



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE UNA MEDIDA DE FLEXIBILIDAD PARA  
SISTEMAS PRODUCTIVOS DEL TIPO JOB SHOP FLEXIBLE EN  
ENTORNOS MULTIAGENTES**

POR

**Benjamín Osvaldo León Bustamante**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Magíster en Ingeniería Industrial

Profesor Guía  
Dr. Carlos Enrique Herrera López

Profesor Co-Guía  
Dr. Patricio Sáez Bustos

Octubre 2023  
Concepción (Chile)  
© 2023 Benjamín Osvaldo León Bustamante

© 2023 Benjamín Osvaldo León Bustamante  
Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o  
procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## Resumen

Los problemas relacionados con la planificación de la producción han experimentado cambios significativos en los últimos tiempos. Uno de los desafíos más frecuentes tanto en la literatura como en la industria es la secuenciación del Job Shop Flexible. Este problema se enmarca dentro de la programación y se considera una extensión del clásico problema del Job Shop. La adaptación de este proceso representa una mejora significativa para los fabricantes actuales, ya que los avances tecnológicos permiten que una máquina pueda manejar más de una operación. La creciente cantidad de posibles soluciones ha llevado a que este problema se clasifique como NP-hard en términos de complejidad computacional. En consecuencia, presenta un desafío en términos de la flexibilidad de los procesos, en lo que respecta a la asignación de operaciones a un conjunto de máquinas disponibles.

En este estudio se propone una medida de desempeño diseñada para cuantificar la flexibilidad en sistemas productivos de tipo Job Shop Flexible. Esta medida se desarrolla a partir de diversas perspectivas de flexibilidad mencionadas en diferentes artículos científicos y se emplea para evaluar un problema encontrado en la literatura, a través de dos modelos; un modelo tradicional y un modelo Product Driven System (PDS) al someterse a eventos que alteran la planificación.

Los resultados obtenidos indican que el modelo PDS supera al modelo tradicional en términos de flexibilidad, en promedio, existe una diferencia porcentual de un 3,8%. Esto se traduce en un menor impacto de las perturbaciones debido a la capacidad de los productos para tomar decisiones autónomas y optimizar sus acciones en función de las nuevas condiciones. En términos del tiempo de finalización del sistema, el modelo tradicional presenta un aumento promedio de un 34% luego de sufrir una perturbación, mientras que el modelo PDS un aumento de un 25%.

Dada la consistencia de estos resultados con la literatura y la realidad de los modelos inteligentes, se respalda la validez y aplicabilidad de la medida de flexibilidad para evaluar la respuesta de los sistemas ante eventos inesperados, tanto internos como externos. Esto respalda la idea de que las organizaciones que adoptan una arquitectura anárquica en su proceso de fabricación logran un rendimiento superior y una mayor competitividad en el mercado actual, permitiéndoles satisfacer de manera más eficiente, rápida y ágil la demanda comercial.

**Palabras Claves:** Sistema inteligente de manufactura, Job Shop Flexible, Flexibilidad.

## Summary

The problems related to production planning have undergone significant changes in recent times. One of the most frequent challenges in both literature and industry is the sequencing of the Flexible Job Shop. This problem falls within the realm of scheduling and is considered an extension of the classic Job Shop problem. Adapting this process represents a significant improvement for current manufacturers, as technological advances enable a machine to handle more than one operation. The increasing number of possible solutions has led to the classification of this problem as NP-hard in terms of computational complexity. Consequently, it poses a challenge in terms of process flexibility, particularly concerning the assignment of operations to a set of available machines.

This study proposes a performance measure designed to quantify flexibility in Flexible Job Shop production systems. This measure is developed from various flexibility perspectives mentioned in different scientific articles and is used to evaluate a problem found in the literature through two models: a traditional model and a Product Driven System (PDS) model subjected to events that disrupt the schedule.

The results indicate that the PDS model outperforms the traditional model in terms of flexibility. On average, there is a percentage difference of 3.8%. This translates to a lower impact of disturbances due to the products' ability to make autonomous decisions and optimize their actions based on new conditions. In terms of system completion time, the traditional model shows an average increase of 34% after a disruption, while the PDS model shows an increase of 25%.

Given the consistency of these results with the literature and the reality of intelligent models, the validity and applicability of the flexibility measure to assess system response to unexpected events, both internal and external, are supported. This reinforces the idea that organizations adopting an anarchic architecture in their manufacturing process achieve superior performance and greater competitiveness in the current market, enabling them to more efficiently, quickly, and agilely meet commercial demand.

**Keywords:** Intelligent Manufacturing System, Flexible Job Shop, Flexibility.

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	1
1.1 Objetivo General.....	2
1.2 Objetivos Específicos .....	2
2. Revisión Bibliográfica.....	3
2.1 Sistema de producción y planificación de la producción .....	3
2.2 Job Shop Flexible .....	6
2.3 Sistema inteligente de manufactura .....	7
2.4 Sistema de fabricación flexible.....	9
2.5 Sistema basado en agentes.....	10
2.6 Product Driven System (PDS).....	12
2.7 Flexibilidad.....	13
3. Materiales y métodos .....	25
3.1 Medida de Flexibilidad.....	25
3.2 Modelo PDS .....	27
3.3 Presentación del problema.....	30
3.4 Diseño Experimental .....	32
4. Resultados .....	36
4.1 Resolución instancia 1 .....	36
4.1.1 Resultado modelo tradicional .....	36
4.1.2 Resultado modelo PDS .....	39
4.2 Resultados 100 instancias.....	42
5. Discusión de resultados .....	44
5.1 Perturbación tipo 1.....	44
5.1.1 Caso instancias con 1 producto.....	44
5.1.2 Caso instancias con 2 productos .....	46
5.1.3 Caso instancias con 3 productos o más.....	47
5.2 Perturbación tipo 2.....	48
6. Conclusiones .....	51
7. Referencias .....	53
8. Anexos.....	59
Anexo I. Instancias del modelo .....	59

## 1. Introducción

Las organizaciones se encuentran en una búsqueda constante de nuevas alternativas para mejorar la productividad y hacer más eficientes sus procesos. Una respuesta a esto, ha sido la migración a la utilización de una arquitectura anárquica en la fabricación, que busca delegar a los productos la autoridad para la toma de decisiones, los cuales no necesitan control ni supervisión centralizada (Ma et al., 2019). Con esto, evoluciona la forma en que se han venido tomando decisiones en el último tiempo, donde la comunicación que existen entre las distintas áreas no es la adecuada (se da porque las fábricas se basan en una estructura jerárquica tradicional). La arquitectura anárquica ha impulsado el desarrollo de la industria 4.0 a través de nuevas aristas como los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS) y los Sistemas Multi-Agente (MAS), y con ello, se ha logrado implementar los conceptos de agilidad, adaptabilidad, autonomía y flexibilidad en los sistemas de producción (McFarlane et al., 2002).

La flexibilidad en los sistemas de fabricación es una de las propiedades más buscadas en métodos modernos y una de las técnicas centrales más importantes para los sistemas de fabricación inteligentes. Pero, aun así, la flexibilidad es poco manejada en cuanto a la teoría y menos utilizada en la práctica. Una de estas razones se debe a que no existe un acuerdo sobre la definición de la flexibilidad, pudiéndose encontrar más de 70 términos diferentes (tipos y medidas) en la literatura (Shewchuk & Moodie, 1998). La flexibilidad establece cuánto margen tenemos en el proceso de toma de decisiones, para obtener y mantener buenas soluciones en los problemas de operaciones bajo una variedad de condiciones. Es decir, puede indicar cuánto es el margen que se tiene para obtener una solución óptima o qué tan bien puede reaccionar el proceso frente a un cambio del entorno. (Buzacott & Mandelbaum, 2008).

En este estudio, se propone una medida de desempeño que permite medir la flexibilidad en sistemas Job Shop Flexible. Esta medida fue diseñada en base a las diferentes formas de medir la flexibilidad encontradas en la literatura, aplicada a distintos sectores. Se medirá la flexibilidad de dos modelos en el marco de un problema encontrado en la literatura: "*Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems*" por Jimenez et al. (2017). Los modelos que desarrollan el problema son un modelo Tradicional y un modelo Product Driven System (PDS) que trabaja bajo el enfoque de *la primera máquina disponible*. Para ello, se generan 100 instancias

con distintos parámetros que permitirán entender como se va comportando la flexibilidad de cada modelo en distintos escenarios.

Se tiene la hipótesis que esta medida de desempeño permitirá conocer la flexibilidad de cada modelo en cada instancia al verse afectado a una perturbación y concluir que el modelo PDS (dada su arquitectura que ofrece buenas soluciones) es más flexible que el modelo tradicional.

### **1.1 Objetivo General**

Proponer una medida de flexibilidad que permita el análisis de sistemas productivos en un problema de Job Shop Flexible a través de una simulación Multi-Agente (MAS).

