, con el fin de obtener una solución a un problema de optimización. El sistema de control es capaz de integrar y gestionar estos modelos *offline* y *online* y mostrar la flexibilidad requerida para su reconfiguración, que permitirá finalmente obtener un resultado de eficiencia y efectividad para el sistema de manufactura.

En la primera parte se detallan brevemente los sistemas flexibles de manufactura y su aplicación en el *Flexible Job-Shop Problem (FJSP)*. Seguidamente se describe el caso de estudio y se particulariza la propuesta al presente trabajo de investigación. En esta etapa se detallan la capa de coordinación y la capa de operación con sus respectivas entidades, procesos, métricas, toma de decisiones y parámetros de gobernabilidad. También se desarrolla el mecanismo de reconfiguración aplicado a un sistema de control y el detalle de los cambios internos del sistema cuando ocurre una perturbación. Finalmente, se analizan cuatro casos de estudio, cada escenario con situaciones distintas que serán evaluados en el próximo capítulo para validar la factibilidad de la propuesta.

3.2 Sistemas flexibles de manufactura (FMS):

Los sistemas de manufactura han evolucionado de ser máquinas de bajos volúmenes, gran variedad y gran interacción humana, a ser líneas de grandes volúmenes y baja variedad impulsadas por economías de escala. Dada la necesidad de cambio y adaptabilidad en la industria, con el paso de los años el concepto de sistemas flexibles de manufactura fue introducido “como respuesta a las necesidades de la personalización para tener mayor reacción a cambios en los productos, tecnología y mercados” (ElMaraghy, 2005). Es así como los **sistemas flexibles de manufactura** “son un tipo especial de sistemas de manufactura en donde varios productos son procesados en simultáneo en un ambiente con recursos limitados” (Li et al, 2017). Estos sistemas proveen flexibilidad a través del uso de equipos con alta funcionalidad y ElMaraghy (2005) los define como “un sistema integrado de máquinas modulares y equipos de materiales bajo el control computarizado para el procesamiento automático y aleatorio de piezas”. Así mismo, el mismo autor establece que “tienen como objetivo manufacturar efectivamente distintos tipos de partes con piezas predefinidas que pueden cambiar con el tiempo a un mínimo costo de operación con el volumen y calidad requerido”. Entre las principales ventajas de un FMS se mencionan: a) mejora en el valor competitivo del fabricante, b) incremento de la productividad del sistema, c) reducción del tiempo de preparación del sistema, d) mejora en la utilización y consumo de recursos. Por otra parte, entre sus mayores desventajas se encuentran a) es capaz de requerir un sistema de control inteligente para su implementación y b) requiere una alta inversión inicial para operar.

3.2.1 Flexible Job Shop Problem (FJSP):

La arquitectura de control sostenible propuesta será implementada en un sistema flexible de manufactura conocido como **Flexible Job Shop Problem (FJSP)** en donde las tareas se componen de operaciones y deben seguir una determinada secuencia y una cantidad específica de las mismas. El objetivo del *FJSP* será, a partir de un conjunto de J tareas y R máquinas: a) encontrar la mejor secuencia de operaciones en las

máquinas disponibles para optimizar algún objetivo específico y b) asignar una operación a cada máquina. En la Figura 16 se ilustra el sistema flexible de manufactura a utilizar:

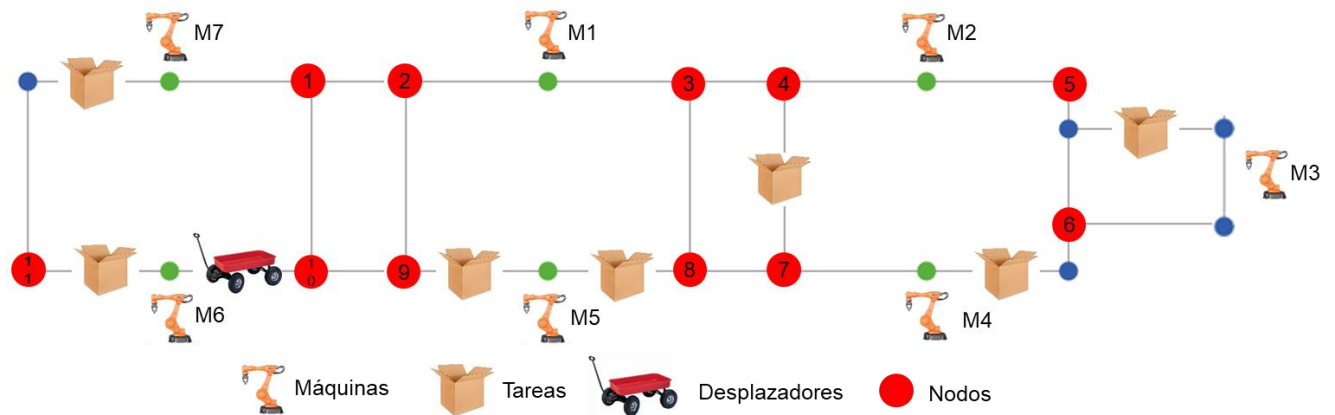


Figura 16. Sistema flexible de manufactura.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Existen muchas formas y variantes de poder definir el *FJSP* dependiendo de los parámetros y condiciones establecidos en cada problema. Es por eso que se dice a mayor flexibilidad, mayor complejidad porque el sistema requiere un mayor nivel de toma de decisiones. Por otra parte, el *FJSP* “es considerado un problema de optimización NP-hard” (Conway et al, 1967) y se presenta como un problema de programación lineal entero mixto. En la Tabla 4 se detalla brevemente la descripción del modelo matemático, basado en Trentesaux et al (2013):

Tabla 4. Descripción breve del modelo matemático de *FJSP*.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Conjuntos y parámetros		Variables	
J	Conjunto de tareas	t_{ij}	Tiempo de completitud de operación O_{ij}
R	Conjunto de máquinas	μ_{ijr}	1 si operación O_{ij} se realiza en máquina r 0 en caso contrario
I_j	Conjunto de operaciones de tarea j	b_{ijkl}	1 si operación O_{ij} se realiza antes de operación O_{kl} 0 en caso contrario
O_{ij}	Operación i de tarea j	tr_{ijr1r2}	1 si tarea j es transportada a máquina $r2$ después de realizar operación O_{ij} 0 en caso contrario
R_{ij}	Conjunto de máquinas que pueden realizar operación O_{ij}	W_{ijr}	Tiempo de espera de operación O_{ij} en cola en máquina r
p_{ij}	Tiempo de procesamiento de operación i	WV_{ijklr}	1 si operación O_{ij} está esperando por operación O_{kl} en la cola de máquina r 0 en caso contrario
tt_{r1r2}	Tiempo de transporte de máquina $r1$ a $r2$	Z_{ij}	1 si tarea l y tarea j están al mismo tiempo en el sistema 0 en caso contrario
MJ	Cantidad máxima de trabajos en simultáneo en el sistema		
ci_r	Cola de entrada de máquina r		
d_j	Fecha de entrega de tarea j		
α_j	Penalización por retraso en tarea j		
β_j	Penalización por adelanto en tarea j		

Es importante mencionar que esta formulación es una particular de este caso de estudio de *FJSP*. Esto puede cambiar según las condiciones y objetivos que se requieran. Adicionalmente, esta formulación no fue utilizada para la resolución del presente trabajo de investigación; es decir, no se realizó resolución por método exacto, por lo que estas fórmulas no fueron incluidas en la simulación.

3.2.2 Caso de estudio:

En la Figura 17 se observa una representación del sistema flexible de manufactura donde se implementará la propuesta, una célula ubicada en la Universidad de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis en Francia llamada AIP-PRIMECA.

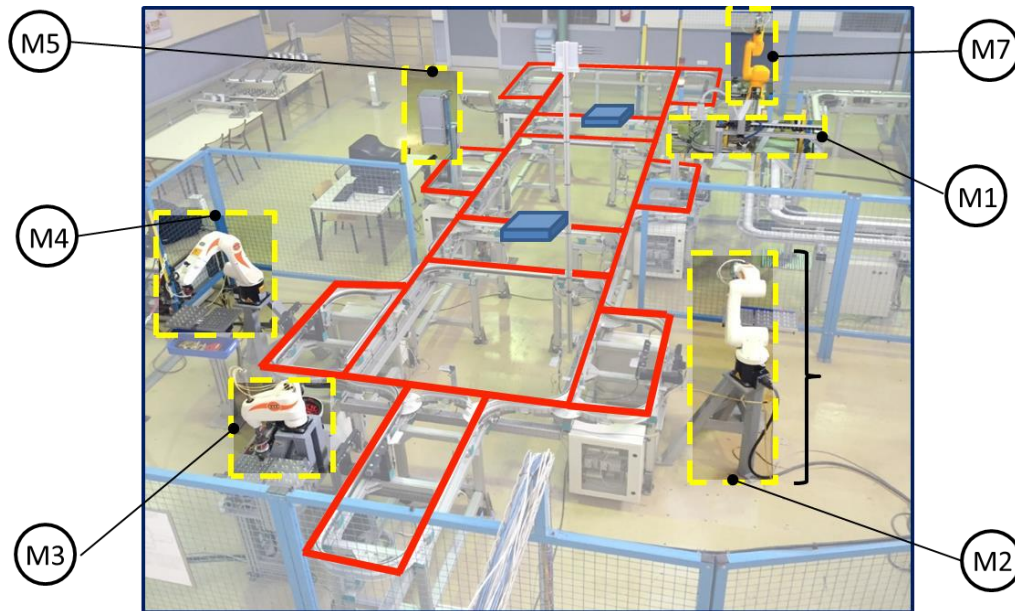


Figura 17. Representación del sistema flexible de manufactura AIP-PRIMECA.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

Los recursos disponibles para el sistema flexible de manufactura a utilizar en este proyecto se muestran en la Tabla 5. Se tendrán 8 operaciones que, a través de 6 componentes, formarán 7 productos distintos (ver Figura 18). Cada uno de ellos se transportará entre 6 máquinas haciendo uso de 10 desplazadores que facilitarán el tránsito por toda la banda transportadora de la línea de manufactura. Finalmente, el sistema se detiene cuando se completan la cantidad de productos ordenados por los clientes.

Tabla 5. Recursos disponibles del FMS a implementar.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Criterio	Cantidad	Descripción
Componentes	6	Plato, eje, r, i, l, tornillo
Tareas / Tipos de productos	7	B, E, L, T, A, I, P
Máquinas	6	M1, M2, M3, M4, M5, M7
Operaciones	8	Carga de producto en plato
		Montaje del eje
		Montaje componente r
		Montaje componente i
		Montaje componente l
		Uso tornillo
		Inspección
		Descarga de producto en plato
Desplazadores	10	-

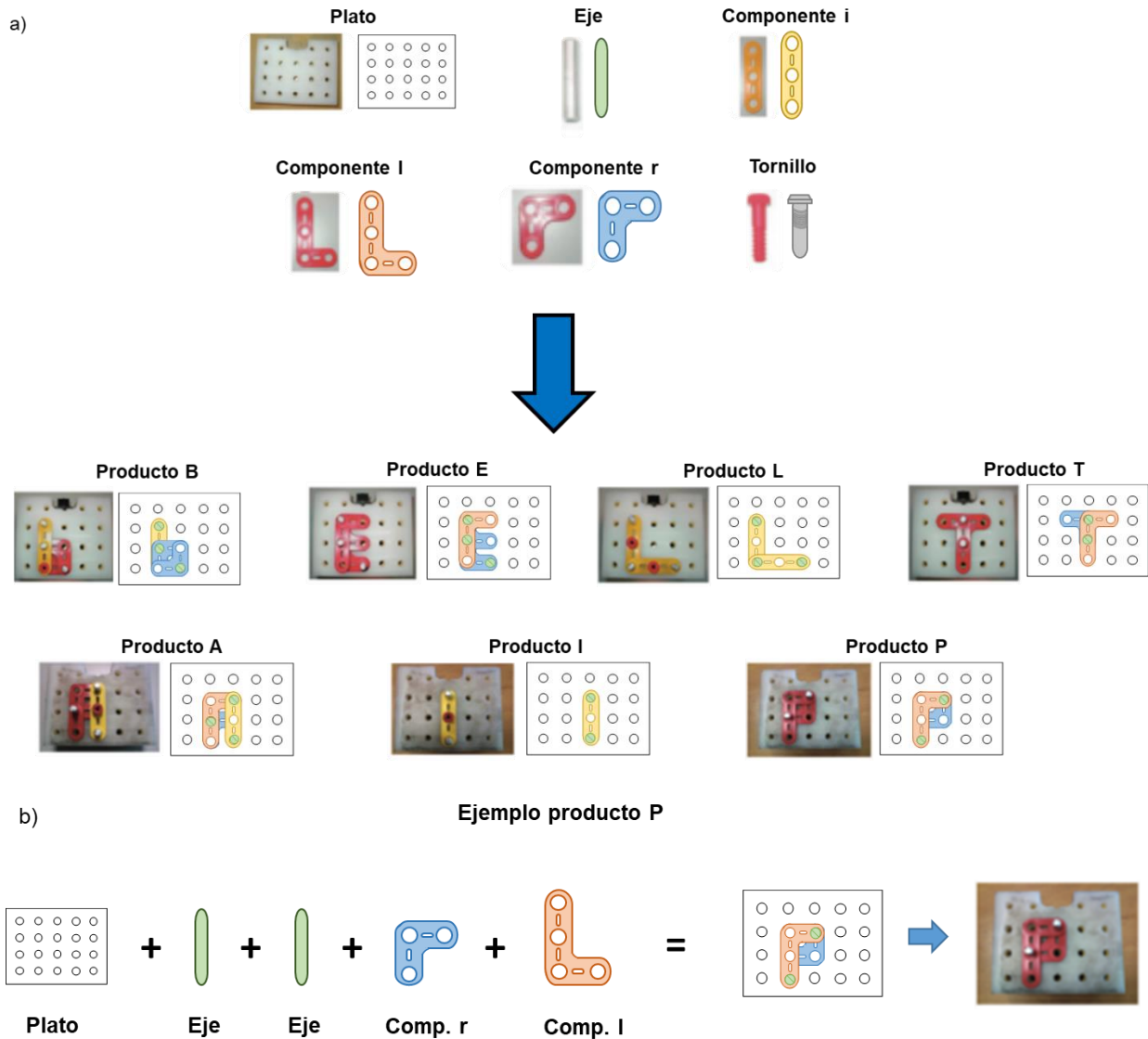


Figura 18. a) Componentes y productos y b) Ejemplo operaciones producto P.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Trentesaux, 2013).

Para poder cumplir los objetivos del *FJSP* previamente mencionados, las actividades de planeación y programación tienen un papel importante. Éstas son las encargadas de asignar los recursos a las actividades necesarias para optimizar los objetivos y alcanzar la meta asignada. Como fue mencionado anteriormente, las tareas deben seguir una secuencia de operaciones para completar un trabajo asignado. Se considera que las operaciones pueden ser procesadas en distintas máquinas y se debe decidir qué máquina ejecuta qué operación ya sea durante la planeación o durante la

ejecución del sistema. En las Tablas 6, 7 y 8 se observa información relevante acerca de las operaciones de cada tarea, las máquinas donde se ejecuta cada operación con sus tiempos de procesamiento, así como los tiempos de transporte entre nodos y máquinas:

Tabla 6. Secuencia de operaciones por producto en orden descendente.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Operación / Tarea	B	E	L	T	A	I	P
Carga de producto en plato	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)
Montaje del eje	✓ (3)	✓ (3)	✓ (3)	✓ (2)	✓ (3)	✓ (2)	✓ (2)
Montaje componente r	✓ (2)	✓ (2)		✓ (1)	✓ (1)		✓ (1)
Montaje componente i	✓ (1)		✓ (2)		✓ (1)	✓ (1)	
Montaje componente l		✓ (1)		✓ (1)	✓ (1)		✓ (1)
Uso tornillo	✓ (1)		✓ (2)		✓ (1)	✓ (1)	
Inspección	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)
Descarga de producto en plato	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)	✓ (1)

Tabla 7. Tiempos de procesamiento de operación en máquina (segundos).
Fuente: Elaboración propia (2019).

Operación / Máquina*	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
# 1: Carga de producto en plato	10						
# 2: Montaje del eje		20	20				
# 3: Montaje componente r		20	20				20
# 4: Montaje componente i			20	20			20
# 5: Montaje componente l		20		20			20
# 6: Uso tornillo			20	20			20
# 7: Inspección					5		
# 8: Descarga de producto en plato	10						

* No se consideran tiempos de encendido de máquina

Tabla 8. Tiempos de transporte entre nodos y máquinas (segundos).
Fuente: Elaboración propia (2019).

Origen / Destino	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
N1	-	4	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-
N2	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-
N3	-	-	-	4	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N4	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-
N5	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-
N6	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-
N7	-	-	-	5	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N8	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	5	-	-
N9	-	5	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-
N10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	7	-
N11	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
M1	-	-	-	6	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-
M4	-	-	-	7	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M5	-	7	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-
M6	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13
M7	-	6	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-

Adicionalmente, las suposiciones tanto de la célula de manufactura como de las tareas del *FJSP* del presente caso de estudio se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Suposiciones del caso de estudio.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Suposiciones	
De la célula de manufactura	La célula del sistema de manufactura tiene un flujo continuo de tareas
	La célula permite que las tareas circulen por todos los vértices sin bloquear el flujo de otra tarea
	Todas las máquinas están disponibles para iniciar producción en el tiempo $t = 0$
	No se consideran tiempos de arranque/encendido de las máquinas
	Una estación de trabajo consiste en una única máquina
	Las máquinas pueden procesar las operaciones de una sola tarea al tiempo
	La máquina queda disponible nuevamente cuando la operación es completada
	No hay procesos de prelación en la célula de manufactura
	Los tiempos de procesamiento de operaciones son determinísticos
	Se permite la recirculación del producto
	Existen órdenes de producción (instancias) que indican los tipos de producto a procesar
	Una orden de producción es un lote de distintos productos con el tipo y cantidad de los productos a procesar
	Cada tarea tiene una secuencia única de operaciones pero distintas rutas de máquinas según la flexibilidad del sistema
De las tareas	Todas las tareas están disponibles para iniciar producción en tiempo $t = 0$
	Una tarea inicia y termina en una máquina específica (de carga/descarga)
	No se consideran tiempos de liberación de tareas al sistema
	Una tarea que vaya a una máquina ocupada espera en fila hasta que la tarea actual deje la máquina
	Una tarea solo puede ser procesada por una máquina al tiempo
	La tarea necesita seguir una secuencia de operaciones estricta de un listado de operaciones

3.3 Particularización del caso de estudio en propuesta:

La arquitectura de control propuesta en este trabajo de investigación estará compuesta por dos capas: a) coordinación y b) operación. La capa de coordinación tendrá una única entidad de decisión global (EDG). Por otra parte, la capa de operación tendrá las entidades locales (EDL) y de recursos (EDR). Las entidades locales serán 35, 70 o 140 dependiendo del escenario planteado y la cantidad de productos a procesar,

mientras que las entidades de recursos serán seis que hacen referencia a las máquinas disponibles en la célula de manufactura. Así mismo, el sistema de control propuesto también contará con un mecanismo de reconfiguración compuesto por tres módulos: a) activación, b) técnicas y c) sincronización con las características mencionadas en la Figura 19:

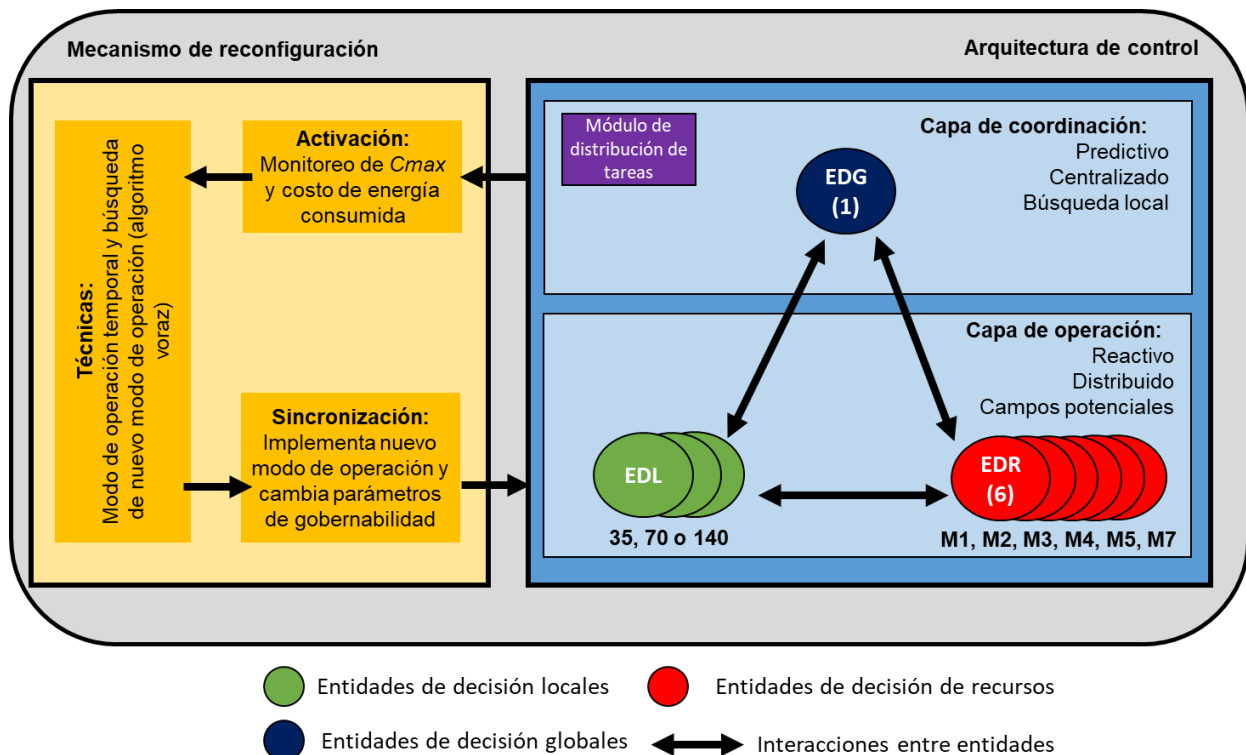


Figura 19. Sistema de control propuesto.
Fuente: Elaboración propia (2019)

A continuación se detallará cada uno de estos componentes y el funcionamiento propuesto para este proyecto de investigación. Cada uno de ellos tiene un modo de ejecución particular, con técnicas y parámetros que permitirán obtener resultados satisfactorios:

3.3.1 Capa de coordinación:

La propuesta de este caso de estudio constará de una primera fase predictiva que será ejecutada por una única entidad de decisión global (EDG) explicada previamente. Esta EDG, como se aprecia en la Figura 20, debe tener una configuración en cuanto a su objetivo o tarea para poder brindar una solución, la métrica con la que medirá dicha solución, la técnica de toma de decisiones a implementar para evaluar la acción a seguir y los parámetros de gobernabilidad para definir su relación con otras entidades.

EDG
<p>Eficiencia: minimizar energía consumida (precio)</p> <p>Efectividad: minimizar C_{max} (s)</p> <p>Técnica de toma de decisiones: Modelo de simulación-optimización con búsqueda local</p> <p>Parámetros de gobernabilidad: coercivo</p>

Figura 20. Caracterización de las EDG.
Fuente: Elaboración propia (2019)

El objetivo de la EDG en esta fase se puede relacionar tanto con eficiencia como con efectividad; es decir, la entidad puede buscar distintas soluciones como desempeño del sistema, tiempos de completitud, desempeño de la ejecución, fecha de entrega de una orden, entre otros. Para el caso específico de esta investigación, el objetivo de eficiencia será minimizar la energía consumida en el sistema, mientras que el objetivo de efectividad será minimizar el tiempo total de procesamiento del sistema. Es por esta razón que el problema se considera como uno multiobjetivo, ya que combina dos objetivos totalmente distintos y brinda una solución final según los resultados obtenidos de tiempo y energía. Esto lo hace tomando en cuenta los pesos o la importancia dada a cada uno de ellos al inicio como se explicará a continuación.

Las métricas son la traducción de los objetivos en indicadores cuantitativos, es decir, a través de ellas se podrá obtener valores reales y cuantificables del objetivo que se esté evaluando para finalmente calcular su desempeño en el sistema. Dado que en

este caso tenemos dos objetivos, también existirán dos métricas o indicadores. El objetivo de eficiencia será representado a través de un indicador denominado costo de energía consumida cuya unidad será en valor monetario (precio), mientras que el objetivo de efectividad será representado a través de un indicador denominado $Cmax$ cuya unidad será s (segundos). Siendo así, la función objetivo de la EDG de la capa de coordinación es calculada de la siguiente manera:

$$Z = W_1 * Cmax + W_2 * E \quad (1)$$

En donde W_1 y W_2 corresponden a los pesos de cada objetivo asignados empíricamente con el fin de obtener valores para que ambos objetivos se asemejen en magnitud y así poder generar un resultado final satisfactorio de minimización. El enfoque utilizado para el cálculo de esta primera fase predictiva estuvo basado en el concepto de optimización multiobjetivo, definido como “un vector de variables de decisión que satisfagan un cierto conjunto de restricciones y optimice un conjunto de funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de los criterios de desempeño que suelen estar en conflicto unos con otros y que se suelen medir en unidades diferentes” (Osyczka, 1985). También, “los problemas multiobjetivo toman en cuenta funciones vectoriales que mapean todos los valores posibles de las funciones objetivo y que representan los criterios no conmensurables que se considerarán” (Coello, 1998). Se entiende el término no conmensurable como el hecho de que los valores de las funciones objetivo estén expresados en diferentes unidades. Adicionalmente, en estos problemas multiobjetivo y en el propuesto en este trabajo de investigación, la noción de óptimo, también conocida como óptimo de Pareto, cambia ya que lo que se busca es que exista un intercambio o *trade-off* entre las partes en vez de una solución única. Para que exista ese intercambio, este trabajo de investigación hizo uso de un agente decisor que estableció, en una etapa inicial, las preferencias entre los objetivos de eficiencia y efectividad asignando intuitivamente pesos a cada uno de ellos indicando su importancia relativa. Se asume que el agente decisor está en capacidad de dar distinción ya que tiene conocimiento sobre el problema que se está resolviendo, lo que le permite decidir sobre las preferencias para encontrar distintas soluciones. Posteriormente, el modelo de optimización buscó una solución basada en estos

parámetros. Como ventaja de este enfoque se mencionan a) los pesos no reflejan proporcionalmente la importancia relativa de los objetivos. Estos coeficientes son factores que, al variarse, localizan puntos diferentes en el conjunto de Pareto, b) es un método muy eficiente desde el punto de vista computacional y c) las soluciones encontradas pueden ser utilizadas como punto de partida para otras técnicas. Por otra parte como desventaja de este enfoque se mencionan a) los resultados pueden variar significativamente conforme se modifiquen los pesos, b) se puede llegar a saber muy poco acerca de la forma más adecuada de elegir estos coeficientes por lo que finalmente el agente decisor toma la decisión basada en su intuición y opinión subjetiva, c) el agente decisor no sabe de antemano lo que es posible alcanzar en el problema y el grado de realismo en sus expectativas, d) dificultad por parte del agente decisor de encontrar pesos para los objetivos que eliminen las características no conmensurables del problema, e) poco conocimiento previo acerca del espacio de búsqueda del problema y f) al no normalizar, se favorecen implícitamente aquellos objetivos que pueden alcanzar mayores valores.

Luego, en cuanto a la técnica de toma de decisiones a utilizar, la EDG se puede configurar con distintas técnicas predictivas capaces de solucionar el problema de asignación de tareas a recursos de manera *offline*. Algunos ejemplos incluyen algoritmos genéticos, métodos exactos, búsqueda local, *Tabu-search*, métodos con inteligencia artificial, entre otros. Para el caso específico de esta investigación, esta fase se basará en un modelo de simulación-optimización con una búsqueda local. Este algoritmo simulará distintas variables de decisión que serán finalmente información importante y relevante para ambos objetivos previamente definidos. Estas variables sobre las que el modelo decidirá son a) orden de entrada de los productos al sistema, b) orden de máquinas a seguir por una operación y c) vector de energía que indica si la máquina 4 y la máquina 7 están encendidas o apagadas en cuyo caso el producto debe esperar para ser procesado. La razón de que las máquinas con vector de energía como variable de decisión sean la 4 y la 7 se debe a que son máquinas consideradas como redundantes ya que procesan operaciones que también procesan otras máquinas, es decir, son máquinas consideradas como segunda opción al momento de un producto decidir dónde procesarse. Siendo así, se implementa la búsqueda local como una heurística en donde

los valores de estas variables varían con cada iteración de la siguiente manera (ver Figura 21):

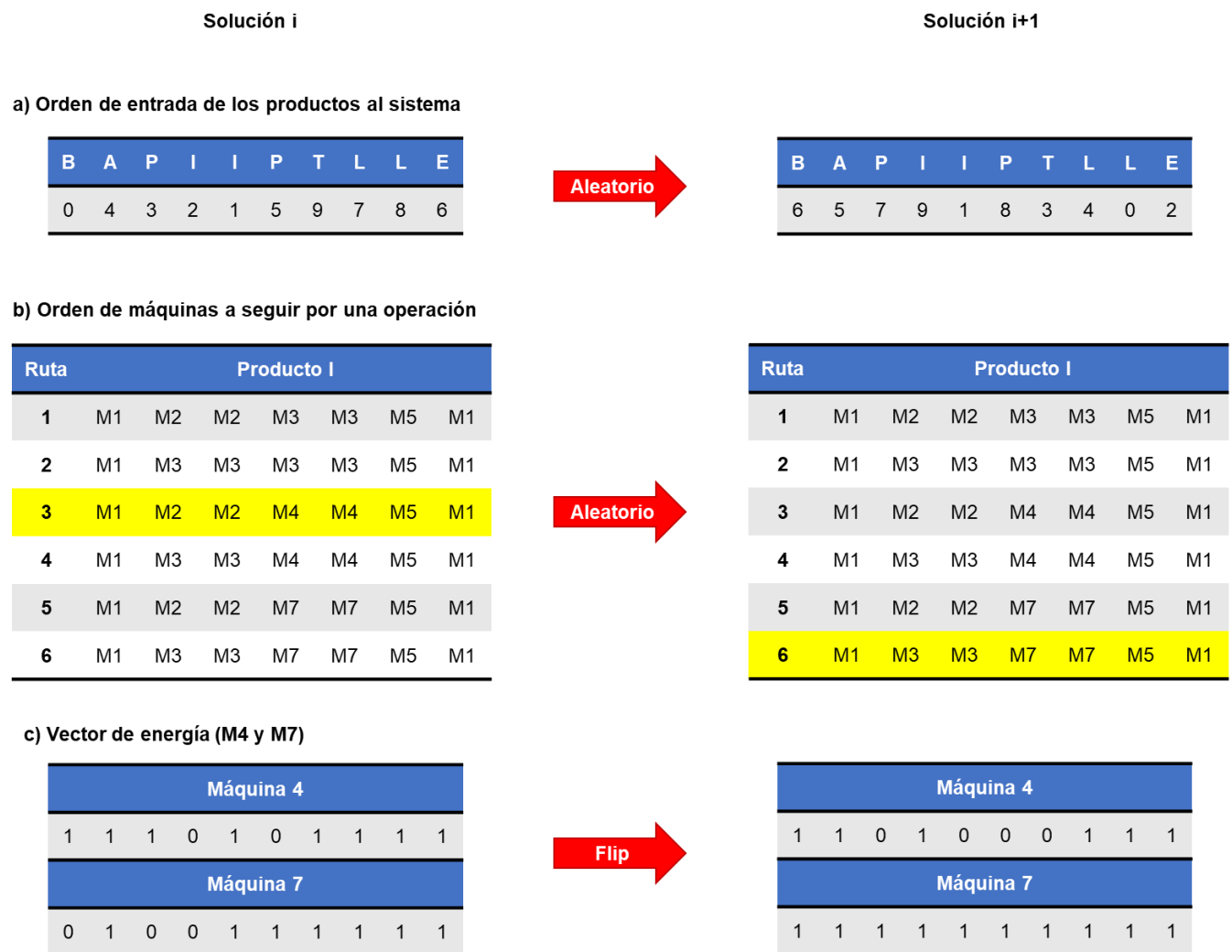


Figura 21. Variables de decisión de búsqueda local.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Para la primera variable de decisión, la heurística cambiará el orden de salida de los productos utilizando un método aleatorio para sortear la secuencia. Luego, en relación al orden de las máquinas, la heurística cambiará a través de un aleatorio nuevamente la ruta que debe seguir el producto según sus operaciones. Dado que hay operaciones que pueden ser procesadas en distintas máquinas, existen varias rutas que un producto puede seguir para completar su procesamiento. Por último, en el vector de

energía, se utiliza la distribución de Bernoulli para generar una regla de cambio de valor de la posición del vector de 0 a 1 o viceversa. Cada posición del vector de energía representa ventanas de tiempo de 5 minutos, razón por la cual la longitud del vector dependerá del tiempo total de procesamiento de los productos en el sistema. Es importante destacar que la heurística toma como base el mejor resultado obtenido hasta el tiempo t , lo que quiere decir que una solución i pasa a ser $i+1$ sólo si mejora las condiciones actuales de la función objetivo previamente explicada. De lo contrario, seguirá iterando los valores de estas tres variables de decisión hasta obtener una solución satisfactoria.

Finalmente, como fue mencionado en el capítulo anterior, las entidades de decisión globales pueden relacionarse con otras entidades de manera coerciva, limitante o permisiva. La EDG se encuentra en la capa de coordinación y los parámetros de gobernabilidad definidos para ella corresponderán a la interacción que tiene con las EDL y EDR de la capa de operación. Para este caso de investigación, los parámetros de gobernabilidad de la EDG serán de tipo coercivo de tal manera que se pueda seguir la planeación y programación de las operaciones de manera predictiva u *offline*.

Como resultado de esta primera fase, el modelo predictivo planea y programa la orden de producción en la célula de manufactura y envía estas variables de decisión a las EDL y EDR de la capa de operación para su ejecución.

3.3.2 Capa de operación:

Al momento de recibir comunicación por parte de la EDG, las EDL y EDR inician una fase reactiva en el sistema. En este caso existen 35, 70 o 140 EDL dependiendo de la cantidad de productos a procesar, y existen seis máquinas como EDR. Al igual que en la fase predictiva, cada EDL y EDR debe tener una caracterización en cuanto a sus objetivos, métricas, técnica de toma de decisiones y parámetros de gobernabilidad. En la Figura 22 se aprecian los parámetros de cada una de estas entidades en este modelo reactivo u *online*.

EDL
<p>Eficiencia: minimizar energía consumida de tarea (precio)</p> <p>Efectividad: garantizar completitud de la tarea (s)</p> <p>Técnica de toma de decisiones: <i>Potential Fields</i> – Atracción</p> <p>Parámetros de gobernabilidad: EDG: coercivo – EDL y EDR: limitante y permisivo</p>
EDR
<p>Eficiencia: minimizar energía consumida en servicio (precio)</p> <p>Efectividad: garantizar servicio</p> <p>Técnica de toma de decisiones: <i>Potential Fields</i> – Intención</p> <p>Parámetros de gobernabilidad: EDG: coercivo – EDL y EDR: limitante y permisivo</p>

Figura 22. Caracterización de las EDL y EDR.
Fuente: Elaboración propia (2019).

El objetivo de las EDL, al igual que la EDG, puede estar relacionado tanto con eficiencia como con efectividad durante la ejecución del proceso, por lo que se asocia con el desempeño de la tarea durante su realización. Entre los ejemplos se mencionan completitud total de la tarea, adelanto o retraso de la tarea, consumo de energía y/o materiales, entre otros. Para este caso particular, el objetivo de eficiencia será minimizar la energía consumida de cada tarea/producto, mientras que el objetivo de efectividad será garantizar la completitud de la tarea. Por otra parte, el objetivo de las EDR también puede ser multi-objetivo y se relaciona con la eficiencia y efectividad que la máquina o recurso brinda de su servicio. Para este caso será minimizar el consumo de energía del servicio en cuanto a eficiencia y garantizar el servicio en cuanto a efectividad; es decir, mantener la disponibilidad. El objetivo del sistema se mantiene como uno multi-objetivo y de minimización de tiempo y costo de energía a través de las variables de decisión mencionadas anteriormente.

En cuanto a las métricas, dado que ambas entidades tienen dos objetivos, también existirán dos métricas o indicadores para cada una de ellas. El objetivo de eficiencia tanto

de las EDL como de las EDR será representado a través de un indicador denominado costo de energía consumida cuya unidad será en valor monetario (precio). Por otra parte, el objetivo de efectividad de las EDL será representado a través de una medición de tiempo en segundos y el objetivo de efectividad de las EDR será una medición de su nivel de servicio de manera tal que mida si cuando un producto se acerca, es capaz de brindar el servicio de procesamiento.

Al mencionar la técnica de toma de decisiones a utilizar tanto para las EDL como para las EDR, es importante destacar que esta fase reactiva u *online* está caracterizada por la implementación de una técnica llamada *Potential Fields (PF)*. *PF* o **campos potenciales** “es un concepto usado tradicionalmente en sistemas reactivos para influenciar el comportamiento de entidades de decisión móviles en ambientes inciertos” (Pach et al, 2012). Estos mismos autores afirman que esta técnica es “totalmente reactiva y heterárquica, fácil de implementar con bajo costo y capaz de reaccionar a perturbaciones en el sistema”. *PF* consta de dos partes denominadas a) atracción e b) intención.

La atracción en campos potenciales hace referencia a los recursos o máquinas que emiten un campo dentro del cual las tareas se sienten más o menos atraídos según ciertas condiciones. Es decir, de acuerdo a Pach et al (2012), la ecuación de un campo potencial se calcula de la siguiente manera:

$$F_{dre}(t) = \frac{\alpha_{re}(t)}{T_{dr}} \quad (2)$$

En donde, T_{dr} se entiende como la distancia entre un nodo d y el recurso r y $\alpha_{re}(t)$ es el nivel de atracción en el tiempo t del recurso r que brinda el servicio S_e , y se calcula así:

$$\alpha_{re}(t) = \frac{S_{re}(t)}{1 + \sum_u \sum_v p_{uv} w_{uvr}(t) + p_{kl} (1 - Z_{klr}(t))} \quad (3)$$

En donde $S_{re}(t)$ es un parámetro binario que tiene valor 1 si el recurso r está disponible para brindar servicio S_e en tiempo t y 0 en caso contrario. Por otra parte, p_{uv} y

P_{kl} son tiempos de procesamiento del producto, $W_{uvr}(t)$ es un parámetro binario que hace referencia a 1 si una operación O_{ij} está en espera para ser atendido por un recurso r y 0 en caso contrario y $Z_{klr}(t)$ es un porcentaje que mide el progreso de la operación O_{ij} en el recurso r en el tiempo t . Finalmente, la ecuación puede ser entendida como a mayor tiempo de espera para que una tarea sea procesada, menor nivel de atracción; a mayor distancia, menor nivel de atracción. Por lo tanto, la probabilidad de que esa tarea se sienta atraída a esa máquina disminuye y la tarea sigue su curso hasta encontrar un recurso con mayor atracción que pueda procesar la operación necesaria.

Por otra parte, la intención en campos potenciales hace referencia a los productos y tareas que emiten una intención o deseo de ser procesadas en un recurso en particular. Es decir, al momento de estar en el sistema flexible de manufactura, las tareas emiten señales para ser captadas por los recursos o máquinas. Estas señales indican la intención de esa tarea de querer ser procesada en un recurso específico. Al mismo tiempo, los recursos tienen un límite mínimo de intenciones con el que se mantienen operando, es decir, en modo activo u operación (ver Figura 23). Si este límite no se cumple, el recurso automáticamente se apaga hasta poder ser reactivado nuevamente con una cantidad mínima de intenciones. Para este proyecto de investigación, las intenciones necesarias para encender la M4 son 1,8; mientras que M7 se enciende con 2,5. Por otra parte, el límite para apagar la M4 es 1,4 y la M7 es 2,2.

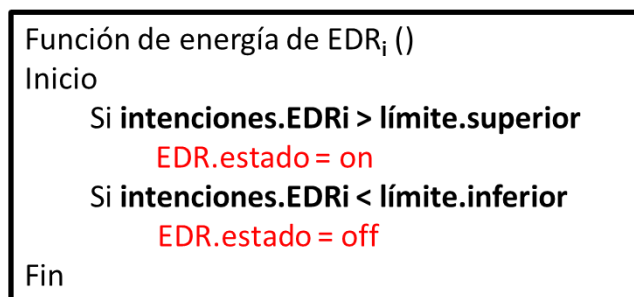


Figura 23. Condición de intención PF .

Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Trentesaux & Giret, 2015).

Finalmente, las entidades de decisión locales y de recursos pueden relacionarse entre ellas de manera atractiva o con intenciones, y con las entidades globales de manera coerciva, limitante o permisiva. Las EDL y EDR se encuentran en la capa de operación y los parámetros de gobernabilidad definidos para cada una de ellas corresponderán a la interacción que tienen con la EDG de la capa de coordinación y el resto de las entidades de la capa de operación. Para este caso de investigación, los parámetros de gobernabilidad de las EDL y EDR serán de tipo coercivo cuando se relacionan con la EDG. Por otro lado, los parámetros de gobernabilidad cuando las EDL y EDR se relacionan dependerán de la negociación que exista entre ellas; es decir, el parámetro puede ser de atracción o de intención según sea la entidad y el campo potencial que emita. Es importante mencionar que tanto las EDL como las EDR no se relacionan entre ellas mismas, únicamente se tendrán en cuenta negociaciones existentes entre entidades de distintos tipos del mismo nivel, es decir, locales con recursos o viceversa.

Como resultado de esta segunda fase, el modelo reactivo de la capa de operación ejecuta las actividades planeadas inicialmente y procesa las operaciones de las tareas según lo programado y de acuerdo a la atracción e intención de cada producto o recurso.

3.3.3 Reconfiguración:

Como tercer mecanismo o modelo de implementación, el sistema de control propuesto tiene la capacidad de reconfigurarse como respuesta a una perturbación y así cambiar su modo de operación inicial de ser necesario. Esta **reconfiguración** ocurre tal como se muestra en la Figura 24, a través del mecanismo de reconfiguración explicado en el capítulo anterior:

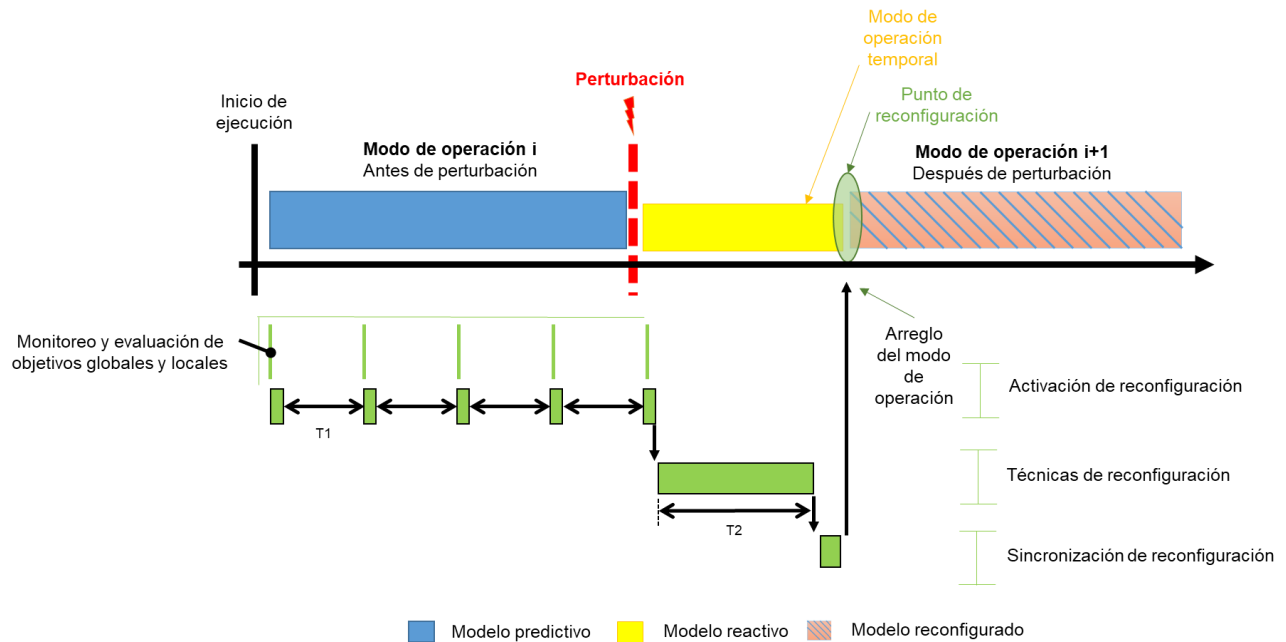


Figura 24. Implementación mecanismo de reconfiguración.
Fuente: Elaboración propia (2019. Adaptado de Jimenez, 2017).

El procesamiento del sistema inicia con un modo de operación i definido inicialmente para la EDG del modelo predictivo. Recordemos que un modo de operación está caracterizado por parámetros de gobernabilidad definidos para cada entidad como un arreglo de las relaciones y negociaciones entre entidades. En este momento, la EDG evalúa los objetivos globales acordados previamente (C_{max} y energía) mientras que las EDL y EDR evalúan los objetivos locales caracterizados en la sección anterior. Cada uno de estos objetivos tiene un límite o meta a partir de la cual sus valores se consideran una infracción o valores no aceptados por el sistema. Es así entonces como el módulo de activación es el responsable de evaluar y monitorear el cumplimiento de estos objetivos dentro de los límites permitidos o establecidos. En caso de infringir estos límites, el sistema detecta una perturbación que deteriora su desempeño y el módulo de activación inicia el mecanismo de reconfiguración emitiendo una señal al módulo de técnicas. Para este proyecto de investigación, la perturbación que se simulará será el aumento del costo del consumo de energía durante el procesamiento de una operación en una máquina. Este aumento de precio de energía por Kw-h (pasará de 0,12 a 0,13) causará que el

sistema active el primer módulo del mecanismo de reconfiguración en un tiempo determinado.

Una vez que el módulo de activación detecta este evento disruptivo, el sistema implementa un modo de operación definido como temporal como respuesta rápida e inmediata al deterioro. Este modo de operación temporal se define como el cambio de los parámetros de gobernabilidad de las entidades cuyos productos o tareas fueron afectados por la perturbación, como se puede apreciar en la Figura 25. Las entidades que no fueron afectadas o cuyo desempeño no fue degradado, mantienen sus parámetros de gobernabilidad originales. Como fue mencionado, este modo de operación es temporal; es decir, al mismo tiempo que esto sucede, el sistema busca un nuevo modo de operación $i+1$ que se ajuste a las nuevas necesidades a través de un proceso de búsqueda ejecutado por el módulo de técnicas de reconfiguración. Para este proyecto de investigación, la búsqueda del nuevo modo de operación se realizará a través de un algoritmo voraz que simulará, haciendo uso de la distribución de Bernoulli, cambios del vector de energía de las máquinas 4 y 7 definido previamente en el modelo predictivo. El algoritmo se encargará de encontrar un nuevo vector para cada máquina redundante que, en el tiempo establecido como recuperación, se considere el mejor por reducir nuevamente la energía consumida del sistema y mejore su indicador. Esto lo logra decidiendo los valores de las posiciones binarias del vector de cada máquina que representan el encendido de la misma con el valor 1 o el apagado con el valor 0 (ver Figura 26). Por último, el tiempo de ocurrencia de la perturbación, así como el tiempo de recuperación para implementar el modelo reconfigurado, fueron establecidos según el desarrollo hecho en el sistema flexible de manufactura donde se implementará la propuesta: AIP-PRIMECA.

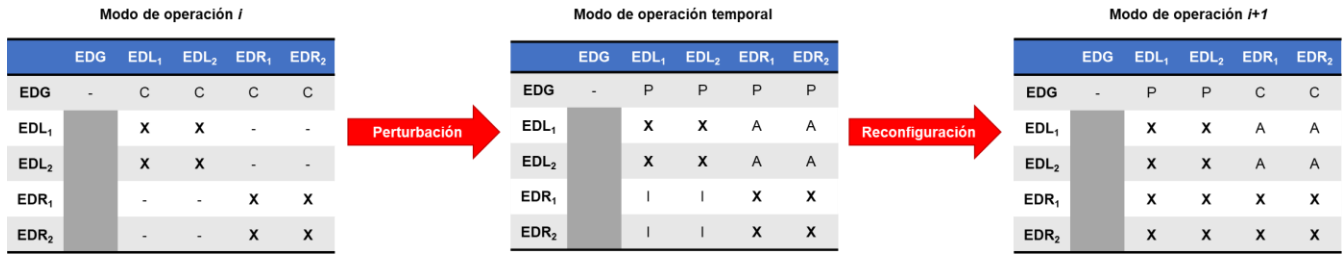


Figura 25. Cambio de modos de operación tomando como referencia 1 EDG, 2 EDL y 2 EDR.

Fuente: Elaboración propia (2019).

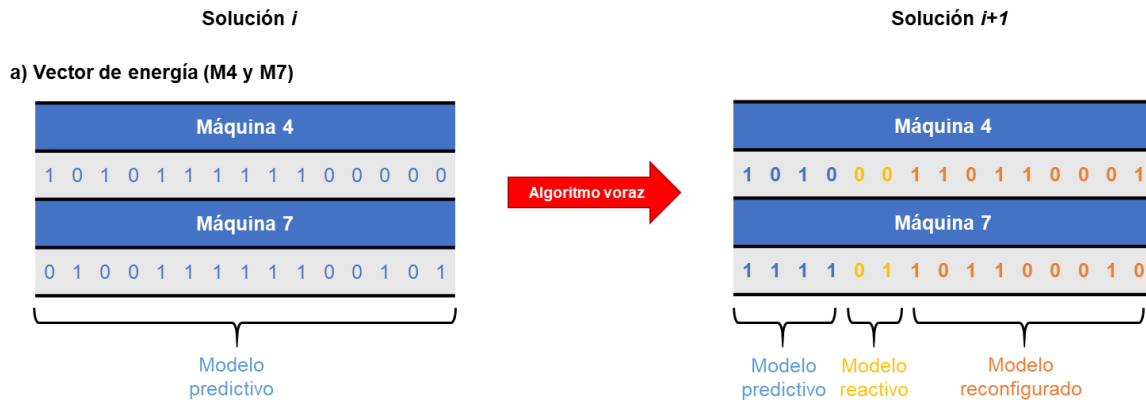


Figura 26. Representación de reconfiguración a través de algoritmo voraz.

Fuente: Elaboración propia (2019).

Finalmente, cuando el módulo de técnicas encuentra un nuevo vector, genera un nuevo modo de operación entre las EDG, EDL y EDR según las relaciones que existan entre ellas. Seguidamente, el módulo de sincronización de reconfiguración es activado para implementar la solución encontrada. Este módulo garantiza que todos los productos puedan realizar sus operaciones sin inconvenientes; es decir, asegura que el nuevo modo de operación sugerido $i+1$ sea factible. Esto lo logra cambiando los parámetros de gobernabilidad, es decir, las relaciones de las entidades que lo requieran para garantizar un desempeño global y local dentro de los límites permitidos. Es importante mencionar que las operaciones a realizar en esta fase son aquellas que aún no han sido procesadas durante la misma ejecución. Es decir, si el sistema ya ejecutó una operación al inicio con el modelo predictivo o reactivo, esta operación ya no es necesario ajustarla en el modelo reconfigurado, únicamente se aplican cambios que tengan cabida. También es necesario destacar que durante la implementación de la reconfiguración, el objetivo del sistema se

mantiene como uno multi-objetivo y de minimización de tiempo y costo de energía a través de las variables de decisión mencionadas anteriormente.

3.4 Escenarios:

Por último, se detallan en la Tabla 10 y Figura 27 cuatro **enfoques o modelos que el sistema de control** puede adoptar como respuesta según su interacción con el medio ambiente y capacidad de reconfiguración:

Tabla 10. Modelos de control a evaluar.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Enfoque	Descripción	Representación
Predictivo	Modelo predictivo sin perturbación durante su ejecución. La arquitectura inicia y termina siendo centralizada. La toma de decisiones se realiza mediante búsqueda local.	
Predictivo con perturbación	Modelo predictivo con perturbación durante su ejecución que deteriora los objetivos de eficiencia y efectividad pero no activa el mecanismo de reconfiguración. La arquitectura inicia y termina siendo centralizada. La toma de decisiones se realiza mediante búsqueda local.	
Reactivo	Modelo reactivo sin perturbación durante su ejecución. La arquitectura inicia y termina siendo distribuida. La toma de decisiones se realiza mediante campos potenciales (atracción e intención).	
Predictivo-Reactivo	Modelo con una perturbación durante su ejecución que deteriora el objetivo de eficiencia del sistema pero no activa el mecanismo de reconfiguración. La arquitectura inicia siendo centralizada y termina siendo distribuida. La toma de decisiones cambia de ser con búsqueda local a ser con campos potenciales.	
Reconfigurado	Modelo con una perturbación durante su ejecución que deteriora el objetivo de eficiencia del sistema y activa el mecanismo de reconfiguración. La arquitectura inicia siendo centralizada, luego distribuida y finalmente queda según el mejor modo de operación encontrado durante la reconfiguración. La toma de decisiones pasa de ser con búsqueda local a campos potenciales y finalmente algoritmo voraz.	