### **1.2 Objetivos Específicos**

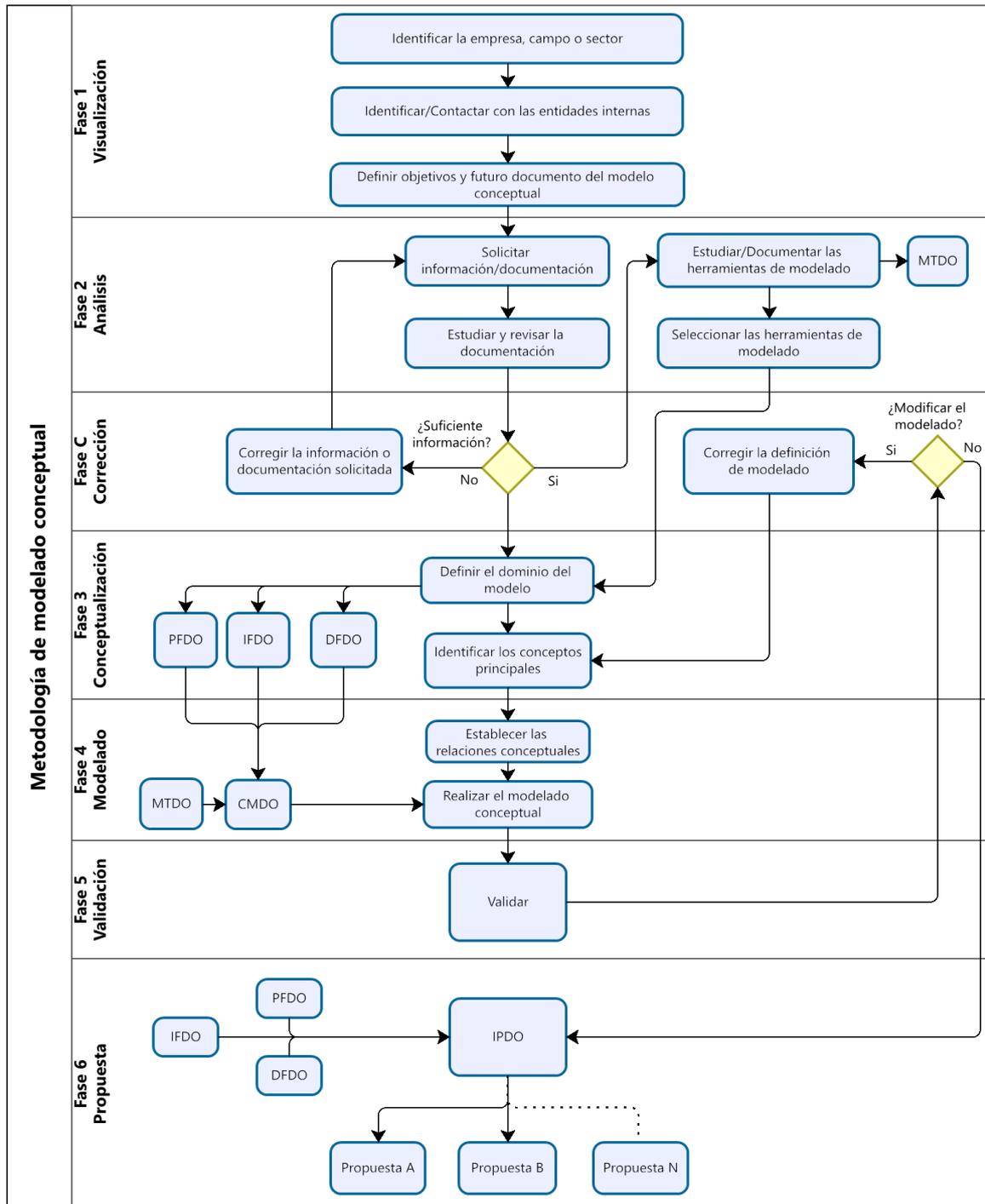
1. Comprender el concepto y alcance en la medición de la flexibilidad en la literatura
2. Definir una medida de desempeño para la flexibilidad en un problema de Job Shop Flexible
3. Verificar la importancia de la implementación de un modelo proactivo y reactivo frente a perturbaciones
4. Definir dos tipos de perturbación que afectarán el sistema
5. Entender y clasificar el comportamiento de las operaciones de un producto cuando sufren una perturbación según el modelo de trabajo

## **2. Revisión Bibliográfica**

### **2.1 Sistema de producción y planificación de la producción**

Un sistema de producción es la forma en la que se utilizan y se combinan los factores productivos transformándolos para convertirlos en bienes y servicios. La planificación de la producción consiste en la determinación simultánea de los niveles de producción, inventario y capacidad de una empresa en un horizonte finito de planificación con el objetivo de minimizar los costos totales generados por los planes de producción. Las empresas manufactureras están rediseñando sus sistemas de producción para abordar nuevas tecnologías de producción o cambios de productos, lo que requiere un proceso de planificación integral para formar los cambios de diseño finales (Lindskog et al., 2016).

En la Figura 2.1 se presenta un esquema de Hernández et al. (2008), donde se propone un modelo de referencia para el modelado conceptual de los procesos de planificación considerando las principales actividades. Fase 1 (visualización), fase 2 (análisis), fase 3 (conceptualización), fase 4 (modelado), fase 5 (validación), fase 6 (propuesta) y fase C (verificación y corrección).



**Figura 2.1.** Detalles de la metodología de modelado conceptual (Hernández et al., 2008).

- **Fase 1:** Consiste en obtener un conocimiento adecuado de los procesos y actividades para obtener la definición del dominio del modelo. una de las tareas principales de esta fase es la definición del equipo de trabajo del modelado conceptual.
- **Fase 2:** Considera el análisis de los procesos en los documentos existentes en la empresa. Estos documentos respaldarán la posterior definición del dominio.

- **Fase 3:** En esta fase, la identificación de los aspectos estáticos y dinámicos del problema lleva a establecer una serie de definiciones o glosarios para facilitar comunicación entre los miembros del equipo de trabajo.
- **Fase 4:** Aquí se establecen los modelos que mejor explican el dominio. Esta fase debe considerar las herramientas que han sido estudiados en una primera fase que dará soporte a las diferentes representaciones de dominio a considerar.
- **Fase 5:** En esta fase se valida el modelo conceptual y los documentos asociados. El proceso de validación está formado por las entidades internas y el equipo de desarrollo.
- **Fase 6:** Cuando se valida el modelo conceptual, se obtiene el modelo tal cual. A partir de este modelo tal como está, es posible formular propuestas de mejora o aplicar otras técnicas de modelado para la representación del sistema actual que podrían proporcionar una mejor comprensión al considerar otros problemas o aspectos del dominio.
- **Fase C:** Si aparecen inconsistencias desde la fase de validación, se debe utilizar la fase de corrección.

Dentro de una organización, el problema de planificación y control de la producción se establece como un problema complejo dado que involucra la solicitud de recursos escasos para lograr satisfacer al cliente. Es por esto que, es importante crear metodologías que permitan alcanzar estos objetivos. En los sistemas de producción se pueden mencionar los sistemas continuos de fabricación, los sistemas Flow shop y los sistemas Job shop. En el sistema de Job Shop se fabrican pequeños lotes de una gran variedad de productos, cada producto presenta una secuencia diferente tanto en su operación como en el flujo a través del taller. Estas características vuelven al sistema Job shop altamente complejo para la programación de operaciones que se llevan a cabo en ellos. Entre los sistemas Job shop existe el denominado Job shop flexible, el cual tiene como característica adicional que las diferentes operaciones pueden ser procesadas en cualquier máquina de un conjunto de ellas existentes en el taller (Osorio & Mota, 2008).

## 2.2 Job Shop Flexible

En las empresas de tipo manufacturero, la planificación de su operación se convierte en el núcleo central de dicho sistema. El problema de la planificación de la producción reviste un carácter complejo dada la cantidad de elementos que involucra y las múltiples interrelaciones existentes entre ellos; esto ha hecho que, en torno a la solución de este, se hayan desarrollado gran cantidad de trabajos. Existen diversos sistemas de producción entre ellos se puede mencionar los sistemas de Job shop o taller de tareas (Osorio & Motoa, 2008).

La dimensión del problema del Job shop viene dada por  $n \times m$ , siendo  $n$  el número de trabajos y  $m$  el número de máquinas, de tal manera que se tienen al menos  $(n!)^m$  posibles soluciones generándose una explosión combinatoria al crecer  $n$  y  $m$  (Sotskov & Shakhlevich, 1995). El crecimiento exponencial del número de posibles soluciones hace que este problema sea reconocido como NP – hard. La completa enumeración de todas estas posibilidades para identificar el programa óptimo no es práctico y supremamente demandante de recursos de computación (Jorapur et al., 2014).

En un Job shop tanto las máquinas como los recursos son agrupados en función de sus facultades de procesamiento. Las máquinas gracias a la flexibilidad de sus procesos son capaces de realizar varias operaciones de fabricación por lo cual pueden manejar diferentes tipos de productos. Los productos visitan a las máquinas en función de la secuencia dicha por cada operación ya que estas cuentan con una asignación previa de operaciones a las máquinas. Luego, para que el producto sea transferido de una máquina a otra se utiliza un sistema de manejo de materiales.

Un programa consiste en asignar y secuenciar las operaciones a las máquinas en un orden definido, de manera que el problema es encontrar el programa que satisfaga el criterio establecido, el cual generalmente está asociado con la terminación de todas las operaciones de todos los trabajos en el menor tiempo posible.

Una extensión del Job shop es el Job shop flexible. En esta extensión, para cada operación existe un conjunto de máquinas equivalentes la cual puede presentar diferentes características de procesamiento ya sea con respecto al tiempo de espera, calidad y capacidad de las máquinas, etc. Por lo cual, para el mismo producto existen diferentes secuencias de máquinas. La programación de un Job shop flexible incluye minimizar los valores máximo y medio del tiempo de flujo, del

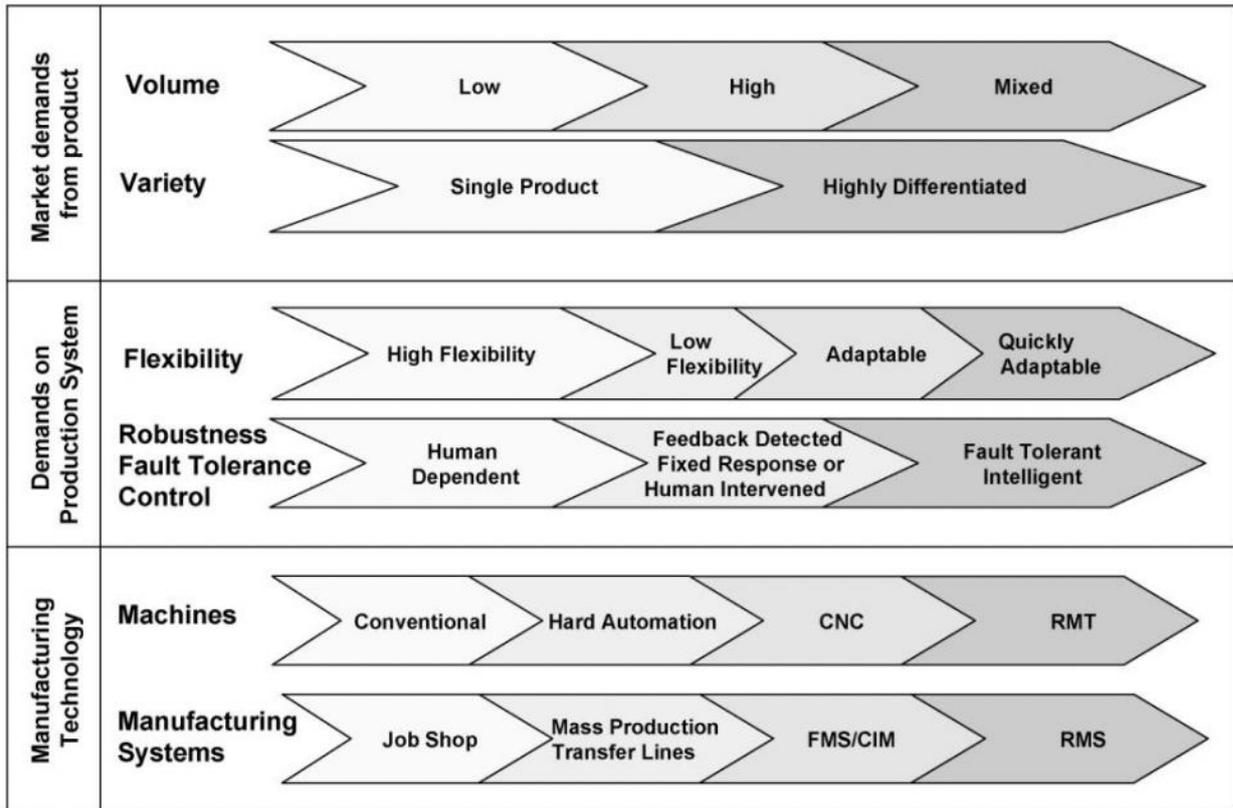
tiempo de finalización (Makespan), de la tardanza (Tardiness) y del retraso (Latness), y minimizar el número de trabajos retrasados (Osorio & Mota, 2008). En un Job shop flexible, el trabajo  $j$  tiene que realizar operaciones  $h_j$  en secuencia; cada operación ha sido pre-asignada a más de una máquina, las cuales pueden realizar las operaciones en cada una de ellas (Saidi-Mehrabad & Fattahi, 2006).