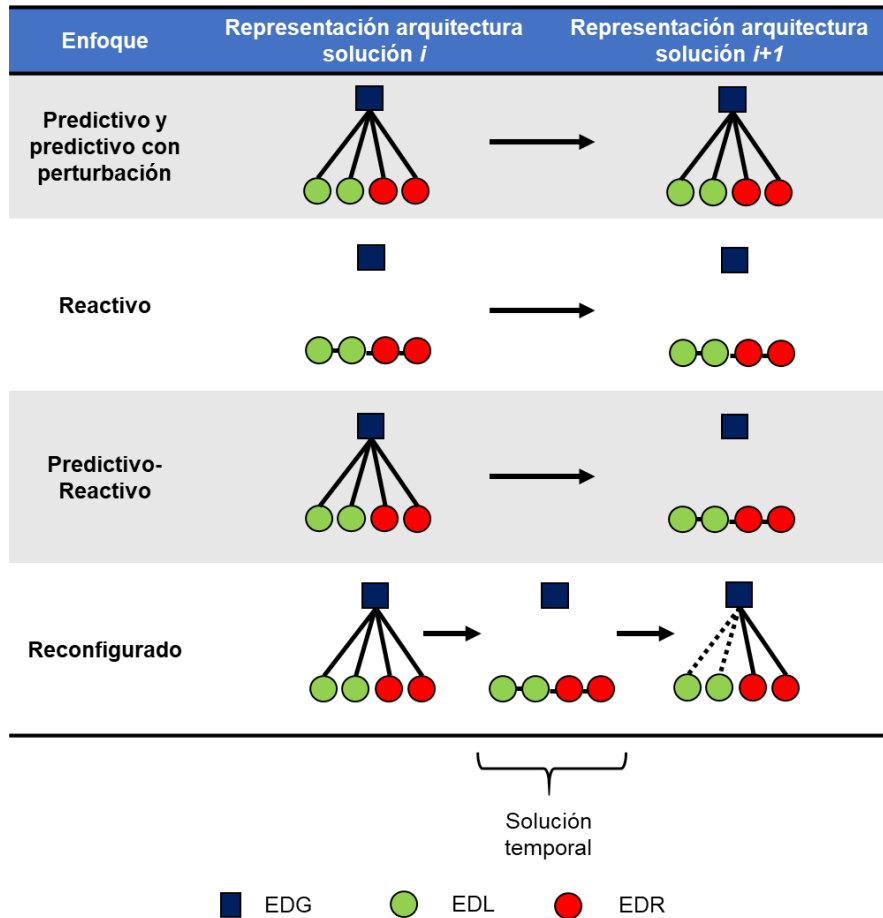


Figura 27. Arquitectura inicial y final según enfoque.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Estos enfoques serán simulados bajo tres escenarios: a) 35 productos, b) 70 productos y c) 140 productos. El objetivo es evaluar el comportamiento del sistema en cada uno de ellos y su capacidad de respuesta y reacción frente a distintas situaciones. Como propuesta de investigación se plantea el modelo reconfigurado. Sus resultados serán comparados con el resto de los enfoques para validar la factibilidad de la propuesta. Esta diversidad de resultados tanto de eficiencia como de efectividad permitirá un mayor análisis y, por consiguiente, mejores oportunidades de mejora. Dichos resultados serán expuestos a continuación.

CAPÍTULO IV

VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Introducción:

Este capítulo implementa la propuesta realizada previamente como caso de estudio y valida los beneficios del enfoque planteado a través de distintos experimentos simulados en una célula de un sistema de manufactura flexible real en Francia. El experimento se llevará a cabo a través de distintos escenarios: a) 35 productos, b) 70 productos y c) 140 productos. Adicionalmente, se tendrán en cuenta distintos enfoques de aplicación del modelo predictivo y reactivo, así como del mecanismo de reconfiguración del sistema de control. La simulación de todos los escenarios planteados se llevará a cabo en un modelo Netlogo que permite obtener resultados de los objetivos propuestos, así como los enfoques de eficacia y efectividad planteados inicialmente en cada entidad de decisión.

4.2 Modelo predictivo:

Para la implementación del modelo predictivo en este proyecto de investigación, se procedió a simular en Netlogo cada escenario con dos distribuciones de Bernoulli distintas: a) 30,70 y b) 50,50. Cada modelo fue simulado 1000 veces, es decir, se obtuvieron resultados de 1000 iteraciones para finalmente, con la búsqueda local,

escoger el mejor en cuanto a: a) orden de entrada de los productos al sistema, b) orden de máquinas a seguir por una operación y c) vector de energía (M4 y M7). Estas variables determinan entonces el mejor valor de la función multi-objetivo del sistema en cuanto a la minimización del C_{max} y el costo del consumo de energía. En la Figura 28 se observa una representación de la simulación y los resultados obtenidos:

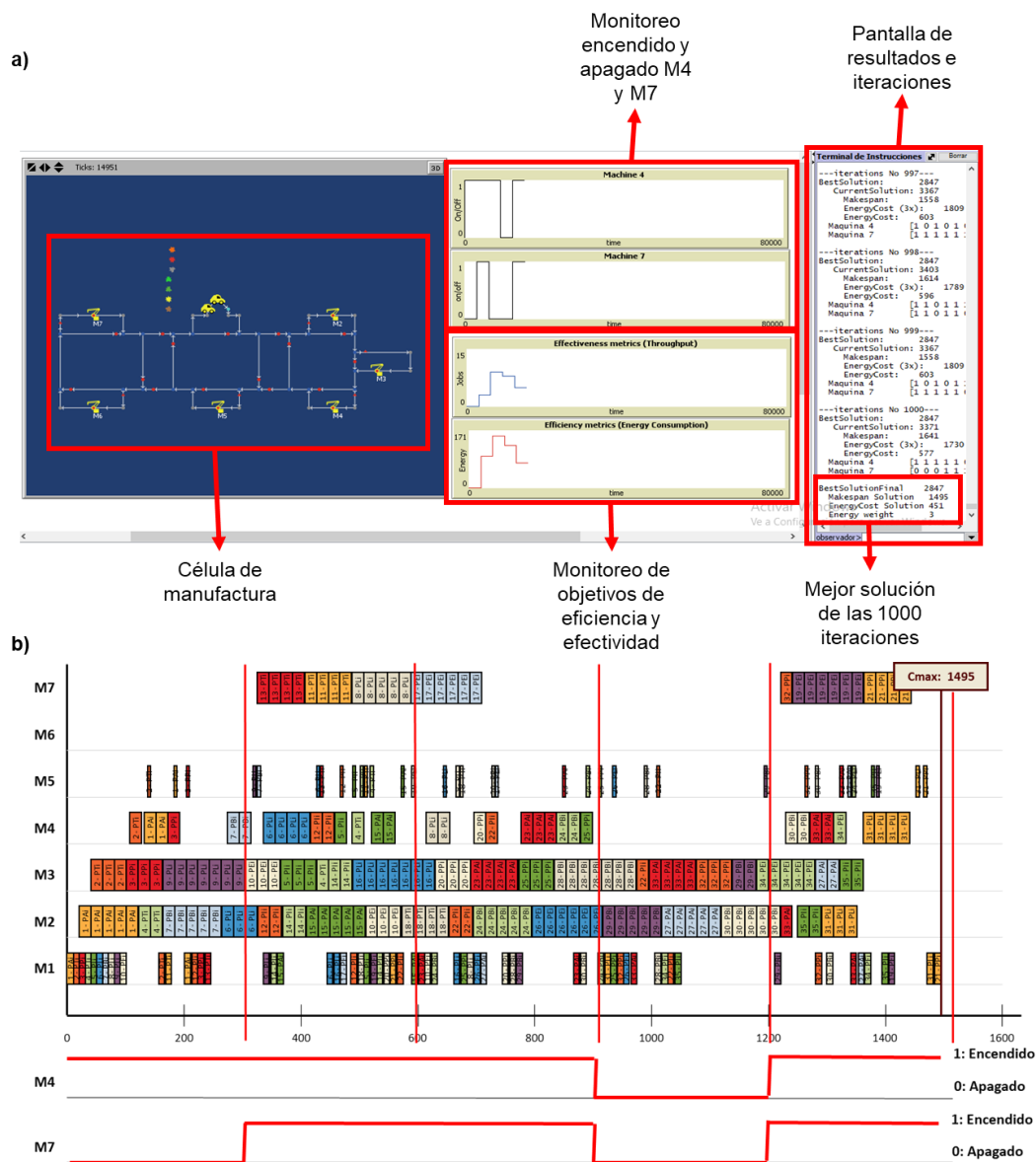


Figura 28. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados con distribución Bernoulli 30,70 y simulación de 35 productos.
Fuente: Elaboración propia (2019).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con este primer enfoque: predictivo únicamente. La Figura 29 muestra los valores de los indicadores de C_{max} y energía para los seis escenarios y combinaciones posibles; así como las respectivas gráficas de monitoreo de efectividad y eficiencia durante la ejecución del sistema de las mejores soluciones encontradas:

Escenario 1 35 productos				
	Efectividad	Eficiencia	C_{max}	Energía
Bernoulli 30,70			1,495	451
Bernoulli 50,50			1,495	451
Escenario 2 70 productos				
	Efectividad	Eficiencia	C_{max}	Energía
Bernoulli 30,70			2,694	1,020
Bernoulli 50,50			2,549	1,099
Escenario 3 140 productos				
	Efectividad	Eficiencia	C_{max}	Energía
Bernoulli 30,70			4,785	2,212
Bernoulli 50,50			5,328	2,221

Figura 29. Resultados modelo predictivo.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Los resultados obtenidos evidencian un aumento del tiempo total de procesamiento C_{max} y del costo de la energía consumida a medida que aumentan la

cantidad de productos en el sistema. Por otra parte, se observa que los valores obtenidos de C_{max} y energía de cada escenario no varían mucho según la distribución utilizada. La distribución de Bernoulli 30,70 implica tener mayor cantidad de valores 1 en el vector de energía de las máquinas 4 y 7, es decir, mayor tiempo de encendido y por consecuencia mayor consumo de energía. Aun así, los valores son muy similares a los de la distribución con Bernoulli 50,50; sin superar el 6% de desviación en efectividad y manteniendo e incluso disminuyendo la eficiencia. Esto quiere decir que no se demuestra una relación clara entre las distribuciones utilizadas y un impacto en los valores obtenidos de efectividad y eficiencia. Sin embargo, aunque en los objetivos del sistema no se observan grandes desviaciones, sí se ven cambios durante la ejecución. Es decir, las gráficas muestran variaciones significativas de efectividad y eficiencia mientras los productos son procesados.

Finalmente, con los valores obtenidos de cada combinación escenario/distribución, se procedió a graficar la dupla obtenida como resultado de C_{max} y energía, como se aprecia en la Figura 30:

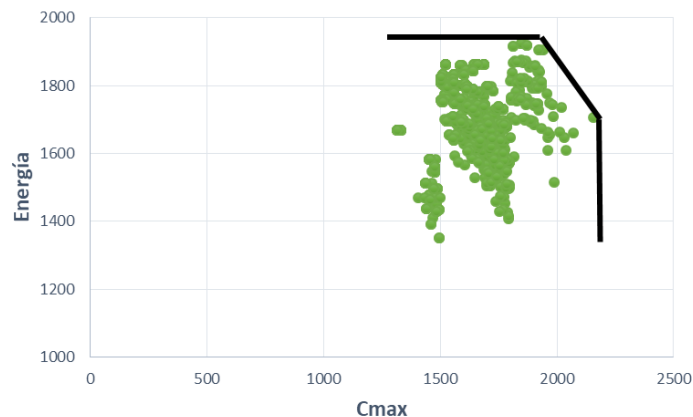


Figura 30. Valores dupla tiempo y energía.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Con la construcción de estas gráficas, se pudo validar la dispersión de los datos y la distribución de los valores de todas las iteraciones realizadas. Adicionalmente, se determinó que el peso del objetivo de energía de la ecuación (1) mencionada en el

capítulo anterior es de 3 para poder comparar valores de tiempo y energía en magnitudes similares.

Adicionalmente se procedió a simular el mismo modelo predictivo con una perturbación para validar la degradación del sistema en los dos objetivos. Esta perturbación estuvo reflejada como el aumento del costo de la energía y el sistema no accionó ningún mecanismo de reconfiguración para intentar mejorar su desempeño. Sus resultados se muestran a continuación en la Figura 31:

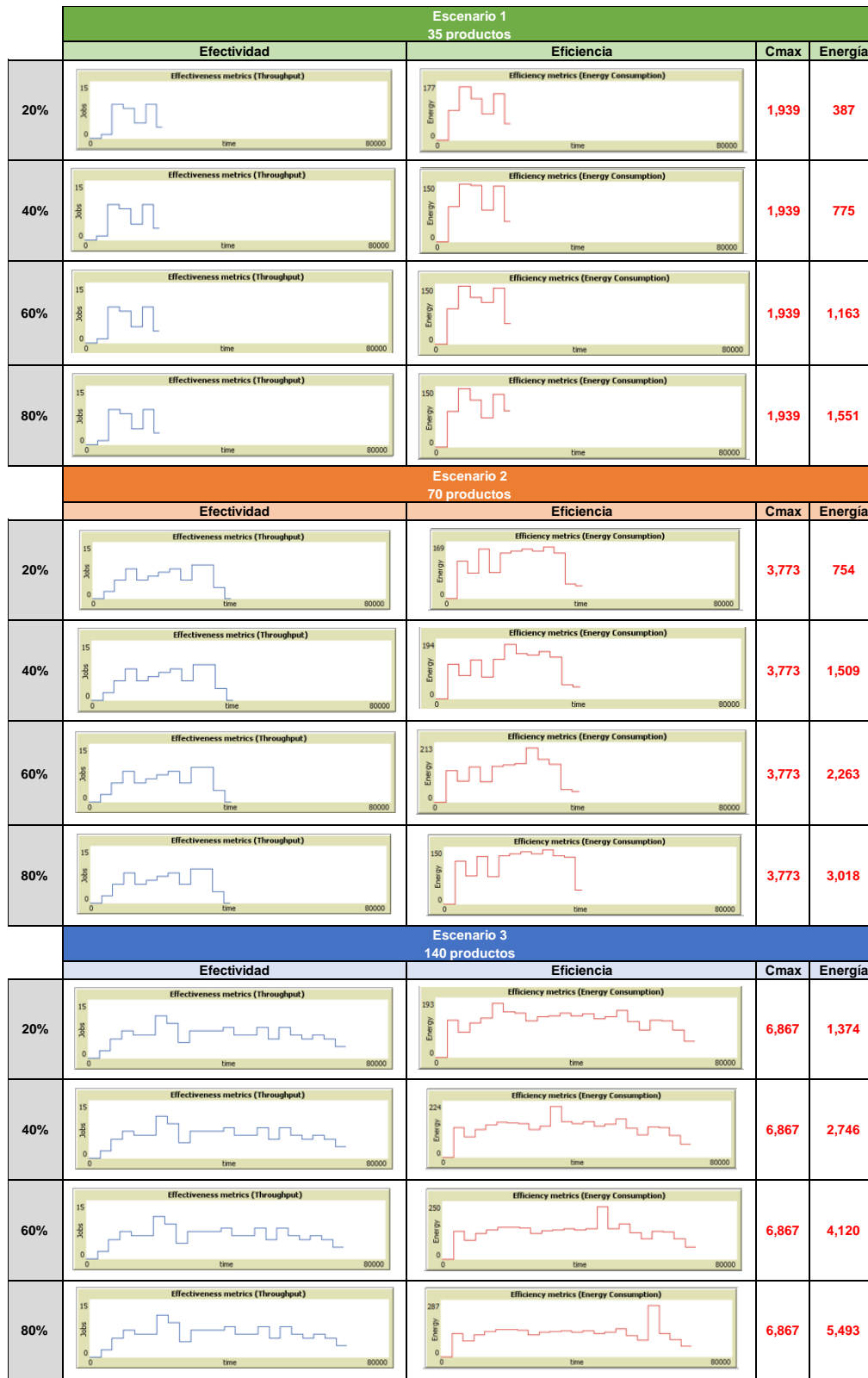


Figura 31. Resultados modelo predictivo con perturbación.
Fuente: Elaboración propia (2019).

En el Anexo 2 se muestran las restantes gráficas de duplas, así como los Diagramas de Gantt obtenidos para cada resultado del modelo predictivo.

4.3 Modelo reactivo:

Para la implementación del modelo reactivo en este proyecto de investigación, se procedió a simular en Netlogo cada escenario con dos situaciones distintas: a) haciendo uso de campos potenciales con atracción únicamente y b) haciendo uso de campos potenciales con atracción e intención. Cada situación fue simulada para finalmente obtener el mejor resultado en cuanto a: a) orden de entrada de los productos al sistema, b) orden de máquinas a seguir por una operación y c) vector de energía (M4 y M7). Estas variables determinan entonces el mejor valor de la función multi-objetivo del sistema en cuanto a la minimización del C_{max} y el costo del consumo de energía. En la Figura 32 se observa una representación de la simulación y los resultados obtenidos:

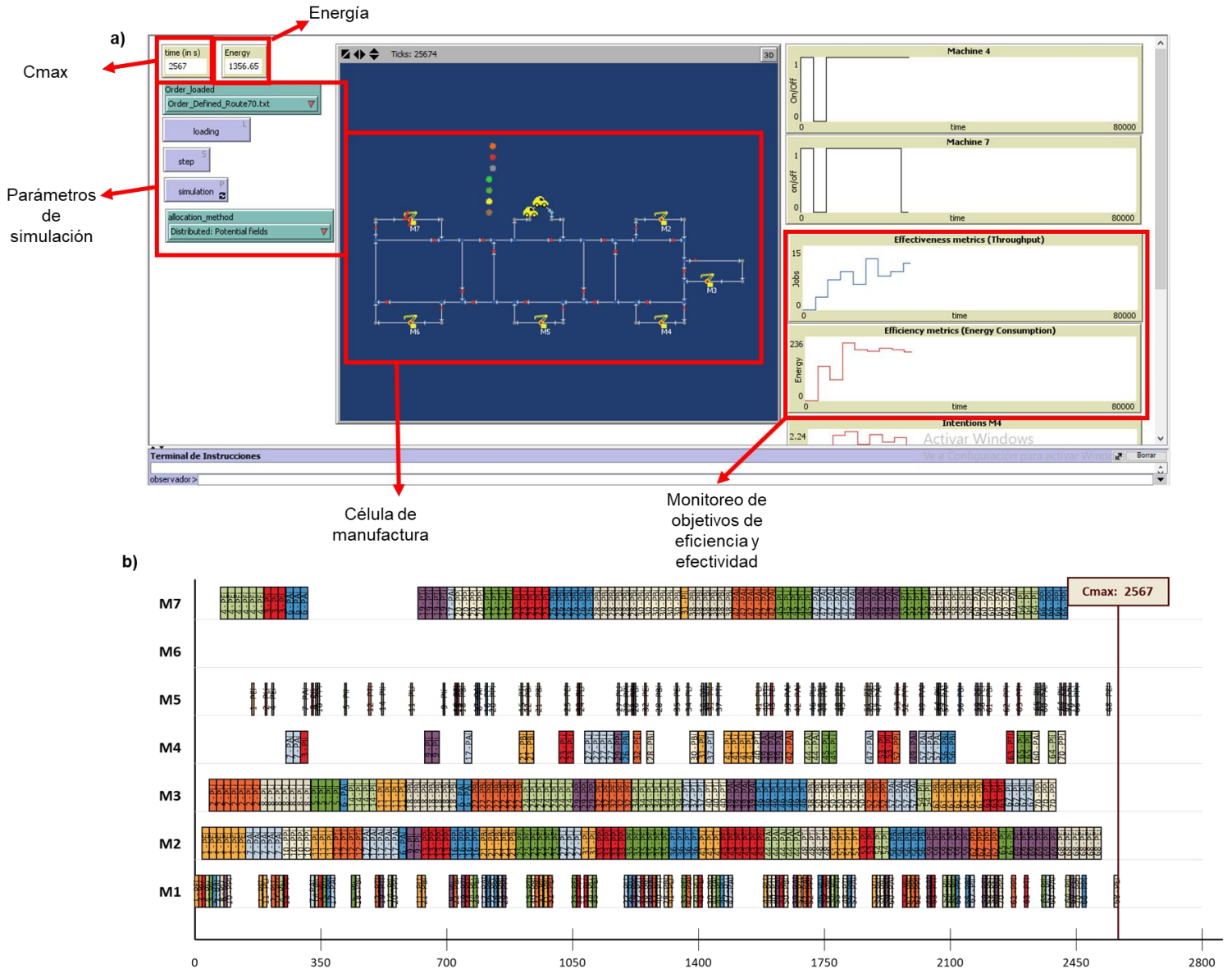


Figura 32. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados de atracción e intención y simulación de 70 productos.

Fuente: Elaboración propia (2019).

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el segundo enfoque: reactivo únicamente. La Figura 33 muestra los valores de los indicadores de C_{max} y energía para los seis escenarios y combinaciones posibles; así como las respectivas gráficas de monitoreo de efectividad y eficiencia durante la ejecución del sistema de las mejores soluciones encontradas:

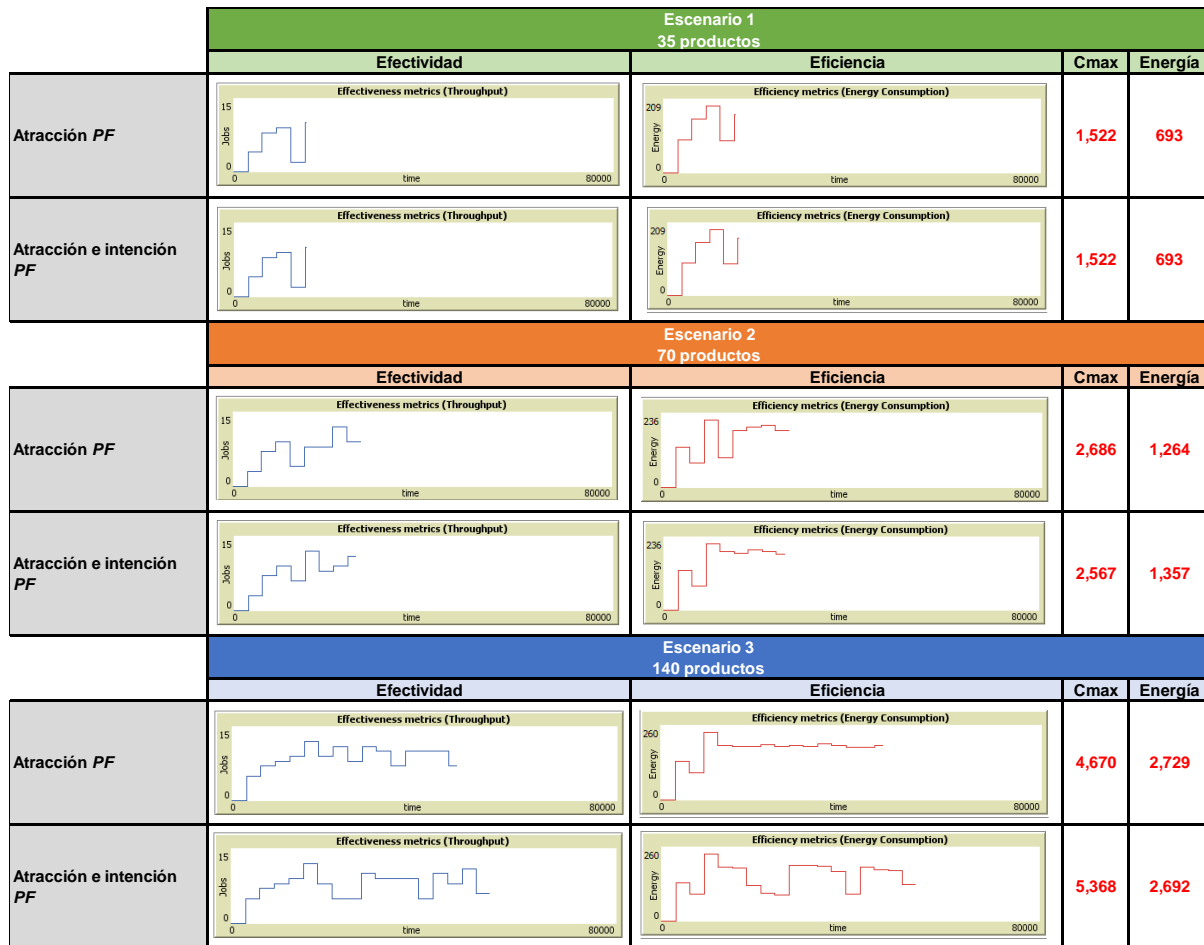


Figura 33. Resultados modelo reactivo.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Los resultados obtenidos evidencian un aumento del tiempo total de procesamiento C_{max} y del costo de la energía consumida a medida que aumentan la cantidad de productos en el sistema. Por otra parte, se observa que los valores obtenidos de C_{max} y energía de cada escenario no varían mucho según el modelo utilizado, es decir, los valores obtenidos con campos potenciales con atracción únicamente se asemejan a los valores obtenidos con campos potenciales de atracción e intención. Esto demuestra que el uso de campos potenciales tanto para las EDL como para las EDR puede llegar a ser un resultado satisfactorio que no degrada el desempeño del sistema. Adicionalmente, se muestran picos importantes a medida que los escenarios incrementan la cantidad de productos. Esto evidencia que, a mayor cantidad de atracciones e intenciones, el sistema tiene altos y bajos de desempeño durante su

ejecución. Por último, se demuestra que la atracción en campos potenciales es un protocolo que únicamente toma en cuenta la efectividad del sistema; es decir, el tiempo total de procesamiento. Por otra parte, el protocolo de intenciones toma en cuenta la eficiencia del sistema ya que decide, basado en la cantidad de las mismas, si una máquina se prende o se apaga y por consecuencia, si gasta o no energía.

En el Anexo 3 se muestran los restantes Diagramas de Gantt obtenidos para cada resultado del modelo reactivo.

4.4 Modelo predictivo-reactivo:

Para la implementación del modelo predictivo-reactivo en este proyecto de investigación, se procedió a simular en Netlogo cada escenario bajo cuatro situaciones distintas dependiendo del momento de la perturbación según el tiempo total de procesamiento del sistema: a) 20%, b) 40%, c) 60% y d) 80%. Cada situación fue simulada para finalmente obtener el mejor resultado en cuanto a: a) orden de entrada de los productos al sistema, b) orden de máquinas a seguir por una operación y c) vector de energía (M4 y M7). Estas variables determinan entonces el mejor valor de la función multi-objetivo del sistema en cuanto a la minimización del C_{max} y el costo del consumo de energía. Adicionalmente, este modelo consistió en una primera parte *offline* o predictiva que, como respuesta a una perturbación en el sistema, cambió a *online* o reactiva hasta el fin de su ejecución. Recordemos que la perturbación simulada es el incremento del costo del consumo de energía, como se puede apreciar en la Figura 34 donde se observa una representación de la simulación y los resultados obtenidos:

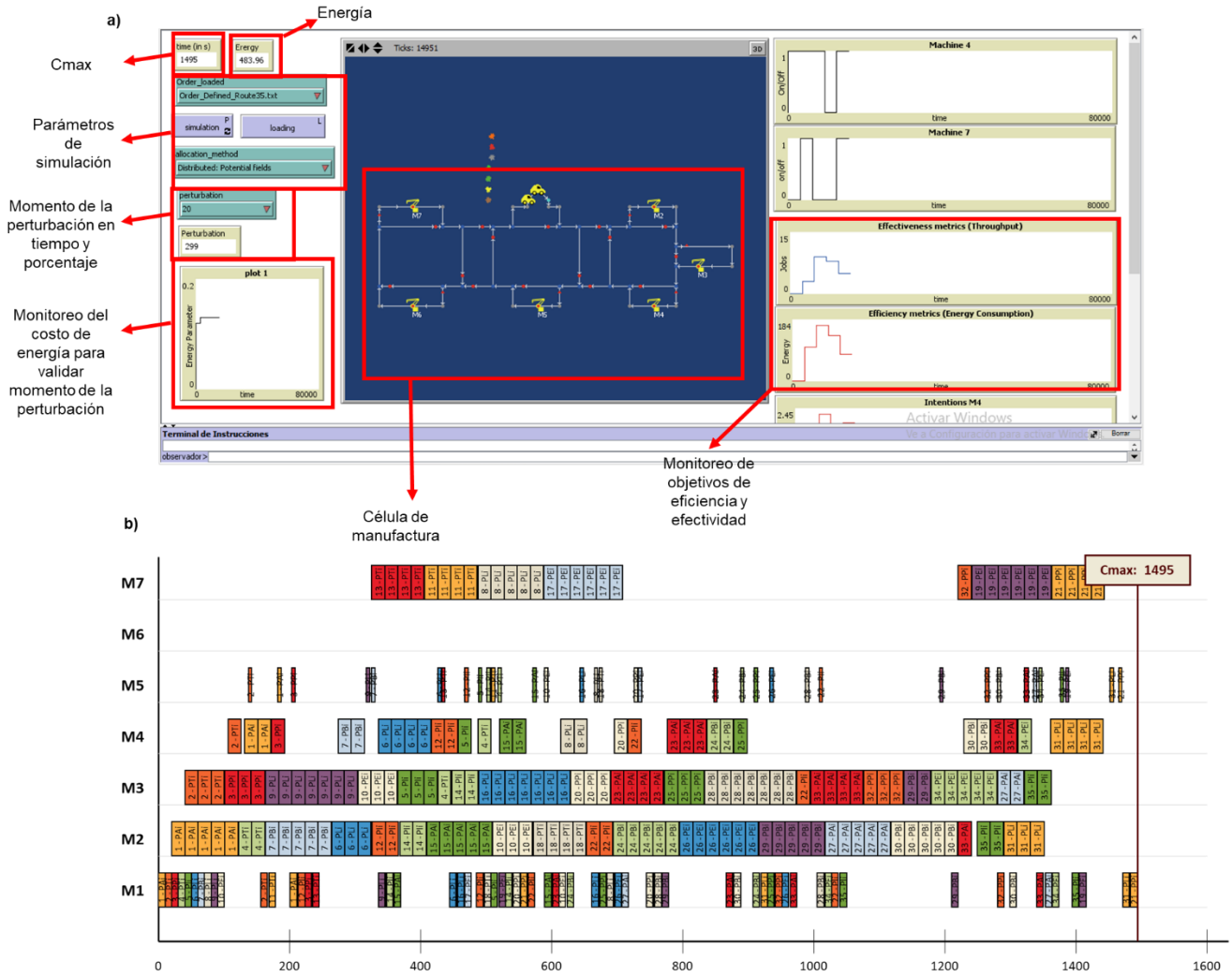


Figura 34. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados de perturbación en 20% y simulación de 35 productos.
Fuente: Elaboración propia (2019).

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el tercer enfoque: predictivo-reactivo. La Figura 35 muestra los valores de los indicadores de C_{max} y energía para los doce escenarios y combinaciones posibles; así como las respectivas gráficas de monitoreo de efectividad y eficiencia durante la ejecución del sistema de las mejores soluciones encontradas:

Escenario 1 35 productos				
	Efectividad	Eficiencia	Cmax	Energía
20%			1,495	484
40%			1,495	484
60%			1,495	484
80%			1,495	484
Escenario 2 70 productos				
	Efectividad	Eficiencia	Cmax	Energía
20%			2,694	1,093
40%			2,694	1,093
60%			2,694	1,093
80%			2,694	1,093
Escenario 3 140 productos				
	Efectividad	Eficiencia	Cmax	Energía
20%			4,785	2,370
40%			4,785	2,370
60%			4,785	2,370
80%			4,785	2,370

Figura 35. Resultados modelo predictivo-reactivo.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Los resultados obtenidos evidencian que suelen presentarse altos y bajos del indicador de energía, sin embargo, es notoria la tendencia creciente durante la ejecución a medida que aumentan la cantidad de productos en el sistema y el tiempo total de procesamiento es más extenso. También se observa notoriamente un alza en la energía al momento de ocurrir la perturbación e implementar el modelo reactivo para cualquier momento de perturbación simulado. Por otra parte, el indicador de C_{max} mantiene su estabilidad con cada modelo durante toda la ejecución del sistema, por lo que se demuestra que no es afectado por la perturbación ocurrida. Finalmente, los resultados globales del sistema son iguales para cada escenario, demostrando así que el momento de la perturbación no tiene relación estrecha con el desempeño del sistema. Es decir, el sistema de control se comportará y reaccionará de la misma manera ya sea que la perturbación ocurra al inicio o al final de su ejecución.

En el Anexo 4 se muestran los restantes Diagramas de Gantt obtenidos para cada resultado del modelo predictivo-reactivo.

4.5 Modelo reconfigurado:

Para la implementación del modelo reconfigurado en este proyecto de investigación, se procedió a simular en Netlogo cada escenario bajo cuatro situaciones distintas dependiendo del momento de la perturbación según el tiempo total de procesamiento del sistema: a) 20%, b) 40%, c) 60% y d) 80%. Cada situación fue simulada para finalmente obtener el mejor resultado en cuanto a: a) orden de entrada de los productos al sistema, b) orden de máquinas a seguir por una operación y c) vector de energía (M4 y M7). Estas variables determinan entonces el mejor valor de la función multi-objetivo del sistema en cuanto a la minimización del C_{max} y el costo del consumo de energía. Adicionalmente, este modelo consistió en una primera parte *offline* o predictiva que, como respuesta a una perturbación en el sistema, cambió a *online* o reactiva hasta que encontró un mejor modo de operación y aplicó el mecanismo de reconfiguración para mejorar el desempeño del sistema. En la Figura 36 se observa una representación de la simulación y los resultados obtenidos:

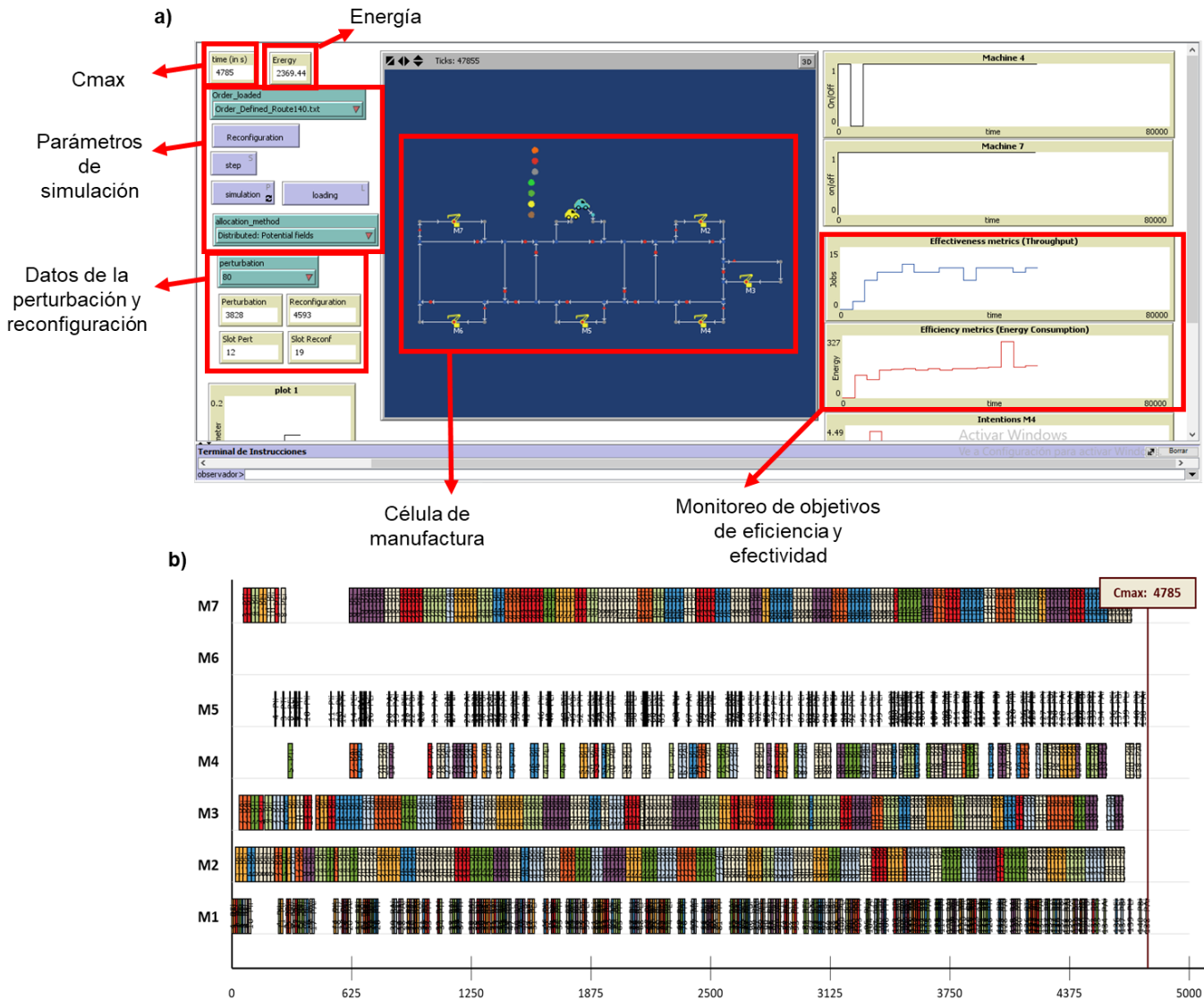


Figura 36. a) Pantalla de resultados en Netlogo y b) Diagrama de Gantt con resultados de perturbación en 80% y simulación de 140 productos.
Fuente: Elaboración propia (2019).

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el cuarto y último enfoque: reconfigurado. La Tabla 11 muestra los valores de los indicadores de C_{max} y energía para los doce escenarios y combinaciones posibles durante la ejecución del sistema de las mejores soluciones encontradas:

Tabla 11. Resultados modelo reconfigurado.
Fuente: Elaboración propia (2019).

	Escenario 1 35 productos		Escenario 2 70 productos		Escenario 3 140 productos	
	Cmax	Energía	Cmax	Energía	Cmax	Energía
	20%	1,792	489	3,575	1,057	6,584
40%	1,495	484	3,289	1,076	5,698	2,291
60%	1,495	484	2,694	1,093	4,785	2,369
80%	1,495	484	2,694	1,093	4,785	2,369

Los resultados obtenidos evidencian un aumento del tiempo total de procesamiento C_{max} y del costo de la energía consumida a medida que aumentan la cantidad de productos en el sistema. También se demuestra un comportamiento similar en cada escenario en cuanto a energía. Es decir, dado que los valores no tienen diferencias significativas entre un momento de perturbación y otro, no se observa una relación entre el desempeño de la eficiencia del sistema y el momento de la perturbación e implementación de la reconfiguración. Por otra parte, el desempeño de la efectividad del sistema sí se ve afectado por el momento en que ocurre dicha perturbación. Mientras más temprano ocurra, más tardará el sistema en completar su ejecución. Mientras más tarde ocurra, dicho sistema de control terminará el procesamiento en menor cantidad de tiempo. Por último, el tiempo de implementación de la reconfiguración aumenta proporcionalmente con el momento de la perturbación. Es decir, con una perturbación que ocurra al 20% del tiempo total de ejecución, el tiempo de recuperación a un nuevo modo de operación que mejore el desempeño del sistema será de 10%. Así mismo, si el momento ocurre al 40%, su recuperación se dará un 20% después; si el momento ocurre al 60%, su recuperación se dará un 30% después; y si el momento ocurre al 80%, su recuperación se dará un 40% después.

4.6 Comparación:

A continuación se presentan las Figuras 37 y 38 en donde se compara, para los escenarios de 70 y 140 productos, sus resultados en cuanto a los objetivos de energía y

C_{max} y la degradación en cuanto al desempeño del sistema. Dado que el modelo predictivo no tiene perturbaciones y funciona con una entidad global, es tomado como punto de comparación y sus valores como los esperados de cualquier modelo.

Para el escenario de 70 productos se aprecia como existe una leve mejora del indicador del consumo de energía para los modelos predictivo-reactivo y reconfigurado cuando se compara versus el predictivo. La energía aumenta considerablemente con el modelo reactivo, lo que quiere decir que la toma de decisiones por medio de campos potenciales únicamente no representa la mejor opción para la eficiencia del sistema. Adicionalmente, se observa con este escenario una similitud entre los modelos predictivo-reactivo y reconfigurado. Por otra parte, en cuanto al indicador C_{max} , ningún modelo se desempeña mejor que el predictivo. Esto quiere decir que para todos ellos, el tiempo total de procesamiento del sistema aumenta entre 0,7% y 5,7%.

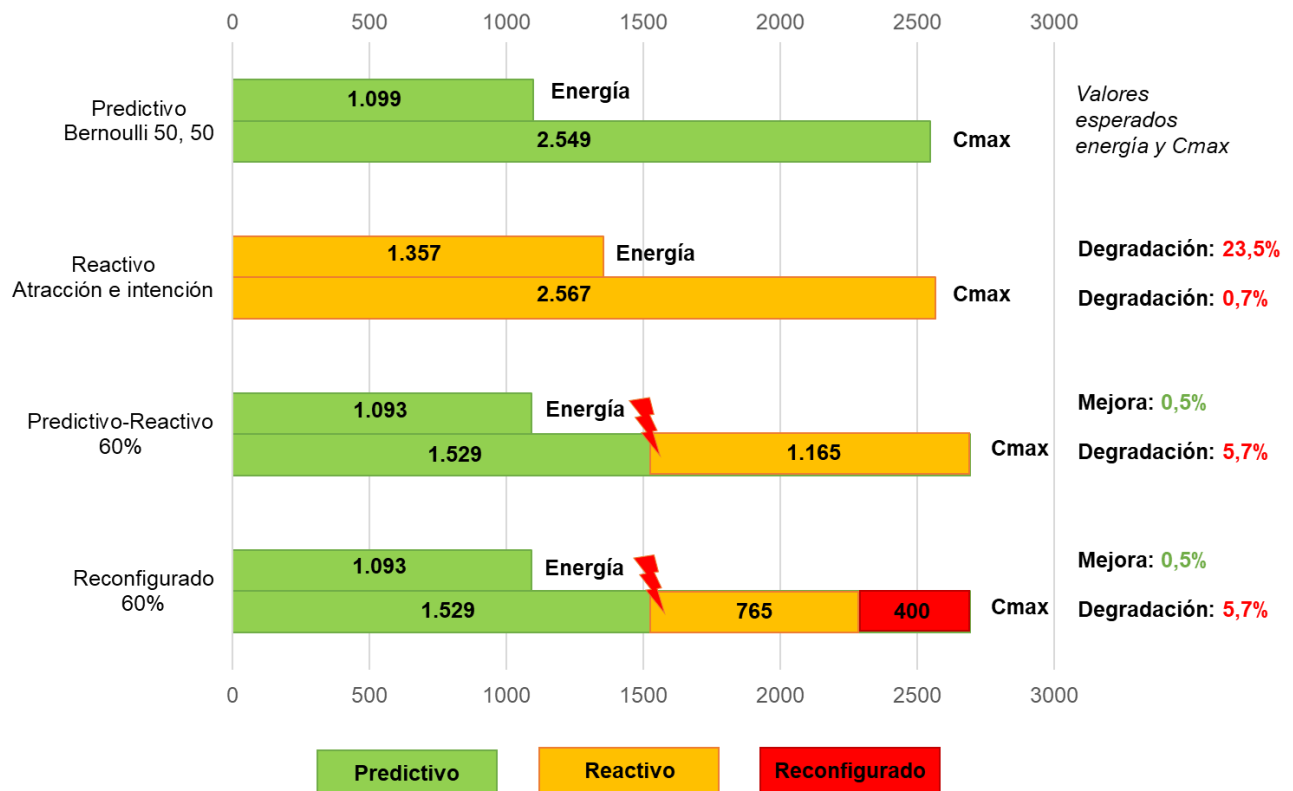


Figura 37. Comparación de C_{max} escenario 70 productos.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Para el escenario de 140 productos hay una mejora notable del tiempo del sistema con el modelo predictivo-reactivo al compararlo con el modelo predictivo, lo que quiere decir que el momento de ocurrencia de la perturbación impacta considerablemente en el desempeño del sistema. Bajo el modelo reconfigurado, el tiempo aumenta en un 6,7%. Por otra parte, al igual que en el escenario de 70 productos, la energía aumenta considerablemente con el modelo reactivo, lo que quiere decir que la toma de decisiones por medio de campos potenciales únicamente no representa la mejor opción para la eficiencia del sistema. Adicionalmente, se evidencia un comportamiento similar en cuanto a las energías obtenidas del modelo predictivo-reactivo y reconfigurado.

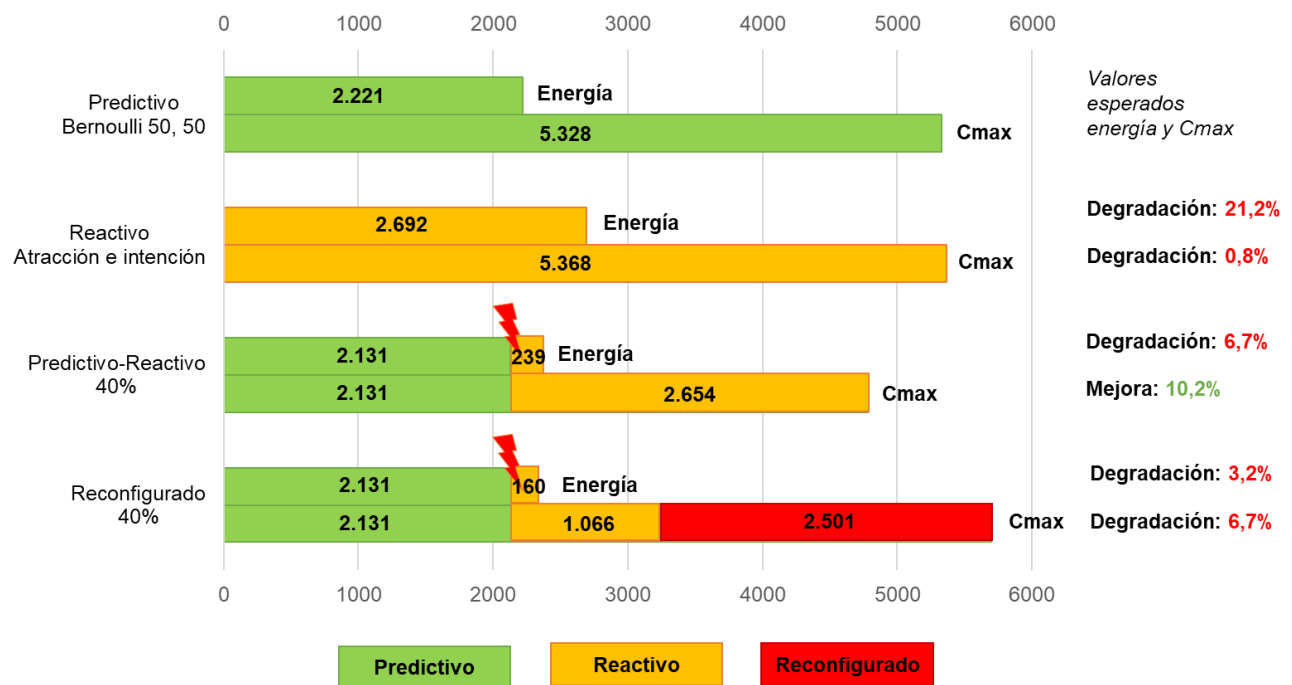


Figura 38. Comparación de C_{max} escenario 140 productos.
Fuente: Elaboración propia (2019).

En la Tabla 12 se observan todos los resultados obtenidos de eficiencia y efectividad para las simulaciones realizadas de cada enfoque y cada escenario. El enfoque reactivo es comparado con el enfoque predictivo Bernoulli 30,70, mientras que los enfoques predictivo-reactivo y reconfigurado son comparados con el enfoque predictivo con perturbación según cada momento de ejecución:

Tabla 12. Comparación de resultados.
Fuente: Elaboración propia (2019).

Enfoque	35 productos				70 productos				140 productos			
	Cmax	%	Energía	%	Cmax	%	Energía	%	Cmax	%	Energía	%
Predictivo												
<i>Bernoulli 30,70</i>	1.495	-	451	-	2.694	-	1.020	-	4.785	-	2.212	-
Bernoulli 50,50	1.495	-	451	-	2.549	-	1.099	-	5.328	-	2.221	-
Predictivo con perturbación												
20%	1.939	-	387	-	3.773	-	754	-	6.867	-	1.374	-
40%	1.939	-	775	-	3.773	-	1.509	-	6.867	-	2.746	-
60%	1.939	-	1.163	-	3.773	-	2.263	-	6.867	-	4.120	-
80%	1.939	-	1.551	-	3.773	-	3.018	-	6.867	-	5.493	-
Reactivo												
Atracción	1.522	1,8	693	53,7	2.686	0,3	1.264	24	4.670	2,4	2.729	23
Atracción e intención	1.522	1,8	693	53,7	2.567	5	1.357	33	5.368	12	2.692	22
Predictivo-Reactivo												
20%	1.495	23	484	25	2.694	29	1.093	45	4.785	30	2.370	72
40%	1.495	23	484	38	2.694	29	1.093	28	4.785	30	2.370	14
60%	1.495	23	484	58	2.694	29	1.093	52	4.785	30	2.370	42
80%	1.495	23	484	69	2.694	29	1.093	64	4.785	30	2.370	57
Reconfigurado												
20%	1.792	7,5	489	26	3.575	5	1.057	40	6.584	4	2.246	63
40%	1.495	23	484	38	3.289	13	1.076	29	5.698	17	2.291	17
60%	1.495	23	484	58	2.694	29	1.093	52	4.785	30	2.369	42
80%	1.495	23	484	69	2.694	29	1.093	64	4.785	30	2.369	57

Finalmente se puede decir que el modelo reactivo no es considerado el mejor enfoque para mejorar la eficiencia y efectividad del sistema. Este modelo brinda una solución con mayor reactividad y menor optimalidad. Adicionalmente, los modelos predictivo-reactivo y reconfigurado presentaron valores muy similares en este proyecto de investigación, lo que indica que se requiere mayor investigación para validar la similitud de estos enfoques. Los resultados comprueban que la reactividad es necesaria para mejorar el desempeño del sistema y recuperar su comportamiento ideal. Mientras más tarde ocurra la perturbación, mejor será la recuperación del sistema luego de

reconfigurado. Los resultados también refuerzan el hecho de que el desempeño del sistema varía y depende de la arquitectura de control y el modo de operación definido para las entidades del mismo. Tanto la estructura del sistema de control y la relación entre las entidades tienen un nivel de influencia muy alto en la ejecución del sistema, ya que la comunicación entre todas ellas determinan su comportamiento.

4.7 Resumen:

Este capítulo validó la implementación de la propuesta a través de los resultados obtenidos en la simulación de tres escenarios con cinco enfoques distintos. Estos escenarios y enfoques evaluaron la factibilidad de la propuesta realizada en este proyecto de investigación, donde sí es posible generar un balance entre indicadores de eficiencia y efectividad en sistemas de control con arquitecturas reconfigurables y mejorar el desempeño del sistema notablemente luego de ocurrida una degradación. El sistema propuesto es capaz de recuperarse ante una perturbación a través de la asignación de distintas relaciones entre las entidades de decisión. Así mismo, es capaz también de sentir, medir y actuar según indicadores de tiempo y energía.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Introducción:

Este capítulo propone, a partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, posibles conclusiones y oportunidades de mejora que puedan servir de referencia para futuras investigaciones. El objetivo es sugerir acciones a seguir basadas en las limitantes del presente proyecto, y, a partir de ellas, generar nuevas perspectivas de investigación. Entonces, este capítulo proporciona una serie de conclusiones de la propuesta realizada, sus resultados y factibilidad. Por último, se proponen modificaciones a la propuesta planteada que sirvan para futuras mejoras.

5.2 Conclusiones y perspectivas de investigación:

Con la realización de este trabajo de investigación se pudo concluir acerca de distintas contribuciones a lo largo de su desarrollo.

Primero, en la revisión de la literatura, se encontró una falta de integración entre arquitecturas de control y sostenibilidad en ambientes de manufactura, validando así la necesidad de crear un sistema de control reconfigurable y sostenible que aporte a la literatura deficiente actual. En esta misma revisión literaria, se evidencia que los sistemas reconfigurables son un modelo que aumentan la flexibilidad y reactividad de los sistemas

de control ya que permiten reaccionar a perturbaciones del ambiente y ajustar sus parámetros para brindar nuevamente un buen desempeño.