En los enfoques jerárquicos, la asignación de operaciones a las máquinas y la secuencia de operaciones en los recursos o máquinas se tratan por separado, es decir, la asignación y la secuencia se consideran de forma independiente. Los enfoques jerárquicos se basan en la idea de descomponer el problema original para reducir su complejidad. Este tipo de enfoque es natural para un Job shop flexible ya que el enrutamiento y el subproblema de programación pueden separarse (Fattahi et al., 2009). Existen una serie de técnicas para trabajar un Job shop flexible ya sea con programación, un modelo heurístico, programación con restricciones o una búsqueda local.

### **2.3 Sistema inteligente de manufactura**

En el comienzo del siglo XX, la producción masiva colaboró al crecimiento de los empleos y las herramientas para fabricar los bienes que la clase media utilizaba para mejorar su calidad de vida. Luego, con el tiempo los gustos y deseos se volvieron más refinados, lo que obliga a los sistemas de fabricación a adaptarse para lograr satisfacer la demanda. Las empresas de manufactura han intentado ir de la mano con las demandas cambiantes de los consumidores desde entonces mejorando así sus sistemas de fabricación (Molina et al., 2005).

La Figura 2.2 ilustra como las demandas del mercado y las tendencias tecnológicas han llevado a la necesidad de máquinas y sistemas de fabricación reconfigurables.



**Figura 2.2.** Evolución de los sistemas de fabricación (Molina et al., 2005).

Las empresas manufactureras han debido hacer frente a los desafíos que ha traído la creciente globalización del mercado y la economía, así como también los avances en la tecnología y la ciencia. Quienes más se ven afectadas son las medianas y pequeñas empresas, ya que deben reformar sus métodos tradicionales de fabricación mediante el uso de tecnologías avanzadas como la aplicación de tecnología de información (Cheng et al., 2001).

En respuesta a la necesidad de adaptarse a los cambios en la capacidad de producción la nueva generación de sistemas de fabricación han desarrollado sistemas de fabricación modificables, extensibles, reconfigurables y que sean capaces de tolerar eventos inesperados. Una empresa de manufactura debe planificar sus operaciones en distintos niveles y operar cada uno de dichos niveles buscando la mejor eficacia y efectividad para todo el sistema en su conjunto. Adicionalmente, en las empresas de tipo manufacturero, la planificación de su operación se convierte en el núcleo central de dicho sistema (Osorio & Mota, 2008). Los sistemas inteligentes son una solución para estos problemas donde deberían ser capaces de lograr un comportamiento sostenido en condiciones de incertidumbres.

La fabricación inteligente ha sido definida por muchos autores. Algunas de las características y problemas comúnmente aceptados asociados con la inteligencia en la fabricación son los siguientes (Molina et al., 2005):

1. Capacidad de un sistema para actuar adecuadamente en un entorno incierto.
2. Realizar tareas antropomórficas con una interacción mínima con un operador humano.
3. Capacidad de sentir y razonar sobre objetos físicos.
4. Un sistema que utiliza y combina modelos, inteligencia (matemáticas, física, informática, reglas, aprendizaje, tecnologías para la integración, etc).
5. Proporcionar una solución al problema de encontrar la secuencia correcta de decisiones y controles para un sistema.
6. La capacidad de adquirir y aplicar conocimientos.
7. Autonomía, auto mantenimiento, aprendizaje y reproducción.

#### **2.4 Sistema de fabricación flexible**

A principios de la década de 1970, la flexibilidad se convirtió en una característica importante de los sistemas de fabricación en industrias que tenían que fabricar o ensamblar productos en lotes pequeños o medianos. En lotes, los niveles de trabajo en proceso eran altos y la utilización de la máquina era baja. Los trabajos pasaban una gran proporción de tiempo esperando a que los movieran, esperando que se configurara una máquina o esperando que se completaran otros trabajos en una máquina. Se reconoció que algunos medios para enrutar automáticamente los trabajos a través del sistema de fabricación de una máquina a la siguiente y algunas formas de reducir la configuración de los trabajos en una máquina podrían mejorar el asunto. Estas ideas conducen al desarrollo del concepto básico de un Sistema de Fabricación Flexible (FMS). Los FMS combinaron la tecnología de fabricación NC, manejo automatizado de materiales y hardware y software de computadora para crear un sistema integrado para el procesamiento automático de piezas paletizadas en varias estaciones de trabajo en el sistema de fabricación. Parecía que los FMS serían ampliamente utilizados por las industrias que tenían que fabricar o ensamblar productos en lotes pequeños o medianos (Yao & Buzacott, 1985).

## 2.5 Sistema basado en agentes

La realidad en la mayor parte de las organizaciones, es que basan sus procesos en modelos que toman decisiones de forma centralizada y no admiten la posibilidad de cambios en su ejecución. Bongaerts et al. (2000), proponen la incorporación de la jerarquía en un sistema de control distribuido, donde se tiene que la arquitectura de control le otorga a los agentes locales autónomos la capacidad de conversar entre ellos para alcanzar los objetivos de forma más eficiente. El fundamento de esto se basa en la teoría de los sistemas holónicos desarrollada por Koestler (1967), donde concluye que son un conjunto de holones que son simultáneamente totalidades autónomas de sus partes inferiores y superiores (dependiendo de la perspectiva que se analice). Los holones en cada nivel de la holarquía se comportan como un elemento autónomo logrando su propio subobjetivo y, sin embargo, como elemento cooperativo que contribuye a una tarea más amplia (Cheng et al., 2004). Por lo tanto, señala que son unidades autónomas autosuficientes, independientes y que no requieren supervisión.

En el estudio realizado por Bongaerts et al. (2000) se comenta que los investigadores han estado proponiendo soluciones jerárquicas y heterárquicas para el control y la gestión de la fabricación durante varios años. El control jerárquico implica una estructura de comando-respuesta entre entidades de alto y bajo nivel. Mientras, el control heterárquico se logra al permitir que las entidades de bajo nivel dispongan de un alto nivel de autonomía y toma de decisiones, independientemente de las operaciones generales de la planta. Dada la dificultad que presentan ambos controles para mantener una estabilidad en los procesos, se presenta una tercera clase de enfoque para el control de producción llamado control holónico que funciona como un sistema anárquico. Este sistema se caracteriza por otorgar autonomía a las entidades, pero su particularidad es que las entidades se pueden integrar fácilmente con el resto de las operaciones mediante mecanismos cooperativos (Christensen, 1994).

En el último tiempo, en el campo de la inteligencia artificial se desarrolló el tema de los sistemas de agentes. Los agentes son sistemas de actuación inteligente que son capaces de realizar determinadas tareas como una entidad autónoma siendo capaz de resolver problemas computacionales. Un modelo basado en agentes es un método prometedor para simular sistemas complejos que consisten en agentes de toma de decisiones autónomos. Durante este tipo de simulación, cada agente actúa como una sola entidad siguiendo su propio conjunto de características en respuesta a las condiciones con las que se enfrenta el agente. El modelado basado

en agentes es una herramienta aplicable para el diseño de procesos que proporciona una descripción natural de un sistema se ha utilizado en varios campos de aplicación. (Taherian et al., 2018).

Para el trabajo con modelos basados en agentes se utiliza el software NetLogo (Wilensky, 1999). Este software entrega un conjunto de herramientas de modelado basado en agentes siendo uno de los más populares en la investigación computacional (Sáez, 2023). NetLogo utiliza un lenguaje de programación pseudo-funcional de tipo dinámico, acompañado de un generador de interfaz gráfica de usuario de arrastrar y soltar para controles de parámetros y visualización de resultados de modelos, lo que lo hace rápido y fácil de aprender (Gunaratne & Garibay, 2021).

En esta tesis, los agentes siguen el concepto de producto inteligente propuesto por Wong et al. (2002) y utilizado por Sáez (2023), donde se comenta que cada producto consta de las siguientes características:

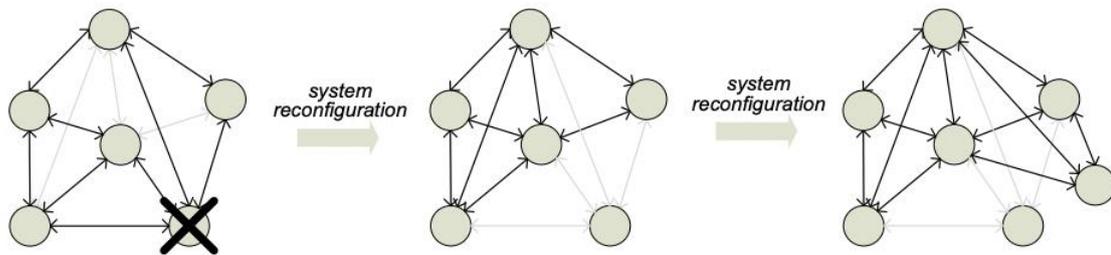
1. Tiene una identidad única que lo que lo vuelve único e irrepetible
2. Tiene la capacidad de establecer comunicación con el resto de los agentes
3. Establecen un lenguaje para señalar sus atributos.