Seguidamente, se construyó un sistema de control reconfigurable y sostenible, constituido por dos componentes: a) la arquitectura de control y b) el mecanismo de reconfiguración. La arquitectura de control está compuesta por la creación de distintas entidades de decisión, flexibles y personalizables, que cambian su comportamiento e interacción con otras entidades a través del tiempo. Estas entidades contienen unos objetivos, indicadores, una técnica de toma de decisiones y parámetros de gobernabilidad. A su vez, la agregación de estos parámetros de gobernabilidad constituye un modo de operación definido de toda la arquitectura. En todo caso, esta investigación se enfocó en la integración de los objetivos de eficiencia y efectividad para generar un balance entre el tiempo total de procesamiento (C_{max}) y el costo de la energía consumida del sistema (E). Igualmente, se propuso un mecanismo de reconfiguración compuesto por tres módulos a través del cual se ejecuta la reconfiguración del sistema cuando sea necesario. Este mecanismo monitorea, activa, detona, implementa y sincroniza los nuevos parámetros para la recuperación del sistema, cambiando consecuentemente su modo de operación.

Tanto la arquitectura de control como el mecanismo de reconfiguración propuestos fueron validados a través de la simulación de distintos escenarios. Esta validación fue realizada en un modelo de un sistema de manufactura flexible ubicado en Valenciennes, Francia. Los escenarios fueron validados a través de cinco distintos enfoques, dentro de los cuales se destacan aquellos que implementan la reconfiguración por su flexibilidad y capacidad de mejorar sustancialmente los resultados del sistema. El enfoque predictivo con perturbación muestra una degradación notoria de ambos indicadores. Con la capacidad de reconfigurarse, la energía del sistema es capaz de mejorar hasta en un 69% del valor inicial, mientras que el C_{max} puede mejorar hasta un 30%. Así se demuestra la factibilidad de generar un balance entre estos indicadores. Sin embargo, se sugiere complementar los estudios para demostrar la relación entre reconfigurabilidad y sostenibilidad. Aun así, se demuestra la posibilidad de integrar objetivos de eficiencia y efectividad en un sistema de control reconfigurable.

Finalmente, de los resultados obtenidos se puede concluir que el desempeño global del sistema es mejor si la perturbación o degradación ocurre cercana al fin de la ejecución ya que los distintos modos de operación implementados convergen en un solo punto. Luego, las interacciones y estructura de la arquitectura juegan un papel vital en el desempeño del sistema ya que de ellas depende la comunicación entre entidades que finalmente permiten adaptarse parcial o totalmente a nuevos modos de operación para mejorar las condiciones del sistema.

De la realización de este trabajo de investigación, sus resultados y las limitaciones planteadas a lo largo de su desarrollo, se sugieren entonces algunas perspectivas de investigación:

Inicialmente, en relación a la arquitectura de control y mecanismo de reconfiguración propuestos, se recomienda calcular el grado exacto de gobernabilidad de los parámetros de cada entidad. De esta manera, el sistema podrá evaluar un modo de operación sin necesidad de la evaluación del modo de operación vigente en ese momento. También, este trabajo sugiere evaluar e implementar otras técnicas de toma de decisiones tanto en la capa de coordinación, operación y módulo de técnicas de reconfiguración. Esto permitirá tener más alternativas que aumenten la reactividad y optimalidad del sistema. Adicionalmente, además de evaluar la propuesta planteada en otros campos de aplicación como lo son logística, sistemas de salud, telecomunicaciones y robótica o electrónica, entre otras; también se puede evaluar la inclusión de otros indicadores de la sostenibilidad, como son métricas medioambientales, indicadores sociales y económicos; es decir, abarcar las tres dimensiones de la sostenibilidad. Por otra parte, se sugiere también utilizar otra técnica para dar respuesta al problema multiobjetivo planteado en la fase predictiva y variar los pesos establecidos por el agente decisor. De esta manera se podrá evaluar el impacto que tienen estos coeficientes en las soluciones obtenidas y el rango de soluciones posibles a obtener. De igual manera se sugiere para futuras investigaciones normalizar estos valores.

Por último, en cuanto a la experimentación se sugiere primero crear más instancias con los mismos escenarios planteados, es decir, modificar los recursos disponibles en el sistema de manufactura flexible para validar su comportamiento.

También se recomienda realizar una evaluación donde la entidad global tenga modos de interacción limitantes o permisivos. Esto permitiría aumentar el rango de posibilidades de las decisiones de las entidades locales y de recursos, aumentar la autonomía de las entidades locales y analizar nuevas tendencias de comportamiento. También se sugiere evaluar diversas interacciones o relaciones entre entidades del mismo nivel (i.e. global-global o local-local) para analizar flujos de información y nuevos comportamientos emergentes del sistema. Además, al momento de iniciar la reconfiguración, se recomienda crear un mecanismo que detecte las actividades y decisiones que quedan fuera de su alcance.

GLOSARIO

Arquitectura de control: composición híbrida y dinámica que controla al sistema controlado de una manera jerárquica o distribuida. Está compuesta por las entidades de decisión conectadas entre sí para interactuar y participar en el proceso de alcanzar los objetivos globales y locales del sistema.

Campos potenciales: técnica usada en sistemas reactivos y heterárquicos, fácil de implementar y capaz de reaccionar a perturbaciones en el sistema. A través de sus protocolos de atracción e intención, influyen el comportamiento de entidades de decisión móviles en ambientes inciertos (Pach et al, 2012).

Efectividad: indicador que mide el cumplimiento de objetivos del sistema de control a través de una métrica de rendimiento.

Eficiencia: indicador que mide el uso apropiado de recursos del sistema de control a través de una métrica de consumo de energía.

Enfoques del sistema de control: modelos que el sistema de control puede adoptar como respuesta según su interacción con el medio ambiente y capacidad de reconfiguración.

Entidades de decisión: agentes que actúan en conjunto para lograr un objetivo definido por el problema de control global a través de habilidades de reacción y cooperación y de una técnica de toma de decisiones que evalúa la acción a seguir.

Flexible Job Shop Problem (FJSP): tipo de FMS en donde las tareas se componen de operaciones y deben seguir una determinada secuencia y una cantidad específica de las

mismas. Su objetivo es encontrar la mejor secuencia de operaciones en las máquinas disponibles y asignar una operación a cada máquina.

Industria 4.0: época también llamada 4ta Revolución Industrial que trae consigo una sincronización de varias tecnologías que pueden ser conectadas en máquinas, productos, plantas de manufactura, sociedades y personas. Estas tecnologías mejoran la eficiencia en manufactura, crean nuevos modelos para productos personalizados y minimizan el daño ambiental a través del ciclo de vida del producto (Prinz et al., 2018).

Intelligent Manufacturing System (IMS): sistemas de manufactura basados en agentes u holones en donde cada componente, elemento y/o recurso es modelado y controlado por agentes u holones que pueden cooperar para solucionar problemas complejos (Giret et al, 2017).

Manufactura sostenible: proceso que integra tanto las metas económicas como las sociales y ambientales con el objetivo de abarcar mayor cantidad de criterios que optimicen la producción. Creación de productos manufacturados en procesos que minimizan el impacto ambiental negativo, conservan la energía y los recursos naturales, son seguros para los empleados, comunidades y consumidores y son sólidos económicamente (Giret et al., 2015).

Mecanismo de reconfiguración: sub-sistema que rige las capacidades flexibles y cambiables de la arquitectura de control para mejorar su desempeño. Está compuesto por tres módulos que funcionan en serie y están diseñados para responder a los retos del sistema de control reconfigurable.

Modo de operación: organización o agregación de los parámetros de gobernabilidad de todas las entidades de decisión presentes en el sistema.

Netlogo: software de simulación basado en agentes utilizado para la validación de la propuesta planteada en este proyecto de investigación y para la obtención de resultados.

Parámetros de gobernabilidad: conjunto de parámetros que definen los atributos, reglas de conducta e interconexión de las entidades de decisión.

Productividad: indicador que expresa la efectividad del sistema de control.

Reconfiguración: capacidad de ajustar y adaptar el sistema de control a nuevas condiciones como respuesta a una perturbación en el ambiente y así cambiar su modo de operación inicial de ser necesario.

Sistema de control reconfigurable (RMS): sistemas que tienen la habilidad de modificar su comportamiento para hacer frente a condiciones inusuales y cambios en el ambiente productivo como falla de máquinas, productos innovadores, pedidos urgentes, etc (Vrba & Marik, 2010).

Sistemas flexibles de manufactura (FMS): tipo especial de sistemas de manufactura que proveen flexibilidad a través del uso de equipos con alta funcionalidad y en donde varios productos son procesados en simultáneo en un ambiente con recursos limitados (Li et al, 2017).

Sistemas multi-agentes (MAS): unidades o agentes distribuidos heterárquicamente, donde cada agente gestiona sus propias actividades basados en su estado local y la información que recibe de otros agentes (Vallee et al, 2011).

Triple Bottom Line: combinación de las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, económico y social) (Zhou et al., 2017).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bajpai, A., Fernandes, K. J., & Tiwari, M. K. (2018). Modeling, analysis, and improvement of integrated productivity and energy consumption in a serial manufacturing system. *Journal of Cleaner Production*, 199, 296-304.
- Brossog, M., Bornschlegl, M., & Franke, J. (2015). Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), 1315-1328.
- Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., & Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671-678.
- Chokshi, N., & McFarlane, D. (2008). A distributed architecture for reconfigurable control of continuous process operations. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(2), 215-232.
- Coello, C. (1998). Optimización evolutiva con objetivos múltiples estado del arte y tendencias futuras. Engineering design centre, Plymouth university, UK.
- Conway, R.W., Maxwell, W.L., & Miller, L.W. (1967). Theory of scheduling. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Reading.
- da Silva, R. M., Benítez-Pina, I. F., Blos, M. F., Santos Filho, D. J., & Miyagi, P. E. (2015). Modeling of reconfigurable distributed manufacturing control systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1284-1289.

-
- da Silva, R. M., Junqueira, F., Santos Filho, D. J., & Miyagi, P. E. (2016). Control architecture and design method of reconfigurable manufacturing systems. *Control Engineering Practice*, 49, 87-100.
- de Carvalho, H. M., & de Oliveira Gomes, J. (2015). Method for increasing energy efficiency in flexible manufacturing systems: A case study. *Procedia CIRP*, 29, 40-44.
- Dilts, D. M., Boyd, N. P., & Whorms, H. H. (1991). The evolution of control architectures for automated manufacturing systems. *Journal of manufacturing systems*, 10(1), 79-93.
- ElMaraghy, H. A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International journal of flexible manufacturing systems*, 17(4), 261-276.
- Giret, A., Trentesaux, D., & Prabhu, V. (2015). Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 126-140.
- Giret, A., Trentesaux, D., Salido, M. A., Garcia, E., & Adam, E. (2017). A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems. *Journal of cleaner production*, 167, 1370-1386.
- Greinacher, S., Moser, E., Hermann, H., & Lanza, G. (2015). Simulation based assessment of lean and green strategies in manufacturing systems. *Procedia CIRP*, 29, 86-91.
- Holvoet, T., Weyns, D., & Valckenaers, P. (2009, September). Patterns of delegate mas. In *2009 Third IEEE international conference on self-adaptive and self-organizing systems* (pp. 1-9). IEEE.
- Indrayadi, Y., Valckenaers, H. P., & Van Brussel, H. (2002, September). Dynamic multi-agent dispatching control for flexible manufacturing systems. In *Proceedings. 13th International Workshop on Database and Expert Systems Applications* (pp. 578-582). IEEE.
- Indriago, C., Cardin, O., Rakoto, N., Castagna, P., & Chacòn, E. (2016). H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems. *Computers in industry*, 77, 15-28.

-
- Jimenez, J. F., Bekrar, A., Trentesaux, D., Rey, G. Z., & Leitão, P. (2015). Governance mechanism in control architectures for flexible manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1093-1098.
- Jimenez, J. F., Bekrar, A., Giret, A., Leitão, P., & Trentesaux, D. (2016). A dynamic hybrid control architecture for sustainable manufacturing control. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31), 114-119.
- Jiménez, J. F. (2017). Dynamic and hybrid architecture for the optimal reconfiguration of control systems: application to manufacturing control (Doctoral dissertation, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis).
- Kluczek, A. (2017). An overall multi-criteria approach to sustainability assessment of manufacturing processes. *Procedia Manufacturing*, 8, 136-143.
- Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 121-136.
- Lee, S., Ryu, K., & Shin, M. (2017). The development of simulation model for self-reconfigurable manufacturing system considering sustainability factors. *Procedia Manufacturing*, 11, 1085-1092.
- Leitao, P., & Restivo, F. (2008). Implementation of a holonic control system in a flexible manufacturing system. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS PART C, APPLICATIONS and reviews*, 38(5), 699.
- Li, X., Xing, K., Wu, Y., Wang, X., & Luo, J. (2017). Total energy consumption optimization via genetic algorithm in flexible manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 104, 188-200.
- Montoya-Torres, J. R. (2015, May). Designing sustainable supply chains based on the triple bottom line approach. In 2015 4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT) (pp. 1-6). IEEE.
- Nujoom, R., Mohammed, A., & Wang, Q. (2018). A sustainable manufacturing system design: a fuzzy multi-objective optimization model. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(25), 24535-24547.

-
- Osyczka, A. (1985). Multicriteria optimization for engineering design. In Design optimization (pp. 193-227). Academic Press.
- Pach, C., Bekrar, A., Zbib, N., Sallez, Y., & Trentesaux, D. (2012). An effective potential field approach to FMS holonic heterarchical control. *Control Engineering Practice*, 20(12), 1293-1309.
- 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(3), 434-448.
- Pach, C., Berger, T., Sallez, Y., & Trentesaux, D. (2015). Reactive control of overall power consumption in flexible manufacturing systems scheduling: A Potential Fields model. *Control Engineering Practice*, 44, 193-208.
- Perez, H. B., Juarez, I. L., Alanis, P. C. G., Cabrera, R. R., & Chavesti, A. D. (2016). Reconfiguration distributed objects in an intelligent manufacturing cell. *IEEE Latin America Transactions*, 14(1), 136-146.
- Prinz, F., Chun, D. M., & Ahn, S. H. (2018). Preface for the Special Issue of Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5(4), 457-457.
- Radziewska, S. (2016). Global Crisis, Financialization and Technological Development. *International Economic Policy*, (24), 124.
- Renna, P. (2010). Capacity reconfiguration management in reconfigurable manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1-4), 395-404.
- Rodrigues, N., Oliveira, E., & Leitão, P. (2018). Decentralized and on-the-fly agent-based service reconfiguration in manufacturing systems. *Computers in Industry*, 101, 81-90.
- Salido, M. A., Escamilla, J., Barber, F., & Giret, A. (2017). Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems. *Journal of cleaner production*, 162, S121-S132.

-
- Saygin, C., & Kilic, S. E. (1999). Integrating flexible process plans with scheduling in flexible manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(4), 268-280.
- Silva, A. L., Ribeiro, R., & Teixeira, M. (2017). Modeling and control of flexible context-dependent manufacturing systems. *Information Sciences*, 421, 1-14.
- Sezen, B., & Çankaya, S. Y. (2013). Effects of green manufacturing and eco-innovation on sustainability performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 99, 154-163.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia Cirp*, 40, 536-541.
- Sun, Z., & Li, L. (2013). Opportunity estimation for real-time energy control of sustainable manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(1), 38-44.
- Trentesaux, D. (2002). Pilotage hétérarchique des systèmes de production (Doctoral dissertation, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis).
- Trentesaux, D. (2009). Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7), 971-978.
- Trentesaux, D., Pach, C., Bekrar, A., Sallez, Y., Berger, T., Bonte, T., ... & Barbosa, J. (2013). Benchmarking flexible job-shop scheduling and control systems. *Control Engineering Practice*, 21(9), 1204-1225.
- Trentesaux, D., & Giret, A. (2015). Go-green manufacturing holons: a step towards sustainable manufacturing operations control. *Manufacturing Letters*, 5, 29-33.
- Uphf.fr. (2019). Site de Valenciennes | AIP Nord Pas de Calais. [online] Available at: <https://www.uphf.fr/aipnpdc/site-de-valenciennes> [Accessed 10 Jan. 2019].
- Vallee, M., Merdan, M., Lepuschitz, W., & Koppensteiner, G. (2011). Decentralized reconfiguration of a flexible transportation system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 505-516.

-
- Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., & Peeters, P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in industry*, 37(3), 255-274.
- Vrba, P., & Marik, V. (2010). Capabilities of dynamic reconfiguration of multiagent-based industrial control systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 40(2), 213-223.
- Walsh, D., Bordeleau, F., & Selic, B. (2006, March). Change types of dynamic system reconfiguration. In *13th Annual IEEE International Symposium and Workshop on Engineering of Computer-Based Systems (ECBS'06)* (pp. 10-pp). IEEE.
- Wills, L., Kannan, S., Sander, S., Guler, M., Heck, B., Prasad, J. V. R., ... & Vachtsevanos, G. (2001). An open platform for reconfigurable control. *IEEE Control Systems*, 21(3), 49-64.
- Xu, W., Shao, L., Yao, B., Zhou, Z., & Pham, D. T. (2016). Perception data-driven optimization of manufacturing equipment service scheduling in sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 86-101.
- Yuan, C., Zhai, Q., & Dornfeld, D. (2012). A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(1), 39-42.
- Zbib, N., Pach, C., Sallez, Y., & Trentesaux, D. (2012). Heterarchical production control in manufacturing systems using the potential fields concept. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(5), 1649-1670.
- Zhang, Y. (2015). Review of recent advances on energy efficiency of machine tools for sustainability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(12), 2095-2108.
- Zhou, Z., Yao, B., Xu, W., & Wang, L. (2017). Condition monitoring towards energy-efficient manufacturing: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9-12), 3395-3415.

ANEXO 1

Revisión literaria

Base de dato	Keyword	Año	Autor (es)	Título
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1988	Michael D. Brain	Manufacturing Control Systems Design for ASIC Manufacturing
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1995	B M Nasir	SIMULATION MODELLING OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	2012	J. Novak-Marcincin*, L. Novakova-Marcincinova*, M. Janak* and V. Fecova*	Simulation of Flexible Manufacturing Systems for Logistics Optimization
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1999	Ahmed Hambaba	Soft-Object Technology for Flexible Machining Systems (PMS)
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	2013	A. D. Morosan* and F. Sisak*	An intelligent system designed for controlling the manufacturing process in a flexible manufacturing system
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	2002	Yuki Indrayadi, Hadeli, Paul Valckenaers, and Hendrik Van Brussel	Dynamic Multi-Agent Dispatching Control for Flexible Manufacturing Systems
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1990	Arthur C. Sanderson	Task Planning for Flexible Manufacturing Systems
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	2008	Paulo Leitao and Francisco J. Restivo	Implementation of a Holonic Control System in a Flexible Manufacturing System
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	2016	Calin Clufudean and Corneliu Buzduga	Internet of Things for Flexible Manufacturing Systems' Diagnosis
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	2008	In-Sup Um and Hong-Chul Lee	A Systematic Approach to Apply the Simulation Modeling and Analysis for a Flexible Manufacturing System
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1997	Sang Chan Park, Narayan Raman, and Michael J. Shaw	Adaptive scheduling in dynamic flexible manufacturing systems: a dynamic rule selection approach
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1994	G. L. KOVÁCS, J. Nacsá, D. Gavalcova	A knowledge based and a hybrid system to evaluate flexible manufacturing systems
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1993	B.HUENOIT E. CRAYE J.P. BOUREY	Implantation oriented methodology in design control of flexible manufacturing systems
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1989	Christopher J. Chase and Peter J. Ramadge	On the real-time control of flexible manufacturing systems
IEEE	Flexible Manufacturing Systems	1998	Jeffrey S. Smith and Brett A. Peters	Simulation as a decision-making tool for real-time control of flexible manufacturing systems
IEEE	Reconfigurable Control Systems	1998	Linda Wills, Suresh Kannan, Sam Sander, Murat Guler, Bonnie Heck, J.V.R. Prasad, Daniel Schrage, and George Vachtsevanos	An open platform for reconfigurable control
IEEE	Reconfigurable Control Systems	2010	Pavel Vrba and Vladimír Marik	Capabilities of Dynamic Reconfiguration of Multiagent-Based Industrial Control Systems
IEEE	Reconfigurable Control Systems	2003	Murat Guler, Scott Clements, Linda M. Wills, Bonnie S. Heck, and George J. Vachtsevanos	Transition management for reconfigurable hybrid control systems
IEEE	Reconfigurable Control Systems	2018	JIAFENG ZHANG, GEORG FREY, ABDULRAHMAN AL-AHMARI, TING QU, NAIQI WU AND ZHIWU LI	Analysis and Control of Dynamic Reconfiguration Processes of Manufacturing Systems
IEEE	Reconfigurable Control Systems	1995	Marc Bodson	Emerging technologies in control engineering
IEEE	Reconfigurable Control Systems	1996	Jaehong Shim, Kyunghee Choi, and Dong Yoon Kim	A real-time reconfigurable entrance control system
IEEE	Reconfigurable Control Systems	1997	Rafael Fierro and Frank L. Lewis	A framework for hybrid control design
IEEE	Sustainable Manufacturing Systems	2013	Zeyi Sun and Lin Li	Opportunity Estimation for Real-Time Energy Control of Sustainable Manufacturing Systems
IEEE	Sustainable Manufacturing Systems	2013	Lin Li and Zeyi Sun	Dynamic Energy Control for Energy Efficiency Improvement of Sustainable Manufacturing Systems Using Markov Decision Process
IEEE	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Zeyi Sun, Fadwa Dababneh, and Lin L	Joint Energy, Maintenance, and Throughput Modeling for Sustainable Manufacturing Systems
IEEE	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Zhaohui Wang, Houbing Song, David W. Watkins, Keat Ghee Ong, Pengfei Xue, Qing Yang, and Xianming Shi	Cyber-physical systems for water sustainability: challenges and opportunities
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2016	Zhiliang Zhang, Yong-Yong Cai, Yue Zhang, Dong-Jie Gu, and Yan-Fei Liu	A Distributed Architecture Based on Microbank Modules With Self-Reconfiguration Control to Improve the Energy Efficiency in the Battery Energy Storage System
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2011	Mathieu Vallée, Munir Merdan, Wilfried Lepuschitz and Gottfried Koppensteiner	Decentralized Reconfiguration of a Flexible Transportation System
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2002	Shige Wang and Kang G. Shin	Constructing reconfigurable software for machine control systems
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2018	HAMZA CHNITER, YUTING LI, MOHAMED KHALGUI, ANIS KOUBAA, ZHIWU LI AND FETHI JARRAY	Multi-Agent Adaptive Architecture for Flexible Distributed Real-Time Systems
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2016	I. López, P. C. Garza, H. Benitez, R. Rios and A. Durán	Reconfiguration Distributed Objects in an Intelligent Manufacturing Cell
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2011	Mohamed Khalgui, Olfa Mosbahi, ZhiWu Li and Hans-Michael Hanisch	Reconfigurable Multiagent Embedded Control Systems: From Modeling to Implementation
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2009	J. Phillips A. Sudarsanam H. Samala R. Kallam J. Carver A. Dasu	Methodology to derive context adaptable architectures for FPGAs
IEEE	Reconfiguration Control Architectures	2004	Subhasish Mitra, Wei-Je Huang, Nirmal R. Saxena, Shu-Yi Yu, and Edward J. McCluskey	Reconfigurable architecture for autonomous self-repair
IEEE	Sustainable Control Architectures	2013	Heiko Koziolek, Dominik Domis, Thomas Goldschmidt, and Philipp Vorst	Measuring Architecture Sustainability
IEEE	Sustainable Control Architectures	2010	Marija D. Ilic	Dynamic Monitoring and Decision Systems for Enabling Sustainable Energy Services
IEEE	Sustainable Control Architectures	2004	S. Herrmann	Sustainable architectures by combining flexibility and strictness in Object Teams
IEEE	Sustainable Control Architectures	2018	MAHAMMAD A. HANNAN, MOHAMMAD FAISAL, PIN JERN KER, LOOE HUI MUN, KHAJUJA PARVIN, TEUKU MEURAH INDRA MAHLIA, AND FREDE BLAABJERG	A Review of Internet of Energy Based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations
IEEE	Sustainable Control Architectures	2017	Mingfei Ban, Mohammad Shahidepour, Jilai Yu, Zhiyi Li	A Cyber-Physical Energy Management System and Optimal Sizing of Networked Nanogrids with Battery Swapping Stations