Esto es consistente con investigaciones que indican que estas entidades están inmersas en un ambiente determinado y son capaces de realizar acciones autónomas en este ambiente con el objetivo de alcanzar las metas para las que fue diseñado. Según Baker (1998), en la comunidad de investigación de sistemas Multi-agente existen tres tipos de arquitecturas funcionales, de pizarra y heterárquica.

- 1) **Arquitectura funcional:** Cada agente representa una capacidad funcional donde por lo general solo hay un agente por función.
- 2) **Arquitectura de pizarra:** Cada agente tiene experiencia en un área determinada y los agentes comparten su experiencia publicando soluciones parciales a un problema en una pizarra central (Baker, 1998).

- 3) **Arquitectura heterárquica:** Los agentes organizados en estructuras jerárquicas se caracterizan por su alto nivel de autonomía y cooperación, lo que restringe las estrechas relaciones amo/esclavo. La información se maneja localmente y los agentes se comunican entre sí cuando es necesario (Leitao et al., 2009).

La Figura 2.3 explica la naturaleza autónoma de los sistemas multi-agentes que permite el logro de sistemas muy robustos que hacen frente a perturbaciones, fallas y restricciones estrictas, especialmente cuando se comparan con las estructuras jerárquicas y centralizadas tradicionales.



**Figura 2.3.** Sistema Multi-agentes (Leitao et al., 2009).

La tecnología basada en agentes es considerada importante para el desarrollo de sistemas distribuidos industriales. Se ha reconocido como un paradigma prometedor para los sistemas de fabricación de las futuras generaciones (Shen et al., 2006).

## 2.6 Product Driven System (PDS)

Las empresas manufactureras han debido realizar un cambio en su enfoque comercial debido a lo saturado y mercantilizado que se encuentran los mercados globales, esto ha llevado a adoptar diferentes estrategias. El cambio hacia los PDS destaca la necesidad de incorporar nuevas capacidades a los sistemas de decisiones permitiendo a las empresas de fabricación poder satisfacer la demanda comercial de manera más rápida, eficazmente y de manera ágil. La agilidad, puede ser vista como la capacidad de operar con un alto nivel de coordinación y proactividad a lo largo de la cadena de suministro, a su vez también la eficacia de reaccionar a las perturbaciones

en la fabricación considerando su complejidad. Sin embargo, la arquitectura actual de un PDS aún no está bien definido (Pannequin & Thomas, 2011).

El paradigma de PDS se crea con la hipótesis de que el producto es el eje central de este tipo de sistemas. Esto quiere decir que para cualquier empresa el objeto en común sería el producto, pero cada uno con su propio punto de vista. Según Meyer et al. (2009), este tipo de sistemas se pueden implementar con:

- I. Varios niveles de inteligencia dados al producto
- II. Diferentes formas de localizar inteligencia (en la red o en el producto)
- III. Diferentes niveles de agregación de inteligencia. A partir de estas características, se pueden distinguir varias clases de sistemas, lo que lleva a varias interpretaciones de este concepto.

El desarrollo de sistemas basados en productos (PDS) plantea numerosos problemas, que van desde los conceptuales hasta los lógicos y técnicos. Uno de los últimos problemas estudiados en la literatura que abarca un problema de PDS es la arquitectura Pollux. Es un ensamblaje de entidades decisionales que, como componentes atómicos, participan en un proceso colectivo para lograr objetivos propios y conjuntos (únicos o múltiples). Como en otras arquitecturas, una entidad decisional en Pollux es una unidad virtual que se caracteriza por un comportamiento autónomo, sociable, cooperativo, reactivo y proactivo con la capacidad de lograr los objetivos establecidos. Esta presenta diferentes modos operativos e incluye un mecanismo de conmutación que gestiona de manera eficiente el cambio de modos operativos según las necesidades de fabricación. En este sentido, un mecanismo de conmutación en Pollux se define como un instrumento externo o interno del D-HCA encargado de cambiar el modo de operación en la arquitectura del sistema de control (Jimenez et al., 2016).

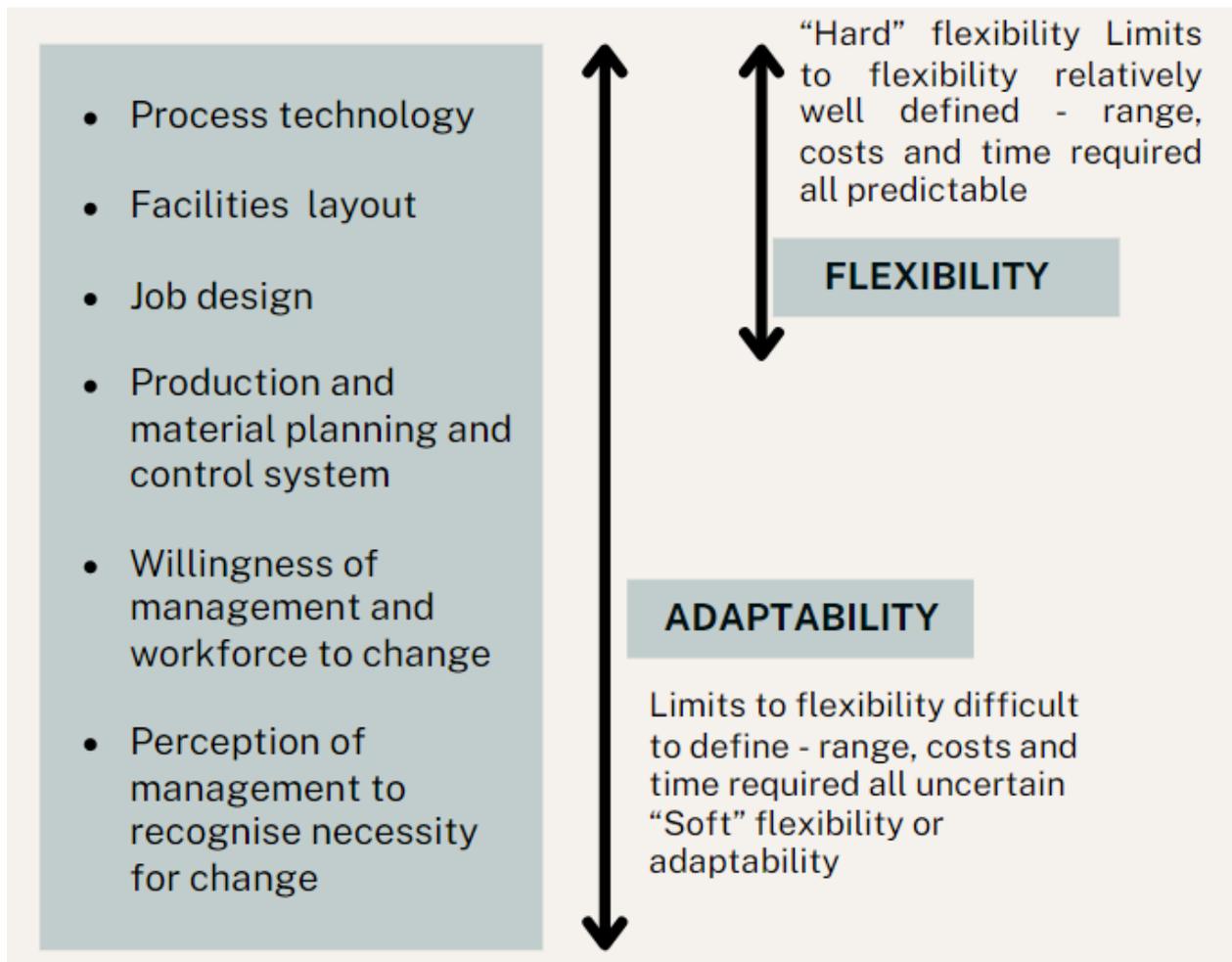
## **2.7 Flexibilidad**

Debido a los requisitos cambiantes de los consumidores, surge la fluctuación en la demanda de productos en el mercado. Como el proceso convencional de fabricación no puede resistir las demandas cambiantes, se necesita un sistema que pueda hacer frente a este cambio de manera

eficiente. La respuesta a este requisito es un sistema flexible que puede ofrecer diferentes alternativas para reaccionar satisfactoriamente en caso de cualquier cambio.

Existen variadas definiciones asociadas a la flexibilidad, pero que trabajan bajo la misma hipótesis. En Yadav et al. (2017), se propone que la flexibilidad es una condición que tienen los sistemas de manufactura para conocer hasta qué punto las perturbaciones no afectan su planificación. Benjaafar y Ramakrishnan (1996) definieron la flexibilidad en la toma de decisiones en múltiples etapas como “el grado de libertad futura para la toma de decisiones que deja una acción, una vez que se implementa”. Por lo tanto, la flexibilidad permite que quienes toman las decisiones modifiquen su posición al recibir nueva información. Un enfoque flexible para la toma de decisiones en múltiples etapas se justifica en un entorno donde se espera información futura sobre valores y costos. La investigación de la flexibilidad en la teoría de la decisión se ha llevado a cabo con respecto al valor de la flexibilidad en decisiones secuenciales bajo incertidumbre. Una decisión flexible es modificable en el futuro, mientras que una decisión no flexible es irreversible. Por lo tanto, la flexibilidad puede reducir el riesgo de un compromiso temprano con una alternativa cuyo valor es incierto. Por otro lado, De Groot (1994), considera la flexibilidad como la capacidad de un sistema, una organización o un objeto genérico para hacer frente a una variedad de cambios (inesperados o planificados) o, en otras palabras, para mantener un desempeño estable bajo circunstancias cambiantes.

Slack (1983) examinó el concepto de flexibilidad en el sistema de fabricación. El trabajo proporcionó un marco para decidir cómo los diferentes atributos de la gestión de la producción influyen en los diferentes aspectos de la flexibilidad y cómo se puede medir dentro del sistema. La Figura 2.4 muestra diferentes factores y su contribución para afectar el nivel de flexibilidad. Los factores en la parte superior, es decir, la tecnología de procesos, el diseño, el diseño del trabajo, la planificación de la producción y el sistema de control, se consideraron como flexibilidad estricta, en el contexto de que pueden medirse directamente. Los otros dos factores se consideraron flexibilidad blanda, ya que se evaluaron menos en comparación con las medidas de flexibilidad estricta. El trabajo concluyó que la medición de la flexibilidad del sistema de producción fue una tarea difícil debido a que es una medida de potencial más que de desempeño.



**Figura 2.4.** Contribución de los factores en la flexibilidad de FMS (Slack, 1983).

La flexibilidad en manufactura es un concepto complejo y multidimensional que representa la habilidad o capacidad de un sistema de producción para adaptarse con éxito a las condiciones cambiantes del entorno, a las necesidades del proceso y de los clientes sin incurrir en grandes castigos de tiempo, esfuerzo, calidad, costo y desempeño (Upton, 1994). Es decir, mejora la habilidad de una organización para reaccionar frente a la demanda del cliente sin incurrir en tiempos y costos excesivos. El desarrollo de la flexibilidad en manufactura es deseable y crítico para algunas organizaciones, por tanto, explotar las capacidades de flexibilidad para conseguir niveles tangibles de resultados de rendimiento por medio de ejecuciones efectivas es cada vez más importante (Manyoma, 2011).

A diferencia de los restantes objetivos de la estrategia de operaciones como productividad, calidad y servicio, la flexibilidad en la fabricación no es un concepto claramente definido ni existe un amplio consenso sobre las medidas a utilizar. Ello dificulta la justificación financiera de la

automatización flexible y, consiguientemente, la aprobación de las inversiones necesarias para su logro (Alvarez, 1993).

Para entender el concepto de flexibilidad, realicemos una analogía con el cuerpo humano. La flexibilidad del cuerpo humano se refiere al rango de movimiento en una articulación o serie de articulaciones. La calidad de vida aumenta al mejorar y mantener un buen rango de movimiento en las articulaciones. La pérdida de flexibilidad puede ser un factor predisponente para problemas físicos como síndromes de dolor o trastornos del equilibrio. Se tienen en cuenta muchos factores al establecer la flexibilidad de un cuerpo humano en particular: la estructura de las articulaciones, los ligamentos, los tendones, los músculos, la piel, las lesiones de los tejidos, el tejido adiposo, la temperatura corporal, la edad y el sexo, todos ellos influyen en la gama de movimientos de una persona. En la fabricación y otros sistemas creados por el hombre, como los sistemas de información, la logística, las cadenas de suministro y la arquitectura, existe un consenso general de que la flexibilidad significa adaptabilidad al cambio, predicho o imprevisto Buzacott (1982) y Zelenovic (1982). La adaptabilidad del sistema al cambio se puede proporcionar a través de la toma de decisiones adecuada en diferentes etapas de desarrollo, como el diseño, la planificación, la operación y el control. En su aplicación, los aspectos relevantes de la flexibilidad dependen en gran medida del entorno particular en el que se insertan los cambios. En un sentido amplio, la flexibilidad se ha definido como “un atributo de la tecnología de un sistema para hacer frente a la variedad de sus necesidades ambientales” (De Groote, 1994).

La flexibilidad es lo que más aproxima una empresa al ambiente competitivo global, puesto que las condiciones determinantes de sus requisitos están dadas por elementos como variabilidad de la demanda (aleatoria, estacional), ciclos de vida muy cortos de los productos y la tecnología, gran rango de productos, incremento de los consumidores (consumo masivo) y tiempos cortos de entrega (Manyoma, 2011).

El impacto competitivo de la flexibilidad es bien reconocido. Sin embargo, los directivos y académicos han señalado la falta de indicadores adecuados para medirla, así como la necesidad de comprender mejor las relaciones entre los diferentes tipos de flexibilidad (Koste et al., 2004). Los medios para el desarrollo de la competencia por flexibilidad y ejecución deben ser delineados mediante términos claramente operables y específicos. Se espera que la competencia de

flexibilidad aumente el rendimiento de una organización, en un mercado tan dinámico, pero en sí no puede garantizar un rendimiento competitivo superior.

Si bien algunas investigaciones informan sobre cómo las empresas manufactureras pueden lograr con éxito cierto tipo de flexibilidad, hay pocas ideas para comprender cómo se pueden lograr simultáneamente diferentes tipos de flexibilidad dentro de una planta manufacturera y su cadena de suministro (Salvador, 2017).

Mandelbaum (1978) plantea que la flexibilidad es la habilidad para hacer frente a las circunstancias cambiantes y las inestabilidades o perturbaciones del entorno, las cuales pueden ser internas o externas. Las internas se manifiestan como averías en los equipos, variabilidad en los tiempos de ejecución de las tareas, retrasos y colas de espera, productos defectuosos, etcétera. Las perturbaciones externas se pueden atribuir a factores tales como la incertidumbre asociada a cambios en el nivel de demanda, precios de los productos, composición del mix de artículos o actuaciones de los competidores. La idea de Gerwin (1987) resalta que la flexibilidad puede ser tanto adaptativa, reaccionando a los cambios en el entorno (el uso tradicional de la flexibilidad), como proactiva, tratando de reducir la necesidad de flexibilidad. Slack (1990) observó que los gerentes buscan limitar la necesidad de ser flexibles, y llama a esto una "estrategia de evitación de la flexibilidad". Swamidass (1988) sugiere que la fabricación flexible se puede utilizar con propósitos estratégicos, sean éstos ofensivos o defensivos. La utilización ofensiva supone emplear la flexibilidad como medio para modificar el entorno continuamente, mientras que la utilización defensiva implica acudir a ésta como medio para reaccionar ante los cambios. El fabricante que posee una flexibilidad ofensiva puede decidir cómo quiere competir y fijar además las reglas de la competencia para sus competidores.

La flexibilidad en la manufactura es un elemento importante de la estrategia de operaciones y ha sido propuesta para mitigar los efectos de las perturbaciones que ocurren habitualmente. Aunque la flexibilidad de operaciones es reconocida como importante, su valor no es fácil de demostrar (Hallgren & Olhager, 2009). Incluso no se ha podido desarrollar un enfoque unificado de medición, a pesar de los amplios estudios sobre la flexibilidad de los sistemas de fabricación (Wahab et al., 2008). De acuerdo con Buzacott y Shantikumar (1980), cualquier intento de evaluar la flexibilidad de un sistema de manufactura debe comenzar tomando en consideración la naturaleza del cambio

que el sistema tiene que enfrentar. Los cambios externos, como los tipos de productos, las mezclas y las cantidades, están dictados por el progreso tecnológico, el mercado y la política de la empresa.

Enrutamiento anterior, máquina, operación, producción, expansión, proceso, producto y volumen fueron los ocho tipos de flexibilidades discutidos por Browne et al. (1984). Más tarde, la adición de flexibilidad de manejo de materiales, programas y mercados en las flexibilidades existentes aumentó su número de ocho a once Sethi y Sethi (1990).

En las últimas décadas se han realizado tres tipos principales de clasificación respecto a la flexibilidad de fabricación: Básica, de sistema y agregadas. Flexibilidades básicas, es decir, las flexibilidades de la máquina, el manejo de materiales y la operación, están relacionadas con los componentes y las piezas del sistema de fabricación que se van a producir. Las flexibilidades del sistema y agregadas conciernen al sistema de fabricación en su conjunto (Sethi & Sethi, 1990).

Luego de una amplia revisión bibliográfica sobre el tema, se puede concluir que hay un consenso frente a lo que podrían llamarse dimensiones de flexibilidad entre los principales proponentes de estas divisiones (Suárez et al., 1996; Koste & Malhotra, 1999; Vokurka & O'Leary-Kelly, 2000; Chang et al., 2006). Agrupando la flexibilidad como; Flexibilidad en volumen, flexibilidad en producto, flexibilidad en máquina, equipos y herramientas, flexibilidad en manejo de materiales, flexibilidad de ruta (o ruteo) y flexibilidad laboral. En la Tabla 2.1 se describe cada uno.

<b>Tipo Flexibilidad</b>	<b>Definición</b>	<b>Medición</b>
En Volumen	Habilidad para cambiar el nivel de salida de un proceso de manufactura, adaptándose al cambio en las fluctuaciones de demanda agregada.	$F_v = \frac{\text{Volumen de producto}}{\text{Cap. Máx. de producción}}$
En Producto	Se puede medir como la habilidad para producir un número determinado de diferentes productos, variedad de nuevos productos que pueden introducirse en la producción normal o como el número de cambios en el diseño de los productos en un determinado periodo.	$F_p = \frac{Q \text{ partes fabricadas}}{\text{Cap. Ejecución}}$
En Máquina, equipos y herramientas	Número y la variedad de operaciones que una máquina puede ejecutar.	$F_h = \text{Tiempos req. para los cambios}$
En manejo de materiales	Habilidad del sistema de transporte interno para entregar efectivamente y en etapas apropiadas el material requerido durante el proceso de manufactura.	$F_m = \text{Tiempos} * \text{Costo transf.} * Q \text{ piezas movidas}$
De ruta	Capacidad que tiene una planta para fabricar un producto a través de varias rutas (centros de trabajo o máquinas) alternas en la misma instalación.	$F_r = \text{Min}\{\text{Recursos asoc. a ruta}\}$
Laboral	Es la capacidad de cambiar el número de trabajadores, las tareas realizadas por ellos y sus responsabilidades alternas.	$F_l = \frac{Q \text{ de tareas}}{\text{trabajador}}$

**Tabla 2.1:** Dimensiones de la flexibilidad

Koste et al. (2004), plantean que la flexibilidad está compuesta de tres elementos: el rango (número y heterogeneidad), la movilidad y la uniformidad, los cuales se describen en la Tabla 2.2.

<b>Elemento Flexibilidad</b>	<b>Definición</b>
Rango	Número de diferentes posiciones u opciones flexibles que pueden ser logradas por una dimensión o tipo de flexibilidad. Esto incluye no sólo el número de opciones, sino también la diferenciación (heterogeneidad) que entre ellas exista.
Movilidad	Representa la facilidad con la cual la organización se mueve de un estado a otro, dentro del rango demarcado. La facilidad del movimiento es evaluada por la interrelación del tiempo y del costo, y se es más flexible cuando se incurre en pequeñas penalizaciones en las transiciones que estén realizándose.
Uniformidad	Capta la similitud de las medidas del desempeño (salidas) que se establezcan dentro del rango. Esto implica que al utilizar diferentes medidas (eficiencia, productividad, calidad, tiempos de proceso, etc.) el desempeño no debe variar (en grandes cantidades) con la posición ocupada en el rango establecido.

**Tabla 2.2:** Elementos de la flexibilidad

Se espera que un sistema de fabricación flexible sea capaz de combinar la productividad de las líneas de transferencia y la flexibilidad de los Job shop para satisfacer las necesidades de mid-volume (volumen-medio) y mid-variety (variedad-media). Masuyama (1983) propuso delimitar la flexibilidad de un sistema operativo en función de la velocidad con que éste responde al cambio o perturbación y el impacto económico de la respuesta al cambio.