Base de dato	Keyword	Año	Autor (es)	Título
IEEE	Productivity in Control Architectures	2005	Francisco P. Maturana, Raymond J. Staron, and Kenwood H. Hall	Methodologies and tools for intelligent agents in distributed control
IEEE	Productivity in Control Architectures	2012	Yang Yang, Qi Zhu, Mehdi Maasoumy, and Alberto Sangiovanni-Vincentelli	Development of Building Automation and Control Systems
IEEE	Productivity in Control Architectures	2013	Paulo Leitão, Vladimír Mařík and Pavel Vrba	Past, Present, and Future of Industrial Agent Applications
IEEE	Productivity in Control Architectures	1984	NORMAN R. HOWES	Managing Software Development Projects for Maximum Productivity
IEEE	Productivity in Control Architectures	2017	Jian-Qiang Li, F. Richard Yu, Genqiang Deng, Chengwen Luo, Zhong Ming, and Qiao Yan	Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges
IEEE	Productivity and Sustainability in Control Systems	2017	Aniruddha Sinha Shubham Sharma * M. R. Mahboob	An Internet of Things based prototype for smart appliance control
IEEE	Productivity and Sustainability in Control Systems	2013	J. Li, J. R. Morrison, M. T. Zhang, M. Nakano, S. Biller and B. Lennartsson	Editorial: Automation in green manufacturing
IEEE	Green Manufacturing in Control Systems	2008	Hossam A. Gabbar	Modeling Approach for Flexible Production Chain Operation
IEEE	Green Manufacturing in Control Systems	1995	David A. Dickinson, Clifton W. Draper, Manjini Saminathan, John E. Sohn, George Williams	Green product manufacturing
IEEE	Green Manufacturing in Control Systems	1992	Srinivasan Raghunathan	A planning aid: an intelligent modeling system for planning problems based on constraint satisfaction
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2017	A.V. Kapitanov	Manufacturing System Flexibility Control
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2017	André Lucas Silva, Richardson Ribeiro, Marcelo Teixeira	Modeling and control of flexible context-dependent manufacturing systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2016	Xiaoling Li, Keyi Xing, Yi Yunchao Wu, Xinnian Wang, Jianchao Luo	Total energy consumption optimization via genetic algorithm in flexible manufacturing systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2015	Jose-Fernando Jimenez, Abdelghani Bekrar, Damien Trentesaux, Gabriel Zambrano Rey, Paulo Leitão	Governance mechanism in control architectures for flexible manufacturing systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2015	Meriem Lafoua, Luc Mathieua, Stéphane Poisb, Marc Alochet	Manufacturing System Flexibility: Product Flexibility Assessment
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2017	Kashif Mahmooda, Tatjana Karaulovaa, Tauno Ottoa, Eduard Shevtschenko	Performance Analysis of a Flexible Manufacturing System (FMS)
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2017	Fabian Kellera, Cedric Schultza, Peter Simona, Stefan Braunreuthera, Johannes Glasschrödera, Gunther Reinhart	Integration and Interaction of Energy Flexible Manufacturing Systems within a Smart Grid
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2016	Philipp Holteverta, Thomas Bauernhansl	Increase of Capacity Flexibility in Manufacturing Systems by Substitution of Product Functions
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2011	Abduliz M. El-Tamimi a, Mustafa H. Abidi b, S. Hamad Mian b, Javed Aalam	Analysis of performance measures of flexible manufacturing system
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2016	Vladimir Polotski, Jean-Pierre Kenne and Ali Gharb	Production Policy Optimization in Flexible Manufacturing-Remanufacturing Systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2015	Hugo M. B. de Carvalho, Jefferson de Oliveira Gomes	Method for Increasing Energy Efficiency in Flexible Manufacturing Systems: A Case Study
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2013	Cyrille Pach, Thierry Berger, Yves Sallez, Therese Bonte, Emmanuel Adam, Damien Trentesaux	Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2016	Jan Beier, Sebastian Thiede, Christoph Herrmann	Energy flexibility of manufacturing systems for variable renewable energy supply integration: Real-time control method and simulation
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2015	C. Pach, T. Berger, Y. Sallez, D. Trentesaux	Reactive control of overall power consumption in flexible manufacturing systems scheduling: A Potential Fields model
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2016	Fabian Keller, Cedric Schults, Stefan Braunreuther, Gunther Reinhart	Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2017	Zelong Wei, Xi Song, Donghan Wang	Manufacturing flexibility, business model design, and firm performance
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2017	Govind Singh Rawat, Dr. Ashutosh Gupta, Chandan Juneja	Productivity Measurement of Manufacturing System
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2018	Marta Pérez-Pérez, Ana-M. Serrano Bedia, María-Concepción López-Fernández, Gema García-Piqueres	Research opportunities on manufacturing flexibility domain: A review and theory-based research agenda
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2016	Boris Yakimovich, Alexander Korshunov, Sviatskii Vladislav	Increasing of the Efficiency of Flexible Manufacturing System
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2012	G. Copani, Marcello Urgo	New Business Models and Configuration Approaches for Focused-Flexibility Manufacturing Systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2008	M. Carmen Ruiz, Diego Cazorla, Fernando Cuartero, Hermenegilda Macia	Improving performance in flexible manufacturing systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2015	M. Emin Erdin, Alper Atmaca	Implementation of an Overall Design of a Flexible Manufacturing System
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2016	Xie Ganga, Qiu Quan	Research on Planning Scheduling of Flexible Manufacturing System Based on Multi-level List Algorithm
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2017	Daniel R. Evers, Andrew T. Potter	Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2018	Ying Cheng, Fengyi Sun, Yongping Zhang, Fei Tao	Task Allocation in Manufacturing: A Review
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2018	Nelson Rodrigues, Eugénio Oliveira, Paulo Leitão	Decentralized and on-the-fly agent-based service reconfiguration in manufacturing systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2007	Nadia Hamani, Nathalie Dangoumau, Etienne Crayé	Reactive mode handling of flexible manufacturing systems
Elsevier	Flexible Manufacturing Systems	2018	Isabela Maganha, Cristovao Silva, Luis Miguel D.F. Ferreira	Understanding reconfigurability of manufacturing systems: An empirical analysis
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2015	Robson Marinho da Silva, Israel F. Benitez-Pina, Mauricio F. Blos, Diolino J. Santos Filho, Paulo E. Miyagi	Modeling of reconfigurable distributed manufacturing control systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2016	Robson Marinho da Silva, Fabricio Junqueira, Diolino J. Santos Filho, Paulo E. Miyagi	Control architecture and design method of reconfigurable manufacturing systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2018	Natalia Svensson Herari, Anders Fundin, Anna Lena Carlsson	Components of the Design Process of Flexible and Reconfigurable Assembly Systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Z. Gallehdari, N. Meskin, K. Khorasani	Distributed reconfigurable control strategies for switching topology networked multi-agent systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Tangbin Xia, Lifeng Xi, Ershun Pan, Jun Ni	Reconfiguration-oriented opportunistic maintenance policy for reconfigurable manufacturing systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2018	C. H. Koo, M. Vorderer, S. Junker, S. Schröck, A. Veri	Challenges and requirements for the safety compliant operation of reconfigurable manufacturing systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Khaled LAMRICH, Najib M. NAJID, Pierre CASTAGNA, Khaid KOUISS	Modularity in the design of reconfigurable manufacturing systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2013	Chiraz Trabelsi, Samy Meftali, Jean-Luc Dekeyser	Decentralized control for dynamically reconfigurable FPGA systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2018	Mads Bejlegaard, Waguih ElMaraghy, Thomas D. Brunoe, Ann-Louise Andersen, Kjeld Nielsen	Methodology for reconfigurable fixture architecture design
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	David Gyulai, Botond Kadar, Laszlo Monostori	Scheduling and Operator Control in Reconfigurable Assembly Systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2015	Michael James Tippet, Jie Bao	Reconfigurable distributed model predictive control
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2013	Harith M. Khalid, Mustafa Sancy Kink, Klaus Werner Schmidt	Abstraction-based Supervisory Control for Reconfigurable Manufacturing Systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2016	Alexandre Madeira, Renato Neves, Luis S. Barbosa, Manuel A. Martins	A method for rigorous design of reconfigurable systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2018	M.S. Kavitha, P. Rangarajan	An optimized reconfigurable algorithm for FPGA architecture oriented IoT applications
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2013	K Kruger, AH Basson	Multi-agent Systems vs IEC 61499 for Holonic Resource Control in Reconfigurable Systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Sangil Lee, Kwangyeol Ryu, Moonsoo Shin	The Development of Simulation Model for Self-reconfigurable Manufacturing System Considering Sustainability Factors
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Hichem Haddou-Benderbal, Mohammed Dahane and Lyes Benyoucef	Layout evolution effort for product family in Reconfigurable Manufacturing System design
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Radovan Furmann, Beata Furmannová, Dorota Wiecek	Interactive Design of Reconfigurable Logistics Systems

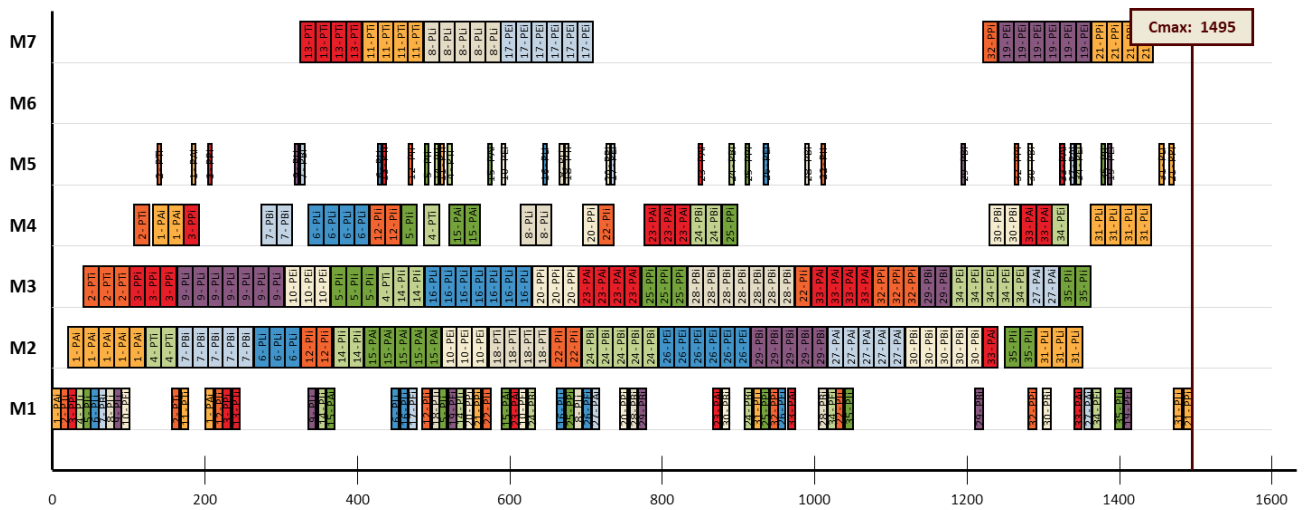
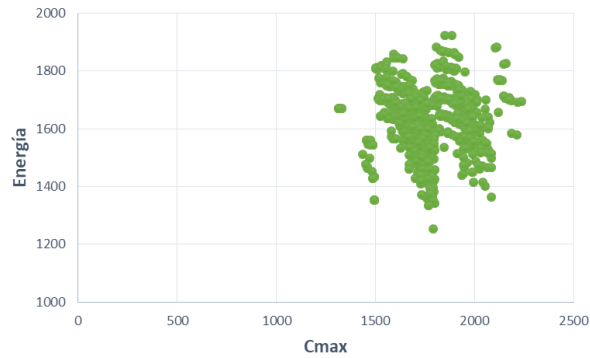
Base de dato	Keyword	Año	Autor (es)	Título
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2014	Edward N. Hartley, Jan M. Maciejowski	Reconfigurable predictive control for redundantly actuated systems with parameterised input constraints
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Kezia Amanda Kurniadi , Kwangyeol Ryu	Development of IOT-based Reconfigurable Manufacturing System to solve Reconfiguration Planning Problem
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2018	Gilberto Ochoa-Ruiz, Lina María Aguilar-Lobo, Romain Bevan, Florent de Lamotte, Jean-Philippe Diguët	Towards Dynamically Reconfigurable SoCs (DRSoCs) in industrial automation: State of the art, challenges and opportunities
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2008	Youmin Zhang, Jin Jiang	Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2015	Marios C. Phocas, Eftychios G. Christoforou , Maria Matheou	Design, motion planning and control of a reconfigurable hybrid structure
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2017	Ann-Louise Andersen, Thomas Ditlev Brunoe, Kjeld Nielsen, Carin Rösiö	Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems: Analysis and synthesis of current design methods and evaluation of supportive tools
Elsevier	Reconfigurable Control Systems	2002	Zhenyu Yang and David L. Hicks	RECONFIGURABILITY OF FAULT-TOLERANT HYBRID CONTROL SYSTEMS
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Ikou Kaku	Is Seru a Sustainable Manufacturing System?
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Tarek AlGeddawy, Hoda ElMaraghy	Design for energy sustainability in manufacturing systems
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2015	C.E. Siemieniuch, M.A. Sinclair, M.J.deC. Henshaw	Global drivers, sustainable manufacturing and systems ergonomics
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Adriana Giret, Damien Trentesaux, Miguel A. Salido, Emilia Garcia, Emmanuel Adam	A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Miguel A. Salido, Joan Escamilla, Federico Barber, Adriana Giret	Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Erwin Raucha, Matthias Dallinger, Patrick Dallasega, Dominik T. Matt	Sustainability in Manufacturing through Distributed Manufacturing Systems (DMS)
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Aihua Huang, Fazleena Badurdeen	Metrics-based approach to evaluate sustainable manufacturing performance at the production line and plant levels
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Erwin Rauch, Patrick Dallasega, Dominik T. Matt	Sustainable production in emerging markets through Distributed Manufacturing Systems (DMS)
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Núbia Carvalho, Omar Cham, Edson Cazarini, Mateus Gerolamo	Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	I. Barletta, C. Berlin , M. Despeisse , E. Van Voorthuysen , B. Johansson	A Methodology to Align Core Manufacturing Capabilities with Sustainable Manufacturing Strategies
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Hasan H. Latif, Bhaskaran Gopalakrishnan, Ashish Nimbarte, Kenneth Currie	Sustainability index development for manufacturing industry
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Mijoh A. Gbededo, Kapila Liyanage, Jose Arturo Garza-Reyes	Towards a Life Cycle Sustainability Analysis: A systematic review of approaches to sustainable manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Tariq Aljuneidi, Akif A. Bulgak	Designing a Cellular Manufacturing System featuring remanufacturing, recycling, and disposal options: A mathematical modeling approach
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Liam Gardner and James Colwill	A Framework for the Resilient use of Critical Materials in Sustainable Manufacturing Systems
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Fazleena Badurdeen and I.S. Jawahir	Strategies for Value Creation Through Sustainable Manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Tao Peng, Karel Kellens, Renzhong Tang, Chao Chen, Gang Chen	Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2013	Hao Zhang, Javier Calvo-Amoldo, Karl R. Haapala	A conceptual model for assisting sustainable manufacturing through system dynamics
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Sujit Singh, Ezutah Udony Oluwu, Siti Nurmaya Musa	Development of Sustainable Manufacturing Performance Evaluation Expert System for Small and Medium Enterprises
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Aine Petraliayte, Fabrizio Ceschin, Euijin Pel, David Harrison	Supporting Sustainable Product-Service System Implementation through Distributed Manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Ana Beatriz Lopes de Sousa Jabbour, Charbel Jose Chiappetta Jabbour , Cyril Foropon, Moacir Godinho Filho	When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2012	Antonio Giovannini, Alexis Aubry, Hervé Panetto, Michele Dassisi, Hind El Haouzi	Knowledge-Based System for Manufacturing Sustainability
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Jun-Ki Choi, Ryan Schuessler, Michael Ising, Daniel Kelley and Kelly Kissock	A Pathway Towards Sustainable Manufacturing for Mid-size Manufacturers
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Marco Taisch, Bojan Stahl, Gokan May	Sustainability in Manufacturing Strategy Deployment
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Jan-Markus Rodger, Niki Bey, Leo Alting	The Sustainability Cone – A holistic framework to integrate sustainability thinking into manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Karmjit Singh, Ibrahim A. Sultan	Modelling and Evaluation of KPIs for the Assessment of Sustainable Manufacturing: An Extrusion process case study
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2013	Yong Wang, Lin Li	Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2013	A. Ziout, A. Azab, S. Altarazi, W.H. ElMaraghy	Multi-criteria decision support for sustainability assessment of manufacturing system reuse
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Thomas F. Edgar, Efstratios N. Pistikopoulos	Smart manufacturing and energy systems
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Vikrant Bhakar, A. K. Digalwar, Kuldip Singh Sangwan	Sustainability Assessment Framework for Manufacturing Sector – A Conceptual Model
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Alfonso Hernandez-Vivanco, Merce Bernardo, Claudio Cruz-Cazares	Sustainable innovation through management systems integration
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Aihua Huang, Fazleena Badurdeen	Sustainable Manufacturing Performance Evaluation: Integrating Product and Process Metrics for Systems Level Assessment
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Anastasiia Moldavska, Torgeir Welo	The concept of sustainable manufacturing and its definitions: A content-analysis based literature review
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Pinar Bilge, Fazleena Badurdeen, Gunther Seliger, I.S. Jawahir	A novel manufacturing architecture for sustainable value creation
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Aldona Kluczek	An Overall Multi-criteria Approach to Sustainability Assessment of Manufacturing Processes
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2012	Chris Yuan, Qiang Zhai, David Dornfeld	A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Xi Gu, Yoram Koren	Manufacturing system architecture for cost-effective mass-individualization
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Ibrahim H. Garbie	Sustainability Optimization in Manufacturing Enterprises
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Fabio Gregori, Alessandra Papetti, Monica Pandolfi, Margherita Peruzzini, Michele Germani	Digital Manufacturing Systems: A Framework to Improve Social Sustainability of a Production Site
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Oussama Masmoudi, Alice Yalaoui, Yassine Ouazene, Hicham Chehade	Lot-sizing in flow-shop with energy consideration for sustainable manufacturing systems

Base de dato	Keyword	Año	Autor (es)	Título
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2014	Adam Brown, Joseph Amundson, Fazleena Badurdeen	Sustainable value stream mapping (Sus-VSM) in different manufacturing system configurations: application case studies
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Wenjun Xu, Luyang Shao, Bitao Yao, Zude Zhou, Duc Truong Pham	Perception data-driven optimization of manufacturing equipment service scheduling in sustainable manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Ibrahim H. Garbie	Incorporating Sustainability/Sustainable Development Concepts in Teaching Industrial Systems Design Courses
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Krzysztof Urbaniec, Hroje Mikulcic, Yutao Wan, Neven Duic	System integration is a necessity for sustainable development
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Abdoulmohammad Gholamzadeh Chofreh, Feybi Ariani Goni, Jiri Jaromir Klemes	Sustainable enterprise resource planning systems implementation: A framework development
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Venkatesh Mani, Angappa Gunasekaran, Catarina Delgado	Supply chain social sustainability: Standard adoption practices in Portuguese manufacturing firms
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	R. Rajesh	On sustainability, resilience, and the sustainable-resilient supply networks
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Mélanie Despeisse, Miying Yang, Steve Evans, Simon Ford, Tim Minshall	Sustainable Value Roadmapping Framework for Additive Manufacturing
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Pezhman Ghadimi, Farshad Ghassemi Toosi, Cathal Heavey	A multi-agent systems approach for sustainable supplier selection and order allocation in a partnership supply chain
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Sri Hartini, Udsubakti Ciptomulyono	The Relationship between Lean and Sustainable Manufacturing on Performance: Literature Review
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	T. Stock, G. Seliger	Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Anuj Singla, Inderpreet Singh Ahuja, Amanpreet Singh Sethi	An examination of effectiveness of demand pull practices for accomplishing sustainable development in manufacturing industries
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Adriana Giret, Damien Trentesaux, Vittal Prabhu	Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Joao Paulo Estevam Souza, Joao Murta Alves	Lean-integrated management system: A model for sustainability improvement
Elsevier	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Haitem Fargani, Wai M. Cheung, Reaz Hasan	An Empirical Analysis of the Factors That Support the Drivers of Sustainable Manufacturing
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2018	Tetsuo Tomiyama, Florian Moyen	Resilient architecture for cyber-physical production systems
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2018	Philipp Savarino, Michael Abramovici, Jens Christian Göbel, Philip Gebus	Design for reconfiguration as fundamental aspect of smart products
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2016	Francisco Durán, Gwen Salaün	Robust and reliable reconfiguration of cloud applications
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2009	Mohamed Khalgui, Olfa Moshahi, Hans-Michael Hanisch	Reconfiguration Protocol for Multi-Agent Embedded Control Systems
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2009	Yitzhak Birk, Evgeny Fiksman	Dynamic reconfiguration architectures for multi-context FPGAs
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2016	Mohammed. M. Mabkhot, Ali M. Al-Samhan, Saber Darmoul	An information model to support reconfiguration of manufacturing systems
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2016	George Michalos, Platon Sipsas, Sotiris Makris, George Chryssolouris	Decision making logic for flexible assembly lines reconfiguration
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2016	Carlos Indriago, Olivier Cardin, Naly Rakoto, Pierre Castagna, Edgar Chacon	H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2012	Ratnesh Kumar, Shigemasa Takai	A Framework for Control-Reconfiguration Following Fault-Detection in Discrete Event Systems
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2017	Paolo Rena	Decision-making method of reconfigurable manufacturing systems' reconfiguration by a Gale-Shapley model
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2010	Sebastian Lange, Martin Middendorf	Multi-level reconfigurable architectures in the switch model
Elsevier	Reconfiguration Control Architectures	2014	R. Bonamy, S. Bilavarn, D. Chillet, O. Sentieys	Power consumption models for the use of dynamic and partial reconfiguration
Elsevier	Sustainable Control Architectures	2016	Jose-Fernando Jimenez, Abdelghani Bekrar, Adriana Giret, Paulo Leitão, Damien Trentesaux	A dynamic hybrid control architecture for sustainable manufacturing control
Elsevier	Sustainable Control Architectures	2018	Colin C. Venters, Rafael Capilla, Stefanie Betz, Birgit Penzenstadler, Tom Crick, Steve Crouch, Elisa Yumi Nakagawa, Christoph Becker, Carlos Carrillo	Software sustainability: Research and practice from a software architecture viewpoint
Elsevier	Sustainable Control Architectures	2018	P. P. Ray	A survey on Internet of Things architectures
Elsevier	Sustainable Control Architectures	2013	Anjan Kumar Ray, Gang Leng, T.M. McGinnity, Sonya Coleman, Liam Maguire	Development of a self sustaining cognitive architecture
Elsevier	Sustainable Control Architectures	2018	Hendrik Reefke, David Sundaram	Sustainable supply chain management: Decision models for transformation and maturity
Elsevier	Productivity in Control Architectures	2017	Hermann Meissner, Rebecca Ilsen, Jan C. Aurich	Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0
Elsevier	Productivity in Control Architectures	2017	Matthias Hacksteiner, Fabian Duer, Iman Ayatollahi, Friedrich Bleicher	Automatic Assessment of Machine Tool Energy Efficiency and Productivity
Elsevier	Productivity and Sustainability in Control Systems	2018	Conghu Liu, Wei Cai, Ognyan Dinolov, Cuixia Zhang, Weizhen Rao, Shun Jia, Li Li, Felix T.S. Chan	Energy based sustainability evaluation of remanufacturing machining systems
Elsevier	Productivity and Sustainability in Control Systems	2018	Amlendu Bajpai, Kiran Jude Fernandes, Manoj Kumar Tiwari	Modeling, analysis, and improvement of integrated productivity and energy consumption in a serial manufacturing system
Elsevier	Productivity and Sustainability in Control Systems	2018	N. Mahon, I. Crute, M. Di Bonito, E.A. Simmons, M.M. Islam	Towards a broad-based and holistic framework of Sustainable Intensification indicators
Elsevier	Productivity and Sustainability in Control Systems	2017	Mohamad Asrul Mustapha, Zainuddin Abdul Manan, Sharifah Rafidah Wan Alwi	Sustainable Green Management System (SGMS) – An integrated approach towards organisational sustainability
Elsevier	Productivity and Sustainability in Control Systems	2018	N. Soares, A.G. Martins, A.L. Carvalho, C. Caldeira, C. Du, E. Castanheira, E. Rodrigues, G. Oliveira, G.I. Pereira, J. Bastos, J.P. Ferreira, L.A. Ribeiro, N.C. Figueiredo, N. Šahović, P. Miguel, R. Garcia	The challenging paradigm of interrelated energy systems towards a more sustainable future
Elsevier	Productivity and Sustainability in Control Systems	2017	Maria Gianni, Katerina Gotzamani, George Tsiotras	Multiple perspectives on integrated management systems and corporate sustainability performance
Elsevier	Productivity and Sustainability in Control Systems	2017	Ibrahim Dincer, Canan Acar	Smart energy systems for a sustainable future
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2018	Dinesh Seth, Minhaj Ahemad A. Rehman b, Rakesh L. Shrivastava	Green manufacturing drivers and their relationships for small and medium(SME) and large industries
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2011	Ahmed M. Deif	A system model for green manufacturing
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2015	Damien Trentesaux, Adriana Giret	Go-green manufacturing holons: A step towards sustainable manufacturing operations control
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2017	Chunguang Bai, Joseph Sarkis	Improving green flexibility through advanced manufacturing technology investment: Modeling the decision process
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2015	Sebastian Greinacher, Emanuel Moser, Hanjo Hermann, Gisela Lanza	Simulation Based Assessment of Lean and Green Strategies in Manufacturing Systems