Miller y Roth (1987), Ferdows (1988) y Cox (1989), ponen de manifiesto que las empresas no disponen de medidas para traducir los efectos de la fabricación flexible a unidades susceptibles de ser interpretadas en términos de rendimiento del sistema de operaciones. Esto supone que, a pesar de que se otorgue una gran importancia estratégica a la flexibilidad en la fabricación, no se está en condiciones de cuantificar su impacto, situación que no se presenta en los otros objetivos de la estrategia de operaciones.

Adler (1988) establece una taxonomía que pretende recoger las relaciones que la fabricación flexible presenta tanto con los productos que la empresa pueda ofertar para hacer frente a las perturbaciones internas o externas, como con los diferentes procesos productivos que pueda desarrollar para reaccionar ante tales cambios. Señala que, desde el punto de vista de la ingeniería, es la flexibilidad en proceso la que parece más interesante, dada la habilidad creciente para diseñar sistemas de máquinas con la suficiente flexibilidad e inteligencia para hacer frente de forma robusta a un amplio espectro de contingencias. Desde los puntos de vista de la sociedad y de la gestión de empresas, los mayores retos y oportunidades parecen derivarse del desarrollo de la flexibilidad relacionada con los cambios en la dimensión del mix de productos y de los volúmenes de producción.

Sethi y Sethi (1990), tras llevar a cabo un estudio completo de la literatura sobre flexibilidad en la fabricación, encontraron que existían más de 50 definiciones diferentes de ésta. Su caracterización de los distintos tipos de flexibilidad ha sido considerada por una mayoría de autores como la mejor disponible. Bernardo y Mohamed (1992) proponen una clasificación en la que los diferentes tipos de flexibilidad se agruparían en función de su relación con las decisiones estratégicas, tácticas y operativas de la empresa.

Los primeros marcos de modelado de flexibilidad se construyeron de abajo hacia arriba, coincidiendo con una jerarquía de fabricación. El enfoque de abajo hacia arriba para la flexibilidad del modelo generalmente se compone de tres niveles de flexibilidad jerárquica: básica (relacionada con elementos de fabricación como la flexibilidad de la máquina), flexibilidad del sistema (relacionada con actividades compuestas como la flexibilidad de enrutamiento, es decir, la capacidad del sistema para procesar una parte a través de diferentes rutas/máquinas) y flexibilidad agregada como la flexibilidad de producción (ver, por ejemplo, Nof et al., 1979; Browne et al., 1984; Hancock, 1989; Harmonosky & Sadowsky, 1990; Sethi & Sethi, 1990). En este contexto se definieron varios tipos de flexibilidad y se hicieron muchos intentos para cuantificar y medir la flexibilidad (Slack, 1983; Chatterjee et al., 1984; Gustavson, 1984; Kumar, 1987; Brill & Mandelbaum, 1989; Nagarur, 1992; Kochikar & Narendran, 1992). El tipo de flexibilidad llevaba el nombre del tipo de cambio que enfrentaba el sistema de fabricación (como cambio en el volumen de producción o cambios en la combinación de productos).

Existe un amplio conjunto de medidas parciales para medir la flexibilidad, las cuales, pese a que se vean similares, plantean procedimientos claramente diferentes y de desigual aplicabilidad. El problema común de estas medidas parciales es que no ayudan a explicar cuáles son las variables empresariales que se pueden tomar como indicadores de la flexibilidad en la fabricación.

La Industria 4.0 requiere que los sistemas de fabricación sean flexibles, dinámicos y capaces de reaccionar inmediatamente a las interrupciones. Estos son aspectos críticos en la etapa de diseño, para lo cual es necesario recurrir a un modelado que integre las ventajas del modelado tradicional (Oborski, 2022). Las empresas de fabricación que tienen que competir en el mercado global abierto se centran cada vez más en la mejora continua del rendimiento de los sistemas de producción y calidad. La reducción de costos y la optimización de los procesos de fabricación son más importantes que en el pasado. El rápido desarrollo e implementación de soluciones de Industria 4.0 es el camino más corto para hacer posible una mejora radical de la productividad, la calidad y la utilización de los recursos (Margherita & Braccini, 2021). La fuerte competencia, los cambios en los requisitos de los clientes y la creciente complejidad de los sistemas de fabricación hacen que la flexibilidad de los sistemas de control sea cada vez más importante (Oborski, 2022).

La necesidad de flexibilidad proviene de la idea de que dicha flexibilidad se traducirá en una mayor competitividad en términos de calidad del producto, velocidad de entrega del producto, mayor oferta de productos y la capacidad de introducir nuevos productos más rápidamente en la producción y el mercado (Gamboa, 2014).

Al relacionar la flexibilidad con los sistemas basados en agentes, Barbosa (2012) plantea que las arquitecturas de control holónico son arquitecturas flexibles que permiten la reconfiguración en línea de los procesos. Una arquitectura de fabricación holónica debe permitir una fácil (auto)configuración, fácil extensión y modificación del sistema, y permitir una mayor flexibilidad y un mayor espacio de decisión para niveles de control más altos.

El desarrollo de problemas de decisión apropiados (y flexibles) es la clave para integrar la actividad de control dentro de los sistemas holónicos cuyos objetivos pueden diferir según el entorno en el que operen. Un principio de decisión basado en la optimización distribuida se adapta bien a los

sistemas holónicos y el objetivo: Los métodos de búsqueda podrían ayudar con la integración de algoritmos de control complejos basados en la optimización en las operaciones de fabricación, un evento relativamente poco común en la actualidad (Indriago, 2015).

Finalmente, la Tabla 2.3 es un cuadro resumen que consolida algunas de las diferentes miradas de la definición de la flexibilidad.

<b>Nombre Artículo</b>	<b>Definición de flexibilidad</b>	<b>Autor(es)</b>
Modelling of flexible manufacturing system: a review	La flexibilidad es una condición que tienen los sistemas de manufactura para conocer hasta qué punto las perturbaciones no afectan su planificación.	Yadav et al., (2018).
Measuring Of Manufacturing Flexibility	Mejora la habilidad de una organización para reaccionar frente a la demanda del cliente sin incurrir en tiempos y costos excesivos.	Manyoma P. (2011)
The management of manufacturing flexibility	Habilidad o capacidad de un sistema de producción para adaptarse con éxito a las condiciones cambiantes del entorno, a las necesidades del proceso y de los clientes sin incurrir en grandes castigos de tiempo, esfuerzo, calidad, costo y desempeño.	Upton, D. (1994)
Flexibility in decisión making: an exploration and unification	Habilidad para hacer frente a las circunstancias cambiantes y las inestabilidades o perturbaciones del entorno, las cuales pueden ser internas o externas.	Mandelbaum, M. (1978)
Idea and practice of Flexible Manufacturing Systems of Toyota	Velocidad con que responde el sistema operativo al cambio o perturbación y el impacto económico de la respuesta al cambio	Masuyama, A. (1983)
Managing Flexible Automation	Recoge las relaciones que la fabricación flexible presenta tanto con los productos que la empresa pueda ofertar para hacer frente a las perturbaciones internas o externas, como con los diferentes procesos productivos que pueda desarrollar para reaccionar ante tales cambios.	Adler, P. (1988)

The Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing Systems	La flexibilidad significa adaptabilidad al cambio, predicho o imprevisto.	Buzacott (1982) y Zelenovic (1982)
The Flexibility of Production Processes: A General Framework	Capacidad de un sistema u organización para hacer frente a una variedad de cambios (inesperados o planificados) o, en otras palabras, para mantener un desempeño estable bajo circunstancias cambiantes.	De Groot (1994)
Modeling, Measurement and Evaluation of Sequencing Flexibility in Manufacturing Systems	Grado de libertad futura para la toma de decisiones que deja una acción, una vez que se implementa	Benjaafar, S., y R. Ramakrishnan. (1996)

**Tabla 2.3:** Cuadro resumen “Definiciones de flexibilidad”.

### 3. Materiales y métodos

En este capítulo se presenta la medida de desempeño propuesta que permite evaluar la flexibilidad en un sistema Job Shop Flexible. Esta medida es elaborada tras una revisión exhaustiva de la literatura, y considera los elementos claves de un sistema, tales como: trabajos, máquinas, tiempos de procesamiento y perturbaciones que afectan al sistema. Esta medida, se utiliza para calcular la flexibilidad del problema *Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems* de Jimenez et al. (2017) que es del tipo Job shop flexible, el cual es ejecutado a través de un modelo tradicional y un modelo Product Driven System (PDS).

#### 3.1 Medida de Flexibilidad

La flexibilidad es una condición que tienen los sistemas de manufactura para conocer hasta qué punto las perturbaciones no afectan su planificación (Yadav et al., 2017), es decir, indica cuánto es el margen que se tiene en el proceso de toma de decisiones, y además permite obtener y mantener buenas soluciones en los problemas de operaciones bajo una variedad de diversas condiciones.

Manyoma (2011) plantea que, para medir la flexibilidad en manufactura, se han creado indicadores para sectores industriales específicos; desafortunadamente, estas mediciones no están diversificadas y son aplicables sólo al sector donde fueron creadas. Es necesario generar modelos analíticos sólidos que expliquen cada vez mejor las relaciones entre las diferentes dimensiones y la flexibilidad total del sistema, con el fin de comprender y emprender planes de mejoramiento de los indicadores que más afecten a la organización.

En este estudio, se busca cuantificar la flexibilidad en un sistema de Job Shop Flexible para conocer el grado de impacto que genera una perturbación en el sistema, y con ello, tomar decisiones para continuar con las operaciones.

Las dimensiones de la flexibilidad presentadas en la Tabla 2.1 que describen las distintas formas de medir la flexibilidad en distintos sectores, se basan principalmente en cuánto aumentan el tiempo de finalización y como eso afecta la planificación. Por lo que, con el objetivo de evaluar la flexibilidad de una forma más robusta, se considera también la cantidad de perturbaciones que

afectan el sistema. Para ello, se propone la ecuación (1) que agrupa los elementos principales de cada sector y que mide cuanto impacta cada perturbación que afecta el sistema.

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{Tp_i * f_i}{Cmax} \quad (1)$$

La ecuación (1) entonces, permite medir la flexibilidad de un sistema Job Shop Flexible. Esta ecuación está diseñada para obtener un valor preciso, desglosa al sistema en intervalos, donde se tiene que un intervalo corresponde a un punto en donde trabaja una máquina que se encuentra perturbada y para cada intervalo se mide la flexibilidad, así, la flexibilidad final considera atribuir su valor de acuerdo con el peso del intervalo en el sistema. La cantidad de intervalos  $n$  se obtiene mediante la ecuación (2). La Tabla 3.1 describe los parámetros asociados.

$$n = Q + 1 \quad (2)$$

Parámetro	Descripción
$i$	<i>Número del intervalo.</i>
$n$	<i>Cantidad de intervalos.</i>
$Q$	<i>Cantidad de veces que realiza una operación una máquina perturbada.</i>
$Tp_i$	<i>Makespan del intervalo <math>i</math> ya perturbado.</i>
$Cmax$	<i>Makespan del sistema.</i>
$f_i$	<i>Flexibilidad del intervalo <math>i</math>.</i>
$Tn_i$	<i>Makespan normal del intervalo <math>i</math> (sin perturbación).</i>
$TpMP_i$	<i>Tiempo total de procesamiento de las máquinas pert. en el intervalo <math>i</math>.</i>
$TpMN_i$	<i>Tiempo normal total de procesamiento de las máquinas en el intervalo <math>i</math>.</i>
$TpM_i$	<i>Variación de tiempo de proc. en el intervalo <math>i</math>.</i>

**Tabla 3.1.** Parámetros definidos (Elaboración propia)

La flexibilidad de cada intervalo  $f_i$  se obtiene mediante la ecuación (3) y corresponde a la tasa del tiempo del intervalo  $i$  y el tiempo del intervalo  $i$  luego de sufrir una perturbación, por el coeficiente  $TpM_i$ , donde  $f_i$  siempre será menor o igual a 100.

$$f_i = \frac{Tn_i}{Tp_i} * TpM_i \leq 100, \quad (3)$$

El  $TpM_i$  se presenta en la ecuación (4) e indica en qué medida varía el tiempo de procesamiento de las máquinas en un intervalo y por consiguiente refleja el cambio en la utilización de las máquinas en los intervalos señalando la distribución de las ejecuciones de operaciones.

$$TpM_i = \frac{TpMP_i}{TpMN_i} \quad (4)$$

Finalmente, la flexibilidad total del sistema  $F$  corresponde a la ponderación de las flexibilidades  $f_i$  y el grado de participación del  $Tp_i$  sobre el makespan o tiempo de finalización del sistema.

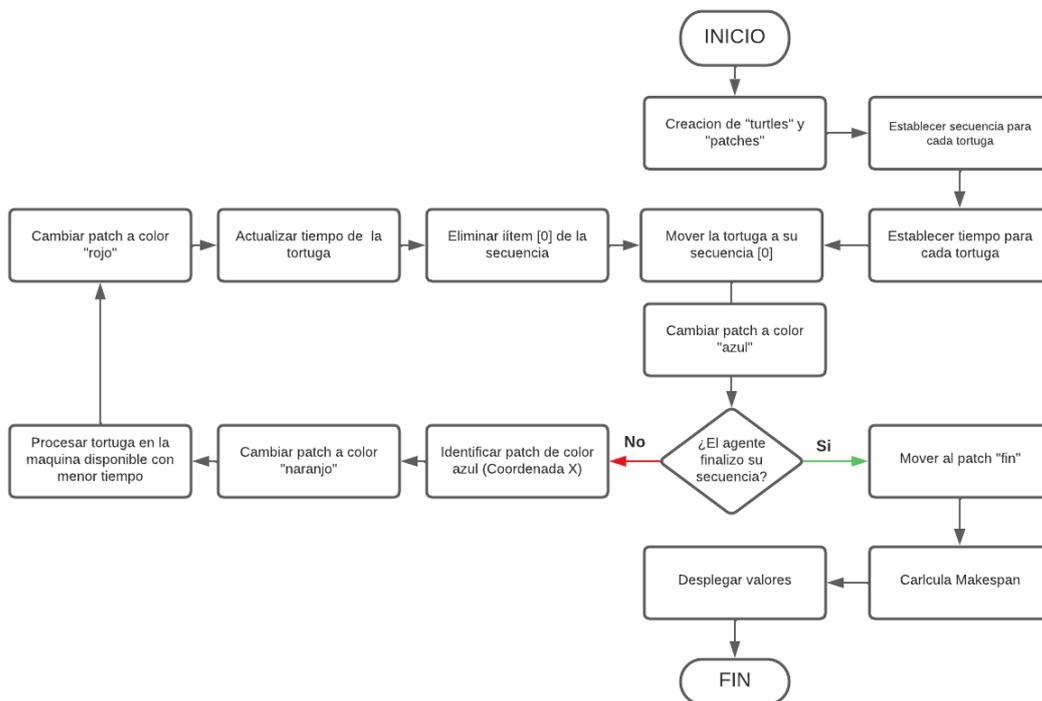
### 3.2 Modelo PDS

La flexibilidad se mide para un sistema Job Shop Flexible, con un modelo tradicional y un modelo PDS simulado a través de una plataforma llamada NetLogo. Este software permite el modelado basado en agentes y contiene los elementos apropiados que representan cada entidad decisional local, sus comportamientos y sus interacciones con otras. Esto ayuda a explorar el problema de manera externa e interna considerando los patrones que surgen de la simulación.

El modelo se compone por agentes estáticos que corresponden a máquinas y agentes dinámicos que corresponden a los productos y que se mueven por cada una de las máquinas de acuerdo con una secuencia definida. Cada agente producto cuenta con información de su proceso, tal como tiempo de proceso en cada máquina y la secuencia a recorrer. Cada producto guarda información (orden de su secuencia y el tiempo de proceso en cada máquina), tanto la información de la secuencia como el tiempo se van actualizando, a medida que este agente procesa una operación. El diagrama del sistema descrito se puede ver en la Figura 3.1, donde se tiene que; para resolver el problema se implementa un enfoque clásico de “la primera máquina disponible” y trabaja bajo los siguientes supuestos:

- La disponibilidad de una máquina se determina por el tiempo por procesar del producto que está en ella y la sumatoria de los tiempos de procesamiento de aquellos en cola.
- Cada producto cuenta con una secuencia de operaciones que pueden ser procesadas en una o dos máquinas y tiene la capacidad de elegir la máquina que se encuentre libre para realizar el proceso.
- Cuando la máquina se encuentra realizando una operación, informa al producto que no puede ser procesado hasta que finalice la operación actual.
- Cuando se finaliza una operación en la máquina es eliminada inmediatamente de la secuencia y suma el tiempo de procesamiento.
- Cuando el producto queda sin operaciones en su secuencia, se localiza en una posición que indica el “fin” e indica que el producto ha finalizado su creación.

Por lo tanto, el Makespan corresponde al tiempo de finalización del último producto que se fabrica.



**Figura 3.1.** Diagrama del sistema en software Netlogo

Un diagrama de secuencia es un diagrama usado para modelar la interacción entre objetos en un sistema según UML. Describen cómo y en qué orden, un grupo de entidades funcionan en conjunto a través del tiempo.

La interacción entre los agentes comprende una estructura fija basada en consultas. La estructura de la interacción entre los componentes del sistema se muestra en la Figura 3.2. Esta figura sigue la estructura UML de secuencia, y muestra la arquitectura conceptual del modelo PDS.

El primer objeto en el diagrama es el “observador”, el cual describe el proceso de interacción del usuario con el modelo y la recepción de resultados que corresponden al makespan del sistema. El segundo componente multi-objeto comprende todos los productos a fabricar y muestra la estructura secuencial de sus operaciones considerando las indicaciones introducidas por el observador. El tercer objeto son las máquinas del sistema, son las que ejecutan las operaciones de cada producto y almacenan la información de disponibilidad para asignaciones de productos.

Se itera el proceso respetando la secuencia de cada trabajo hasta que todos los agentes hayan finalizado su secuencia. En el elemento decisión, el agente debe responder “si” o “no” respetando la iteración correspondiente. Se ejecutará y analizará la cantidad de veces necesarias hasta encontrar un Makespan factible que minimice el tiempo de recorrido.