Base de dato	Keyword	Año	Autor (es)	Título
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2014	Imen Nouira, Yannick Frein, Atidel B. Hadj-Alouane	Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness-dependent demand
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2015	Nor Azah Abdul Aziz, Foong Soon Yau, Ong Tze San, Hassan Attan	A Review on Green Integration into Management Control System
Elsevier	Green Manufacturing in Control Systems	2013	Bülent Sezen, Sibel Yildiz Cankaya	Effects of Green Manufacturing and Eco-innovation on Sustainability Performance
Springer	Flexible Manufacturing Systems	2006	Hoda A. ElMaraghy	Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms
Springer	Flexible Manufacturing Systems	1999	C. Saygin and S. E. Kilic	Integrating Flexible Process Plans with Scheduling in Flexible Manufacturing Systems
Springer	Flexible Manufacturing Systems	1999	GERARD J.C. GAALMAN, JANNES SLOMP AND NALLAN C. SURESH	Towards an Integration of Process Planning and Production Planning and Control for Flexible Manufacturing Systems
Springer	Flexible Manufacturing Systems	2012	Gonca Tuncel	An integrated modeling approach for shop-floor scheduling and control problem of flexible manufacturing systems
Springer	Flexible Manufacturing Systems	1998	Chong Peng and F. Frank Chen	Real-time control and scheduling of flexible manufacturing systems: An ordinal optimisation based approach
Springer	Reconfigurable Control Systems	2008	Z. M. Bi & Sherman Y. T. Lang & M. Verner & P. Orban	Development of reconfigurable machines
Springer	Reconfigurable Control Systems	2018	Gabriel Fornari and Valdivino Alexandre de Santiago Junior	Dynamically Reconfigurable Systems: A Systematic Literature Review
Springer	Reconfigurable Control Systems	2010	I. Yu. Yunin and A. N. Feofanov	Reconfigurable production systems
Springer	Reconfigurable Control Systems	2006	D. Camahan, D. Chung, E. delaHostria, C. Hoover	Improved responsiveness of reconfigurable manufacturing systems using a standards-based approach to assess manufacturing capacity
Springer	Reconfigurable Control Systems	2000	M. G. MEHRABI, A. G. ULSOY and Y. KOREN	Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing
Springer	Reconfigurable Control Systems	2008	Nirav Chokshi and Duncan McFarlane	A distributed architecture for reconfigurable control of continuous process operations
Springer	Reconfigurable Control Systems	2010	Paolo Renna	Capacity reconfiguration management in reconfigurable manufacturing systems
Springer	Reconfigurable Control Systems	2007	Neil Bergmann, Marco Platzner and Jurgen Teich	Dynamically Reconfigurable Architectures
Springer	Reconfigurable Control Systems	2017	Yoram KOREN, Xi GU, Weihong GUO	Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends
Springer	Reconfigurable Control Systems	2002	M. G. MEHRABI, A. G. ULSOY, Y. KOREN and P. HEYTLER	Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Friedrich Prinz, Doo-Man Chun and Sung-Hoon Ahn	Preface for the Special Issue of Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Reda Nujoom & Ahmed Mohammed & Qian Wang	A sustainable manufacturing system design: A fuzzy multi-objective optimization model
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2014	David Alan Dornfeld	Moving towards green and sustainable manufacturing
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Reda Nujoom & Qian Wang & Ahmed Mohammed	Optimisation of a sustainable manufacturing system design using the multi-objective approach
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Shahed Shojaeipour	Sustainable manufacturing process planning
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Silviu Raileanu, Florin Anton, Alexandru Iatan, Theodor Borangiu, Silvia Anton, Octavian Morariu	Resource scheduling based on energy consumption for sustainable manufacturing
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Ana Beatriz Lopes de Sousa Jabbour, Charbel Jose Chiappetta Jabbour, Moacir Godinho Filho, David Roubaud	Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2018	Zhengyi Song, Young Moon	Sustainability metrics for assessing manufacturing systems: a distance-to-target methodology
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Hyoung Seok Kang, Ju Yeon Lee, SangSu Choi, Hyun Kim, Jun Hee Park, Ji Yeon Son, Bo Hyun Kim and Sang Do Noh	Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions
Springer	Sustainable Manufacturing Systems	2014	Christoph Herrmann, Christopher Schmidt, Denis Kurlle, Stefan Blume and Sebastian Thiede	Sustainability in manufacturing and factories of the future
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2013	José Luiz Fiadeiro, Antónia Lopes	A model for dynamic reconfiguration in service-oriented architectures
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2006	Nancy Alonioti & Eleni Patouni & Vangelis Gazis	Generic Architecture and Mechanisms for Protocol Reconfiguration
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2007	SEBASTIAN LANGE AND MARTIN MIDDENDORF	Design Aspects of Multi-level Reconfigurable Architectures
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2017	Christian Heinzemann, Steffen Becker, Andreas Volk	Transactional execution of hierarchical reconfigurations in cyber-physical systems
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2007	James D'Arcy Walsh · Francis Bordeleau · Bran Selic	Domain analysis of dynamic system reconfiguration
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2013	Michael Svetits · Uwe Zdun	Systematic literature review of the objectives, techniques, kinds, and architectures of models at runtime
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2015	Jaime Mesa & Heriberto Maury & René Arrieta & Antonio Bula & Carles Riba	Characterization of modular architecture principles towards reconfiguration: a first approach in its selection process
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2006	Feng Liang · Zhibin Jiang · Richard YK Fung · Liyan Tao · Mingchen Ma	Rapid reconfiguration of job shop production control system based on soft components technology
Springer	Reconfiguration Control Architectures	2015	Nuno Oliveira and Luís S Barbosa	Self-adaptation by coordination-targeted reconfigurations
Springer	Sustainable Control Architectures	2016	Erik G. Hansen · Stefan Schaltegger	The Sustainability Balanced Scorecard: A Systematic Review of Architectures
Springer	Sustainable Control Architectures	2015	S. Emec · P. Bilge · G. Seliger	Design of production systems with hybrid energy and water generation for sustainable value creation
Springer	Productivity in Control Architectures	2013	Slaviša Aleksić	Energy-efficient communication networks for improved global energy productivity
Springer	Productivity in Control Architectures	2015	Olivier Cardin, Damien Trentesaux, André Thomas, Pierre Castagna, Thierry Berger, Hind Bril El-Haouz	Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: state of the art and future challenges
Springer	Productivity in Control Architectures	2018	Erik G. Hansen, Stefan Schaltegger	Sustainability Balanced Scorecards and their Architectures: Irrelevant or Misunderstood?
Springer	Productivity and Sustainability in Control Systems	2011	Oliver Avram & Ian Stroud & Paul Xirouchakis	A multi-criteria decision method for sustainability assessment of the use phase of machine tool systems
Springer	Productivity and Sustainability in Control Systems	2017	Zhengyi Song1 & Young Moon	Assessing sustainability benefits of cybermanufacturing systems
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2005	LIU Fei, YIN Jia-xu, CAO Hua-jun, HE Yan	Investigations and practices on green manufacturing in machining systems
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2015	Wen-Bin Zhao, Jin-Woo Jeong, Sang Do Noh and John T. Yee	Energy simulation framework integrated with green manufacturing-enabled PLM information model
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2004	Ruby Pineda-Henson and Alvin B. Culaba	A diagnostic model for green productivity assessment of manufacturing processes

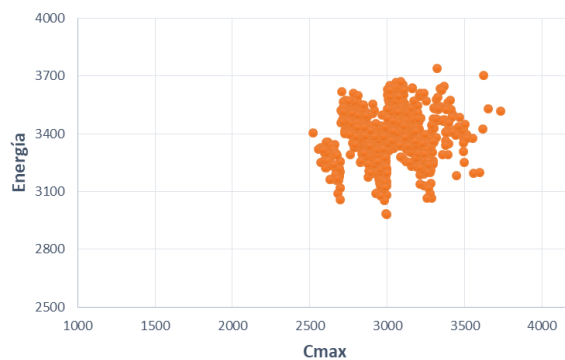
Base de dato	Keyword	Año	Autor (es)	Título
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2016	Rameshwar Dubey & Angappa Gunasekaran & Stephen J. Childe & Samuel Fosso Wamba & Thanos Papadopoulos	The impact of big data on world-class sustainable manufacturing
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2017	Zude Zhou & Bitao Yao & Wenjun Xu & Lihui Wang	Condition monitoring towards energy-efficient manufacturing: a review
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2014	Amro M. Farid	Measures of reconfigurability and its key characteristics in intelligent manufacturing systems
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2015	Paryanto · Matthias Brossog · Martin Bornschlegel · Jorg Franke	Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems
Springer	Green Manufacturing in Control Systems	2016	Mika Luukkonen & Tsung-Nan Tsa	Toward decentralized intelligence in manufacturing: recent trends in automatic identification of things
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2017	Miriam MATUŠOVÁ, Erika HRUŠKOVÁ	MATERIAL FLOW ALTERNATIVES OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM.
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2017	Sebastian Scholze, Jose Barata and Dragan Stokic	Holistic Context-Sensitivity for Run-Time Optimization of Flexible Manufacturing Systems
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2016	Florentina Alina Toader	A Hybrid Algorithm for Production Scheduling in Flexible Manufacturing Systems: A Case Study
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2017	A. MEHRABIAN, R. TAVAKKOLI-MOGHADDAM AND K. KHALILI-DAMAGHANI	MULTI-OBJECTIVE ROUTING AND SCHEDULING IN FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS UNDER UNCERTAINTY
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2011	O. A. Joseph & R. Sridharan	Effects of routing flexibility, sequencing flexibility and scheduling decision rules on the performance of a flexible manufacturing system
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2011	O. A. Joseph & R. Sridharan	Evaluation of routing flexibility of a flexible manufacturing system using simulation modelling and analysis
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2012	Peter KOSTAL, Andrea MUDRIKOVA, Radovan HOLUBEK	LAYOUT DESIGN OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM
EBSCO	Flexible Manufacturing Systems	2013	Rahul Caprihan & Ashok Kumar & Kathryn E. Stecke	Evaluation of the impact of information delays on flexible manufacturing systems performance in dynamic scheduling environments
EBSCO	Reconfigurable Control Systems	2005	A. Esna Ashari, A. Khaki Sedigh & M. J. Yazdanpanah	Reconfigurable control system design using eigenstructure assignment: static, dynamic and robust approaches
EBSCO	Reconfigurable Control Systems	2011	Mohamed Khalgui and Hans-Michael Hanisch	Reconfiguration Protocol for Multi-Agent Control Software Architectures
EBSCO	Reconfigurable Control Systems	2011	A.O. Oke, K. Abou-El-Hossein & N.J. Theron	THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF A RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEM
EBSCO	Sustainable Manufacturing Systems	2016	Tariq Aljuneidi & Akif Asil Bulgak	A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems
EBSCO	Sustainable Manufacturing Systems	2017	Oussama Masmoudi · Alice Yalaoui · Yassine Ouazene · Hicham Chehade	Solving a capacitated flow-shop problem with minimizing total energy costs
EBSCO	Sustainable Manufacturing Systems	2015	Mikko Kohoa, Mikko Tapaninahob, Juhani Heilalaa and Seppo Torvinen	Towards a concept for realizing sustainability in the manufacturing industry
EBSCO	Sustainable Manufacturing Systems	2012	PESCHL, Michael; ROENING, Juha & LINK, Norbert	DISTRIBUTED SIMULATION FOR TASK-DRIVEN FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS
EBSCO	Reconfiguration Control Architectures	2012	Slim Kallel · Mohamed Hadj Kacem · Mohamed Jmaiel	Modeling and enforcing invariants of dynamic software architectures
EBSCO	Reconfiguration Control Architectures	2008	Rupa Sampath, Houshang Darabi, Ugo Buy and Jing Liu	Control Reconfiguration of Discrete Event Systems With Dynamic Control Specifications
EBSCO	Reconfiguration Control Architectures	2005	J. Andersson and J. Bosch	Development and use of dynamic product-line architectures
EBSCO	Reconfiguration Control Architectures	2007	R. Galan · J. Racero · I. Eguia · D. Canca	A methodology for facilitating reconfiguration in manufacturing: the move towards reconfigurable manufacturing systems
EBSCO	Sustainable Control Architectures	2017	Luigi Rubino, Clemente Capasso, Ottorino Veneri	Review on plug-in electric vehicle charging architectures integrated with distributed energy sources for sustainable mobility
EBSCO	Sustainable Control Architectures	2011	George Kuk and Marijn Janssen	The Business Models and Information Architectures of Smart Cities
EBSCO	Productivity in Control Architectures	2014	Mateus Beck Rutzig, Antonio Carlos Schneider Beck, Luigi Carro	Adaptive and dynamic reconfigurable multiprocessor system to improve software productivity
Google Scholar	Reconfigurable and sustainable manufacturing control systems	2016	L. Monostori, B. Ka'da' r, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, K. Ueda	Cyber-physical systems in manufacturing
Google Scholar	Reconfigurable and sustainable manufacturing control systems	2016	Behzad Esmailiana, Sara Behdad, Ben Wang	The evolution and future of manufacturing: A review
Google Scholar	Reconfigurable and sustainable manufacturing control systems	2015	Rameshwar Dubey, Angappa Gunasekaran & Anindya Chakrabarty	World-class sustainable manufacturing: framework and a performance measurement system
Google Scholar	Reconfigurable and sustainable manufacturing control systems	2014	Yingjie Zhang	Review of recent advances on energy efficiency of machine tools for sustainability
Google Scholar	Reconfigurable and sustainable manufacturing control systems	2016	Jagjit Singh Srail, Mukesh Kumar, Gary Graham, Wendy Phillips, James Toozee, Simon Ford, Paul Beecher, Baldev Raj, Mike Gregory, Manoj Kumar Tiwari, B. Ravi, Andy Neely, Ravi Shankar, Fiona Charnley & Ashutosh Tiwari	Distributed manufacturing: scope, challenges and opportunities
Google Scholar	Reconfigurable and sustainable manufacturing control systems	2015	Laid Kahloul, Samir Bouekkache and Karim Djouani	Designing reconfigurable manufacturing systems using reconfigurable object Petri nets

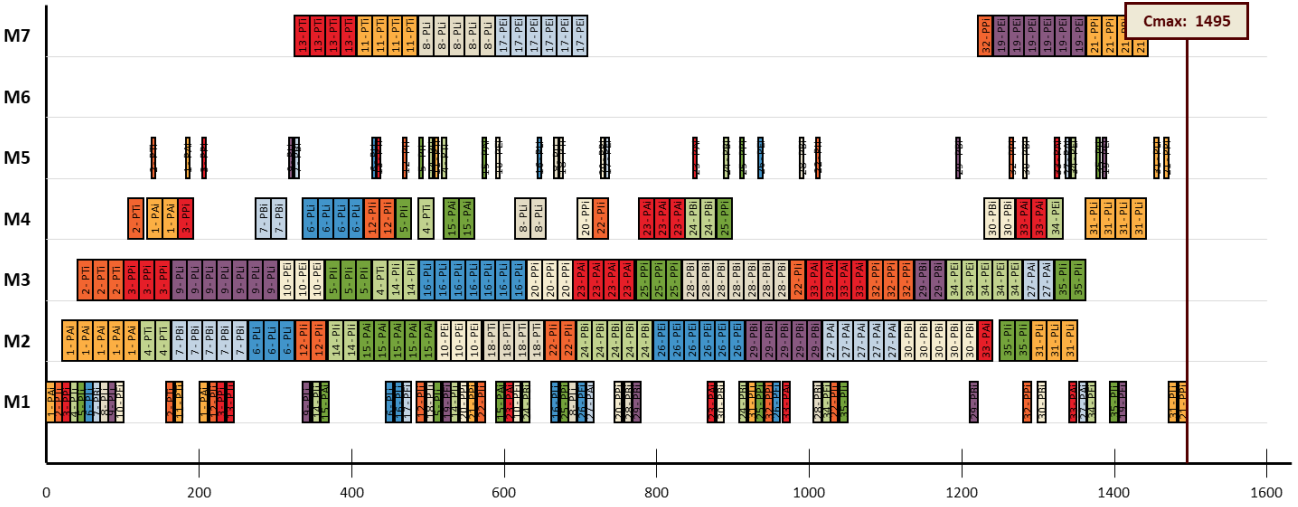
○ Bernoulli 50,50



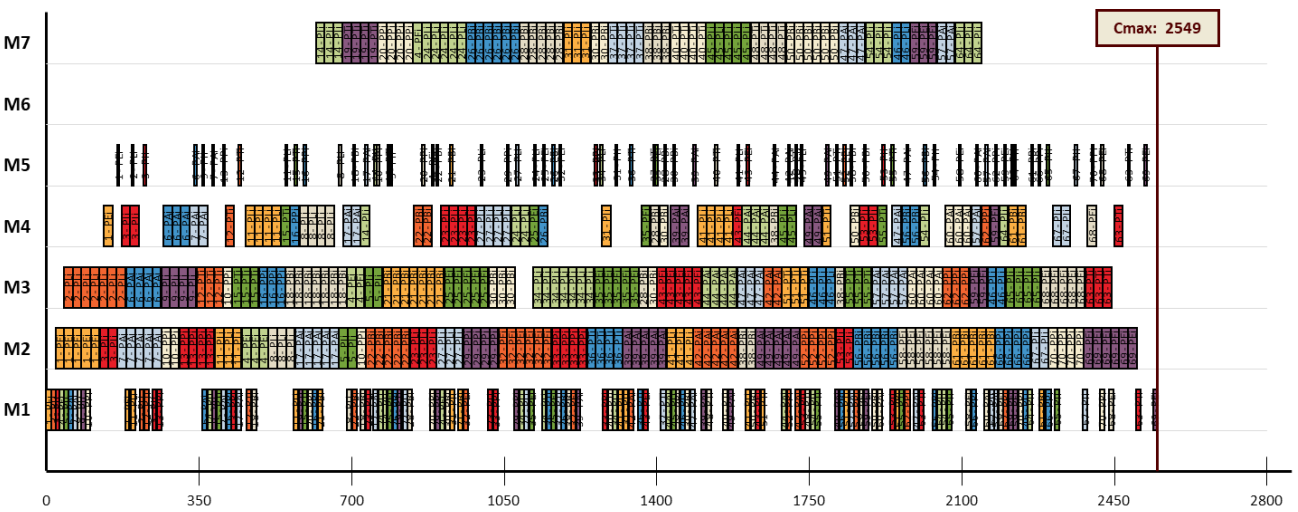
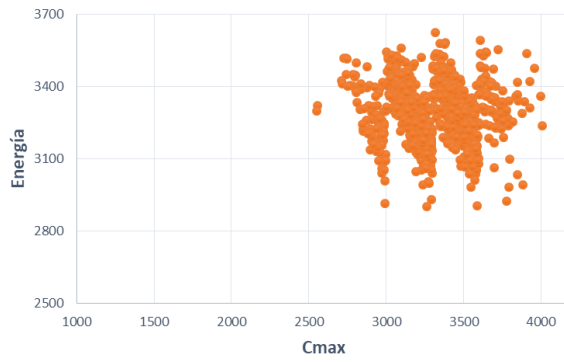
● Escenario 2: 70 productos

○ Bernoulli 30,70



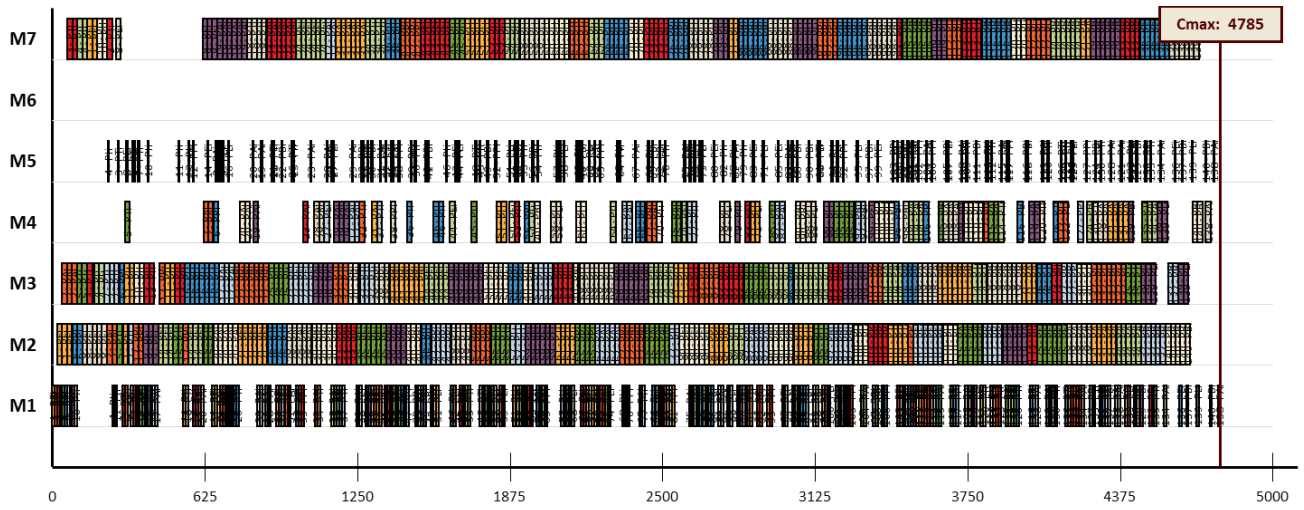
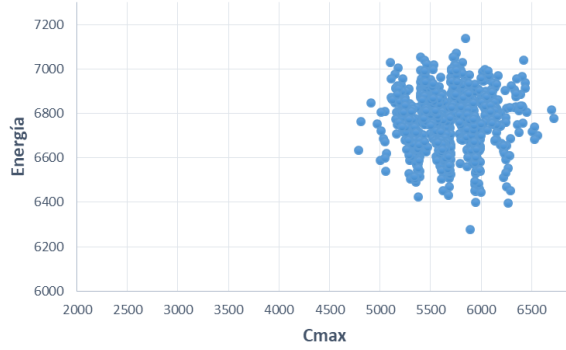


○ Bernoulli 50,50

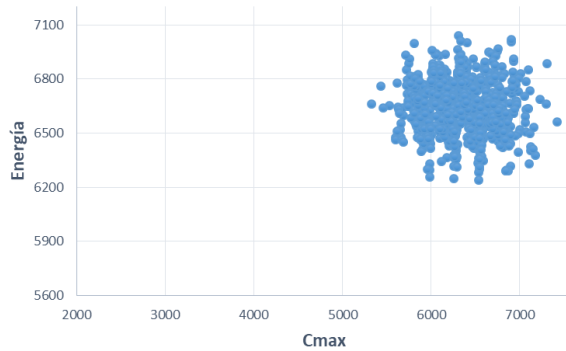


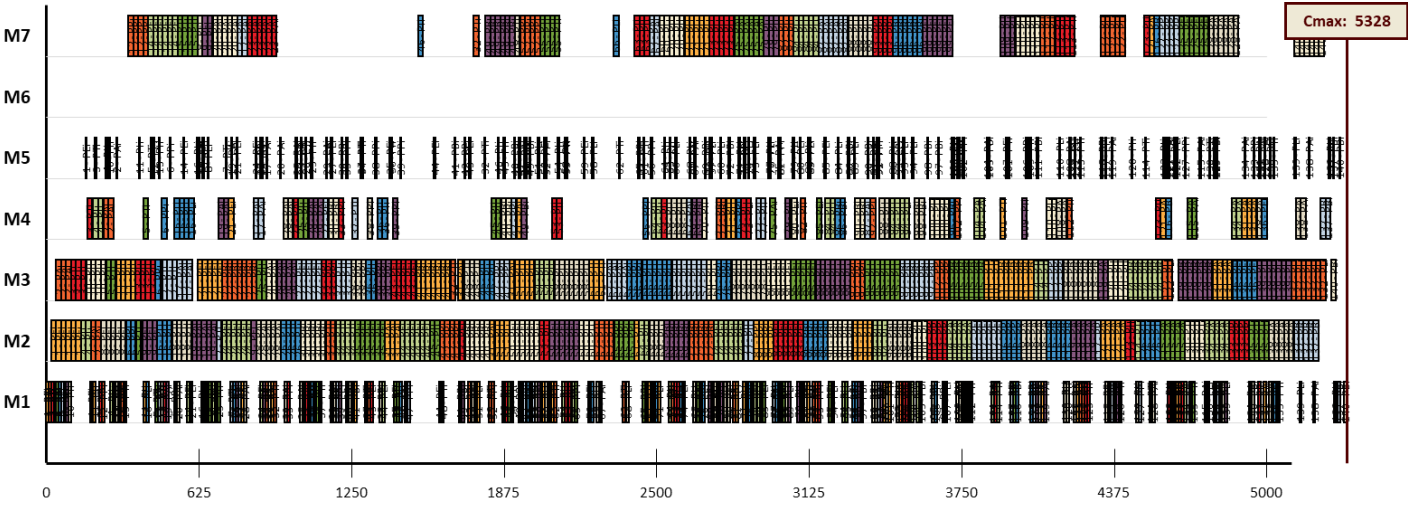
- Escenario 3: 140 productos

- *Bernoulli 30,70*



- *Bernoulli 50,50*



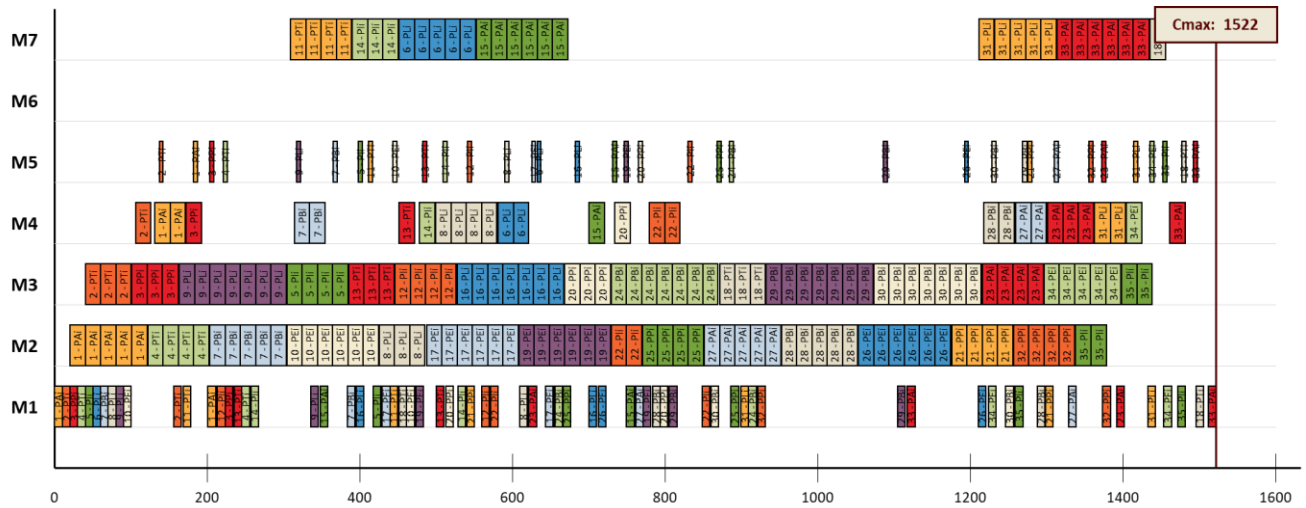


ANEXO 3

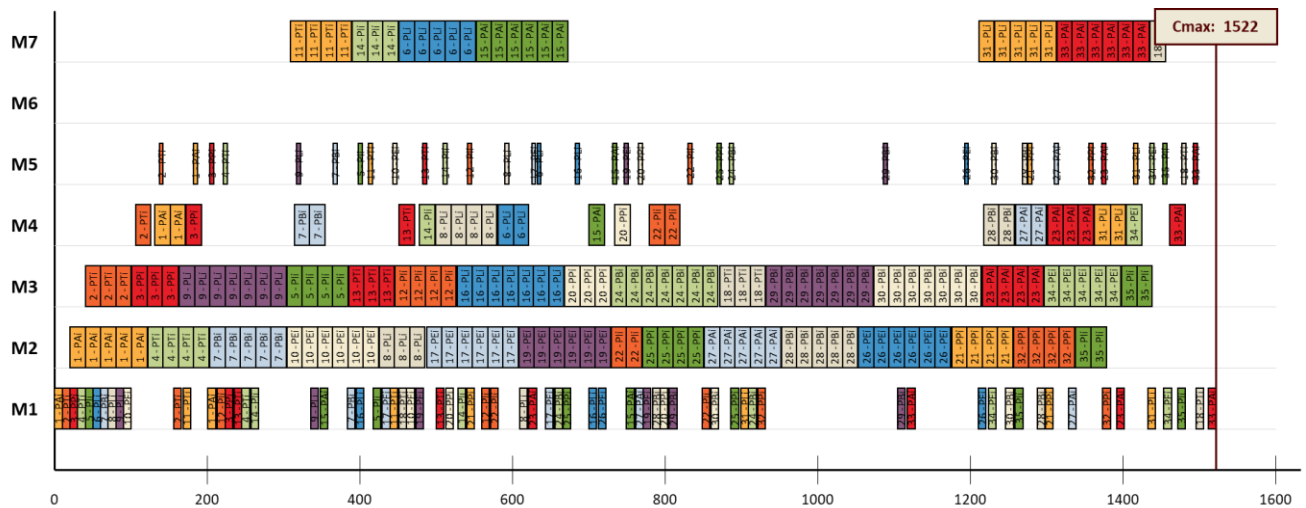
Resultados modelo reactivo

- Escenario 1: 35 productos

- Atracción

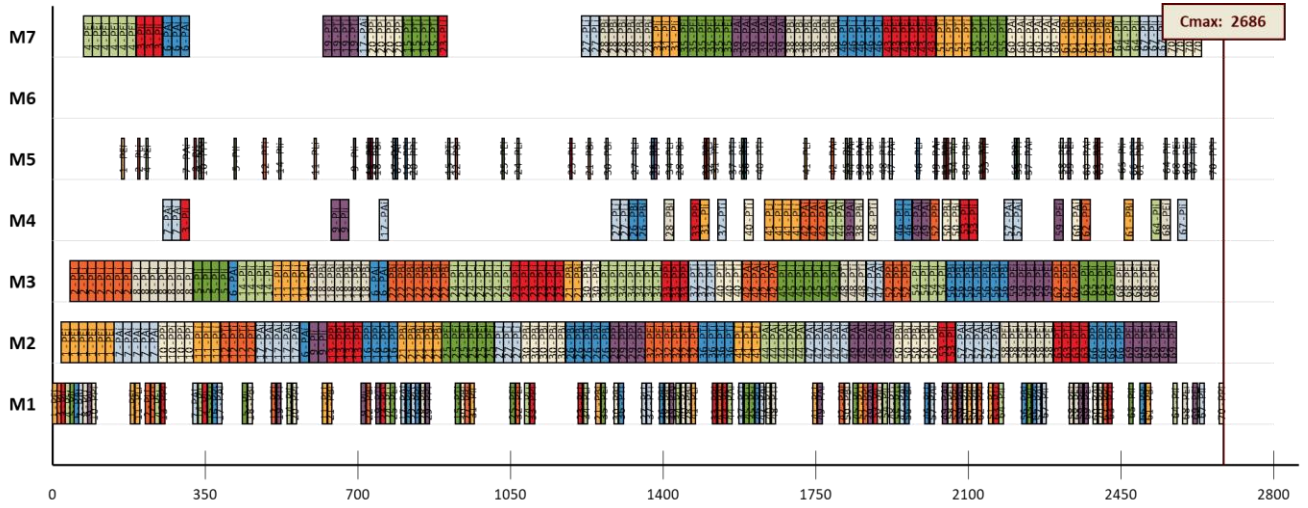


- Atracción e intención

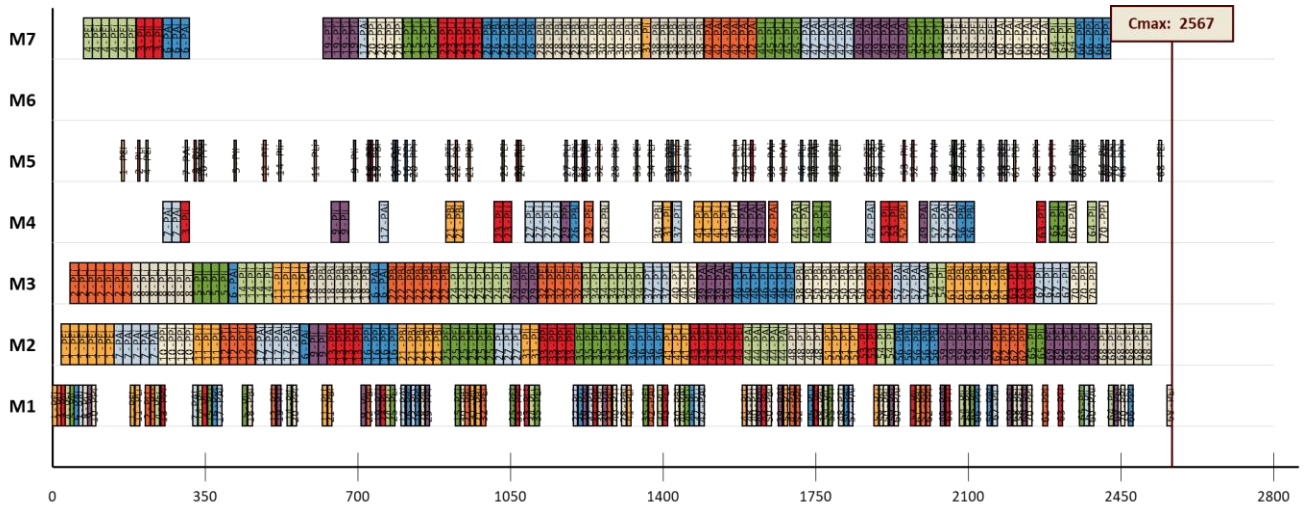


- Escenario 2: 70 productos

- *Atracción*

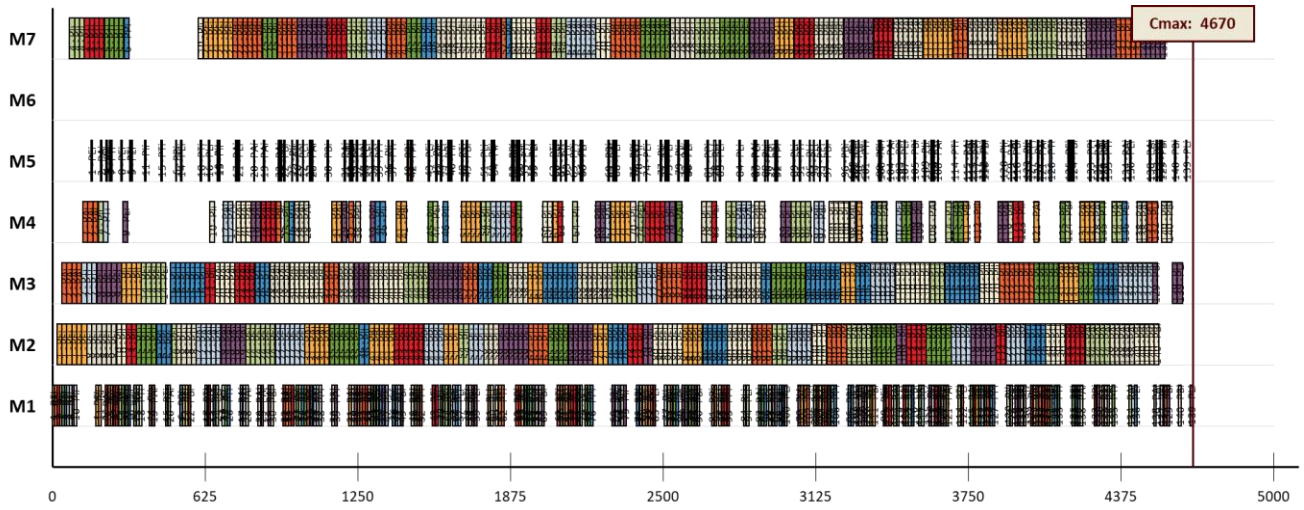


- *Atracción e intención*

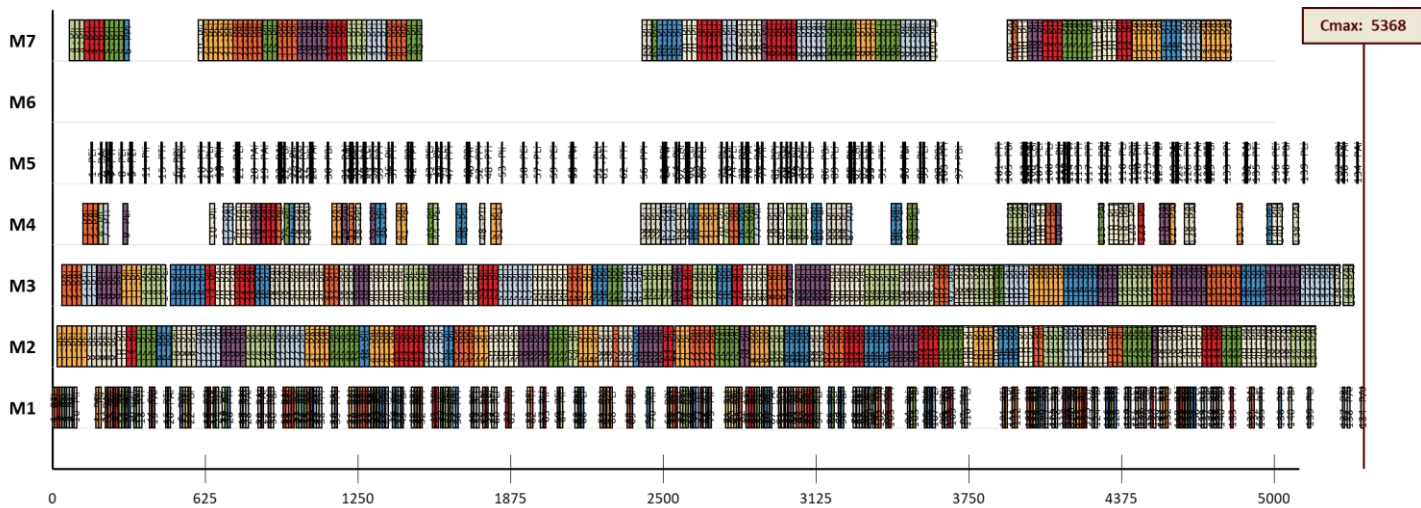


- Escenario 3: 140 productos

- *Atracción*



- *Atracción e intención*

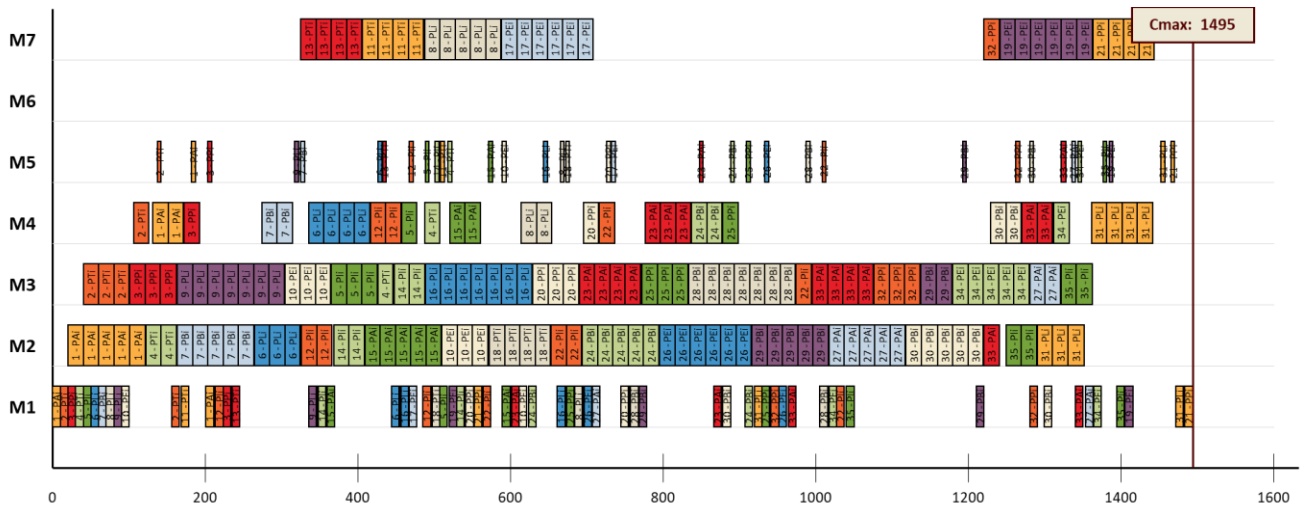


ANEXO 4

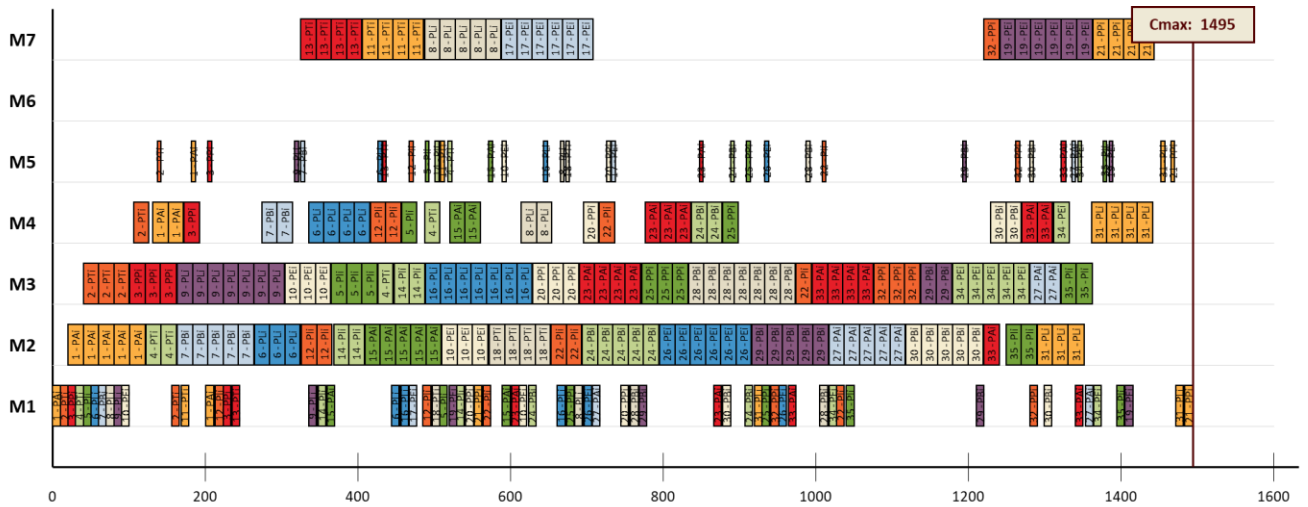
Resultados modelo predictivo-reactivo

- Escenario 1: 35 productos

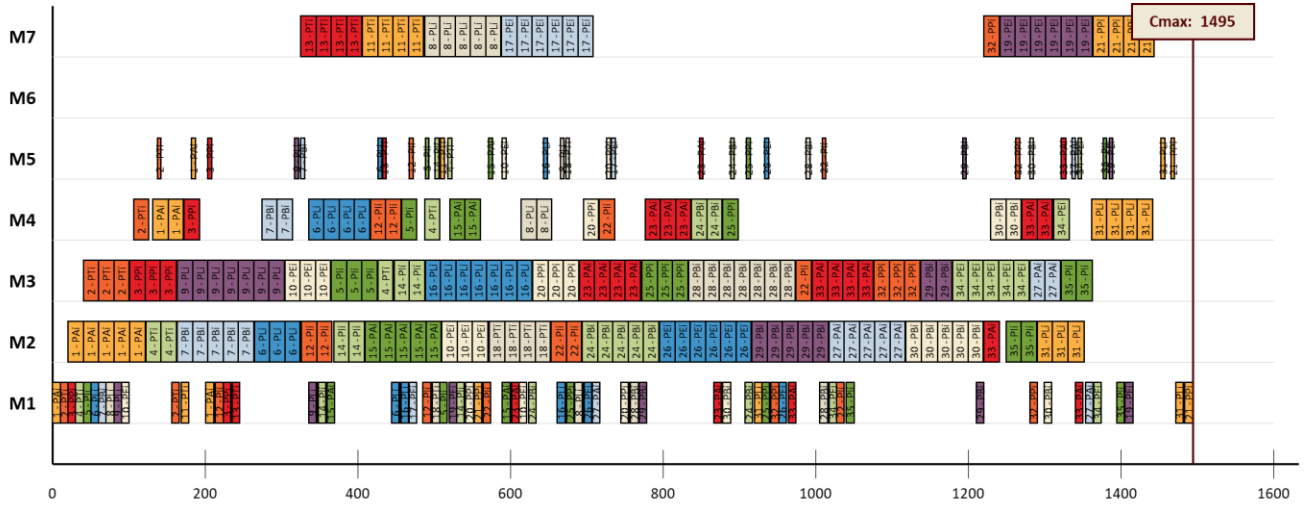
- 20%



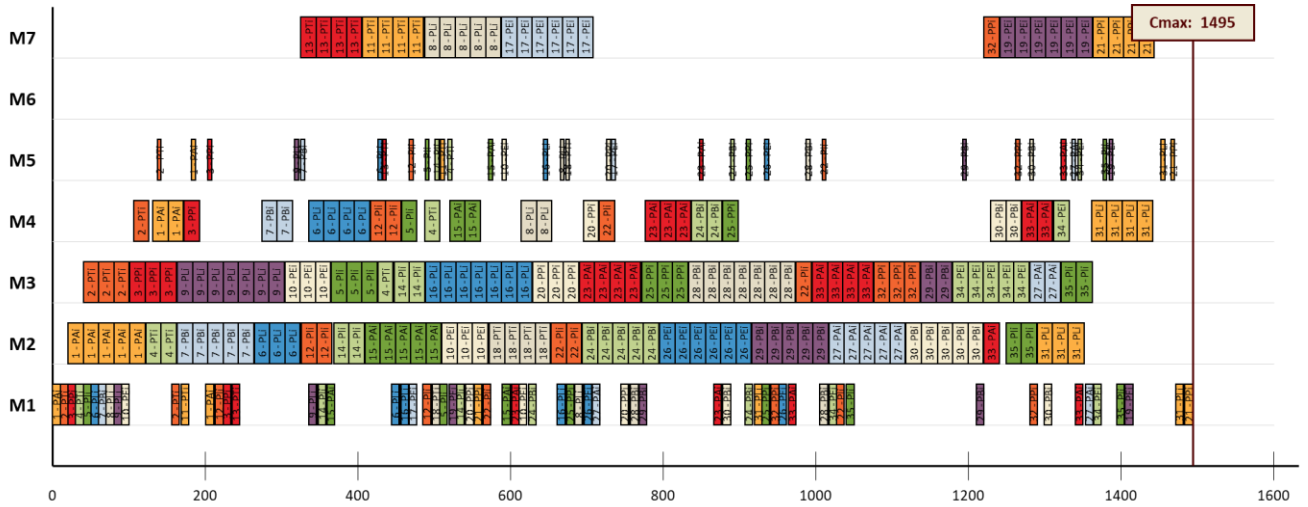
- 40%



○ 60%

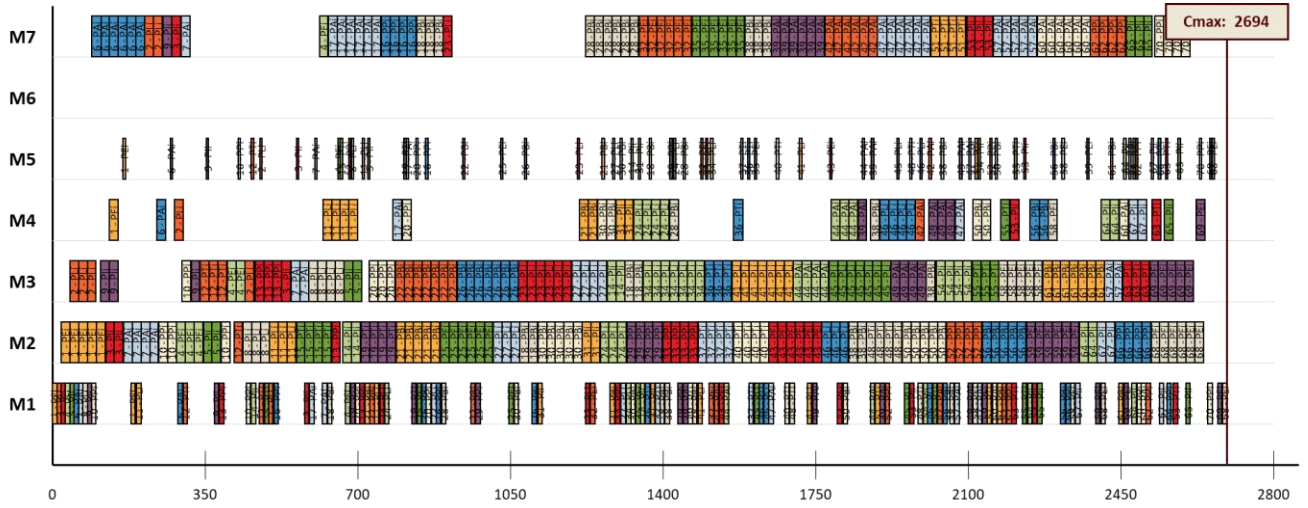


○ 80%

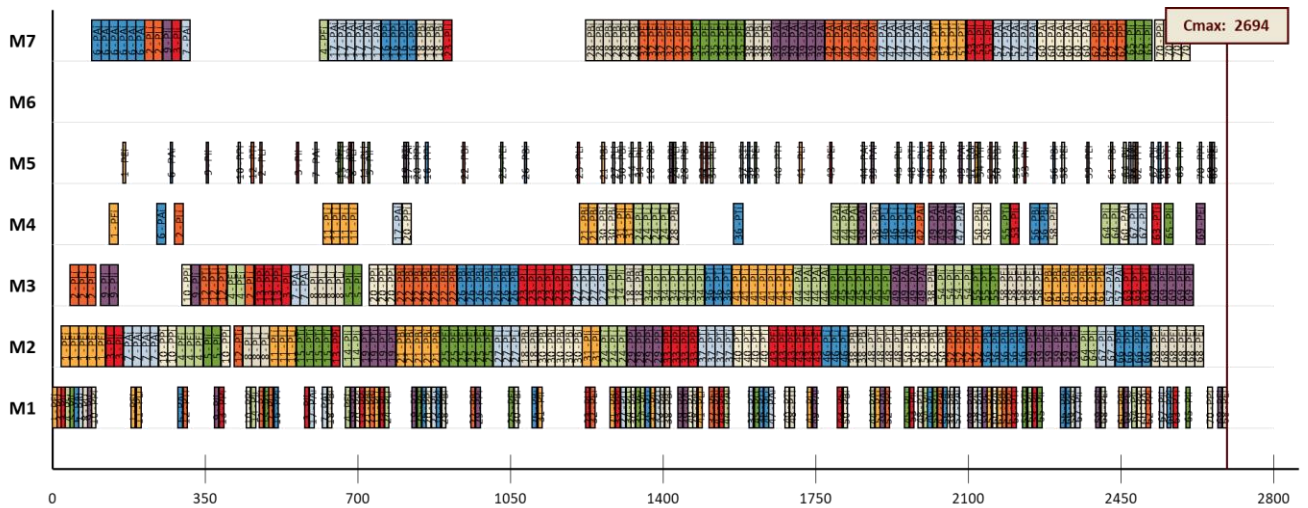


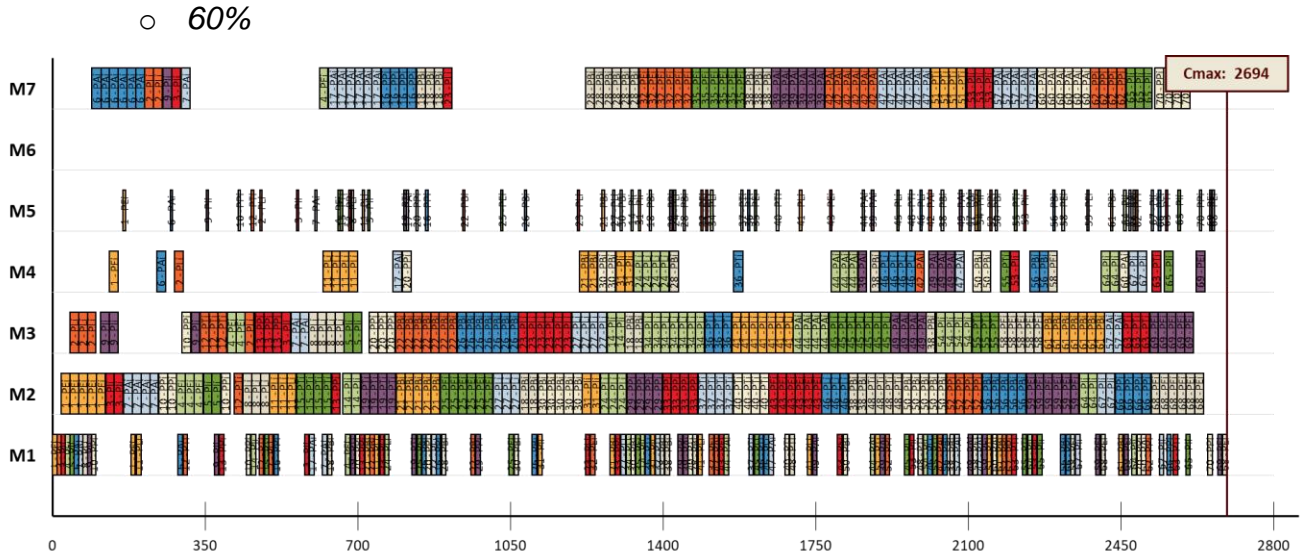
- Escenario 2: 70 productos

- 20%



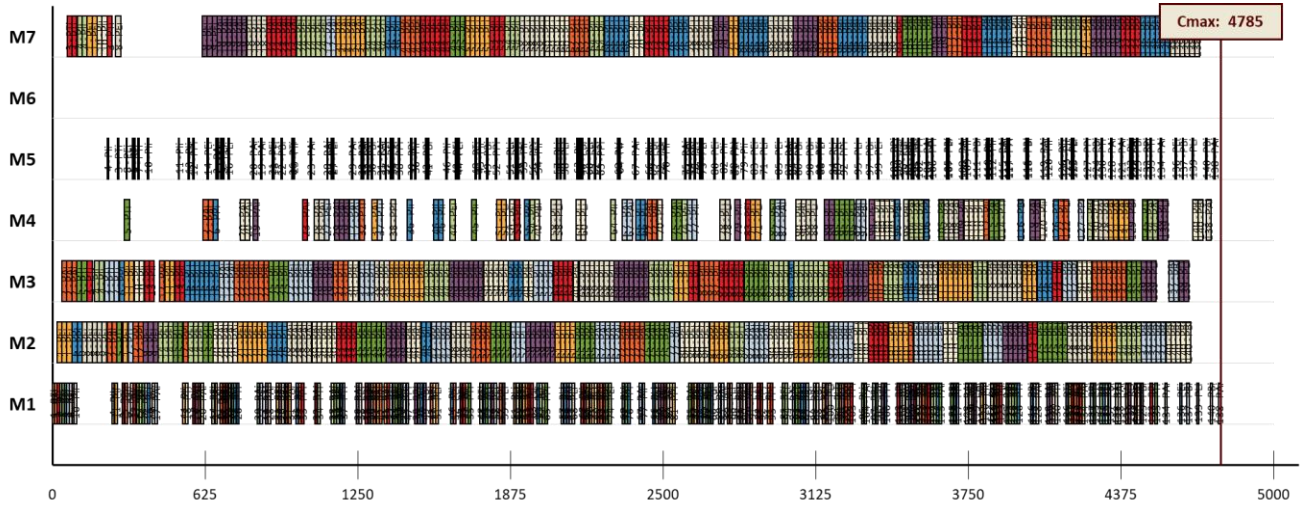
- 40%





- Escenario 3: 140 productos

- 20%



- 40%