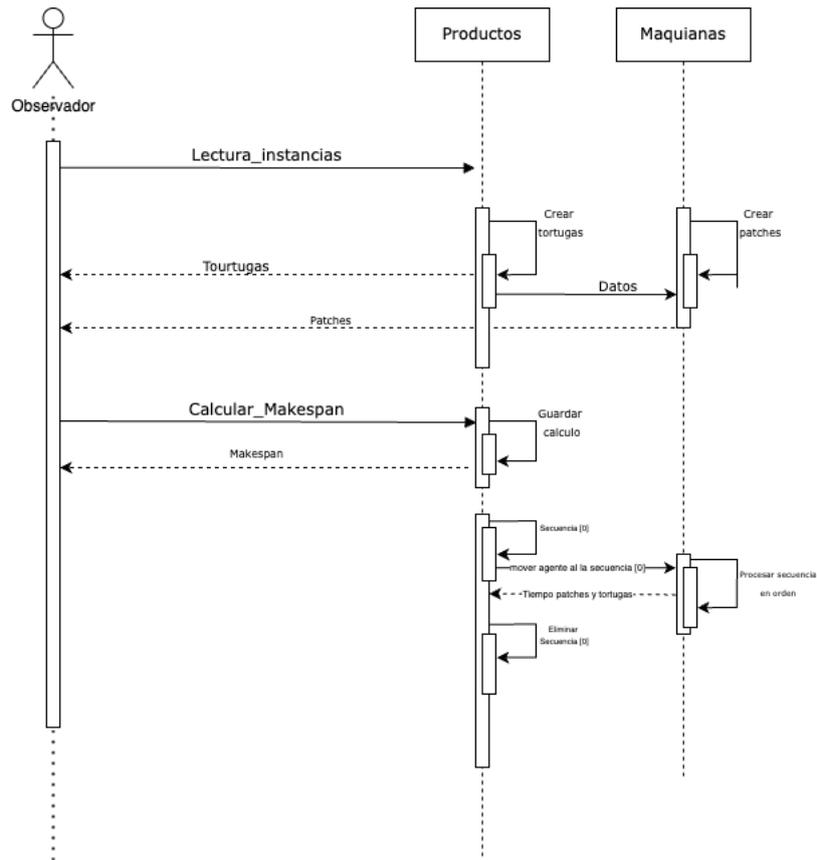


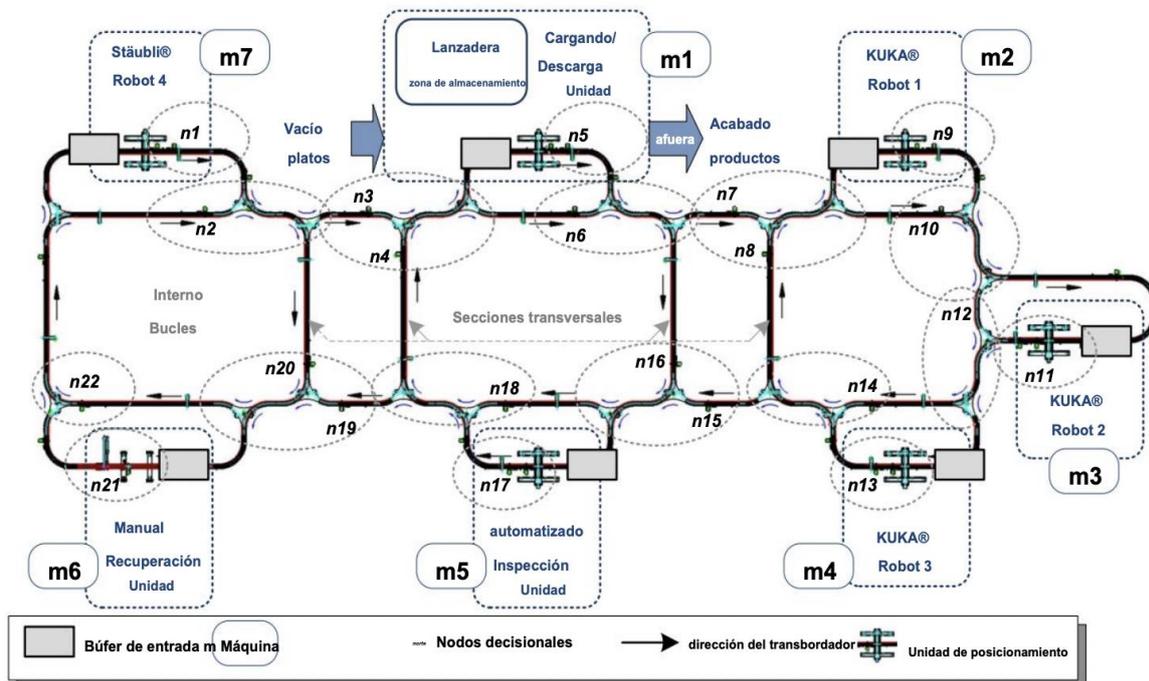
Figura 3.2. Diagrama UML de secuencia para el modelo del PDS

### 3.3 Presentación del problema

Para la validación del algoritmo propuesto, se utiliza el sistema presentado en “*Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems*” por Jimenez et al. (2017) que corresponde a un sistema de Job shop flexible AIP-PRIMECA ubicado en la Universidad de Valenciennes. El problema considera que las operaciones pueden ser procesadas por un grupo de máquinas donde el desafío es la toma de decisión respecto a que máquina procesará cada operación.

El sistema contiene 22 puertas de transferencias que se mueven según la secuencia establecida por los transbordadores. Las máquinas contemplan tres robots de montaje *Kuka* (M2, M3 y M4), una unidad de inspección automatizada compuesta por una cámara *Cognex* (M5), una unidad de inspección manual (M6), un robot de montaje redundante (M7) y un manipulador de carga y

descarga *Festo* de trabajos (M1). Para efectos de este estudio, las máquinas M6 y M7 no será utilizadas. La Figura 3.3 muestra el layout de estas máquinas.



**Figura 3.3.** Layout celdas de ensamblaje AIP-PRIMECA (Jimenez et al., 2017).

Con este sistema se pueden producir siete tipos de productos (B, E, L, T, A, I y P) y fueron creados con la finalidad de evaluar la flexibilidad, mezcla de productos, diferentes secuencias de operaciones, etc. Cada trabajo tiene una secuencia predeterminada de operaciones a procesar.

Las lanzaderas son dispositivos autopropulsados que preparan y guían los trabajos a través del sistema de transporte. Los trabajos por procesar se definen en un conjunto de datos que incluye el número de trabajos a producir y el número de lanzaderas permitidas en el taller de trabajo flexible al mismo tiempo. Las máquinas de las celdas de ensamblaje AIP-PRIMECA están unidas por un sistema transportador unidireccional y flexible. El transportador contiene un bucle principal, distintas derivaciones para llegar a las máquinas, unidades de posicionamiento frente a las máquinas y cuatro secciones transversales que componen múltiples bucles internos que permiten flexibilizar el manejo de materiales (Jimenez et al., 2017).

Para ensamblar cada producto, se debe seguir una secuencia de operaciones de manufactura. El enrutamiento de productos no se considera una operación de fabricación. El sistema AIP admite nueve operaciones de fabricación ( $O = 9$ ). Pero, dado que la *inspection* automatizada y la unidad de *manual recovery* no ofrecen ninguna flexibilidad de máquina y secuencia de máquina, estas operaciones no se tienen en cuenta para los casos ( $O = 7$ ).

Un ejemplo es el ensamblaje del producto B el cual debe pasar por 9 operaciones: Se parte por su secuencia [1] “plate loading” en el cual se carga la placa al sistema, se continua con la secuencia [2] “axis mounting” “se monta el eje y así hasta finalizar la secuencia [9] donde se descarga la placa. Cada secuencia puede ser realizada en una o dos máquinas dependiendo de la operación. La Tabla 3.2 detalla la secuencia del ensamblaje de los productos.

Oip	B_producto	E_producto	L_producto	T_producto	A_producto	I_producto	P_producto
1	plate loading	plate loading	plate loading	plate loading	plate loading	plate loading	plate loading
2	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting
3	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting	axis mounting
4	axis mounting	axis mounting	axis mounting	r_comp mounting	axis mounting	l_comp mounting	r_comp mounting
5	r_comp mounting	r_comp mounting	l_comp mounting	L_comp mounting	r_comp mounting	screw_comp mounting	L_comp mounting
6	r_comp mounting	r_comp mounting	l_comp mounting	plate unloading	L_comp mounting	plate unloading	plate unloading
7	L_comp mounting	L_comp mounting	screw_comp mounting		screw_comp mounting		
8	screw_comp mounting	plate unloading	screw_comp mounting		plate unloading		
9	plate unloading		plate unloading				

**Tabla 3.2.** Secuencia de operaciones del producto

### 3.4 Diseño Experimental

Con el fin de evaluar la flexibilidad mediante la medida propuesta, se generan 100 instancias en base a una homologación de las instancias presentadas en el estudio de Jimenez et al. (2017). Estas instancias, están establecidas para comparar el desempeño, de los dos modelos mencionados: un modelo tradicional sin inteligencia y un modelo PDS con inteligencia, al someterse a una perturbación.

Para la simulación y resolución de las instancias en ambos modelos con y sin perturbaciones, se utiliza el software Netlogo. Las instancias tienen distintos parámetros: secuencias de operaciones de producto, cantidades de producto y tiempos de procesamiento Operación-Máquina diferentes. La Tabla 3.3 es un extracto de la tabla que contiene todas las instancias (para ver tabla completa, ver Anexo 1).

Instancia	Producto	Secuencia	Cantidad	Pert.	Matriz 1	Matriz 2
1	AA	1-2-3-4-5-6	3	1	B	C
2	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	1	1	A	D
3	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	1	1	A	D
4	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	1	1	A	D
5	T	7-1-1-2-4-6-8	1	1	A	D
6	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	1	1	A	D
7	I	7-1-1-5-3-6-8	1	1	A	D
8	P	7-1-1-2-4-6-8	1	1	A	D
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
100	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	7	2	A	E

**Tabla 3.3.** Muestra de instancias a utilizar (Elaboración propia).

Donde “Instancia” es el número ID de instancia diseñada, “Producto” es el tipo de producto a fabricar, “Secuencia” es el orden de las operaciones que requiere un producto para su elaboración, “Cantidad” es el número de productos requeridos en una instancia, “Pert.” es el tipo de perturbación, “Matriz 1” corresponde a los tiempos operación-máquina sin sufrir alteraciones y “Matriz 2” es la tabla que indica los tiempos operación-máquina luego de sufrir una perturbación.

La estructura de las instancias corresponde a fabricar un producto “AA”, y luego los productos “B-E-L-T-A-I-P” del estudio Jimenez et al. (2017), aumentando de forma gradual la cantidad requerida de cada producto. Por lo tanto, las instancias que fabrican el producto “AA” son 1, 9, 25, 33, 41, 49, 57, 65, 73, 81, 89 y 97.

Las perturbaciones corresponden a problemas que afectan al desarrollo normal de las operaciones y que pueden ser de una frecuencia diaria, semanal, mensual, anual, etc. Algunos de estos problemas son: Fallas de máquinas, ausentismo de personal, pedidos urgentes, retraso de proveedores, etc. En este estudio, evaluaremos una perturbación escogida de forma aleatoria y corresponde a la falla de una máquina analizada en dos casos como tipos de perturbación diferentes:

1. **Funcionamiento parcial de una máquina:** Una máquina sufre inconvenientes que le obligan a realizar las operaciones en tiempos más extensos. Por lo tanto, el tiempo Operación-Máquina estará dado por 2 matrices, una antes de la perturbación (tiempos normales de procesamiento) y otra matriz con los tiempos actuales de procesamiento (después de la perturbación).

2. **Sin una máquina:** Una máquina sufre inconvenientes que le obligan a dejar de operar y se bloquea su uso.

Para cada instancia una de las perturbaciones afectará el sistema. Las primeras 49 instancias son impactadas por la perturbación 1 y las 51 restantes son impactadas por la perturbación 2. En ambos casos, existen matrices que representan los tiempos de procesamiento Operación-Máquina antes y después de cada perturbación. La Tabla 3.4 y Tabla 3.5 son las matrices que representan los tiempos normales para fabricar una pieza. La Tabla 3.4 representa la matriz que permite fabricar las piezas B-E-L-T-A-I-P, y la Tabla 3.5 representa la matriz que permite fabricar la pieza AA:

<b>Operación</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>
Operación 1 (O1)		20	20		
Operación 2 (O2)		20	20		
Operación 3 (O3)				20	
Operación 4 (O4)		20		20	
Operación 5 (O5)			20	20	
Operación 6 (O6)					10
Operación 7 (O7)	10				
Operación 8 (O8)	10				

**Tabla 3.4.** Matriz A de tiempos de procesamiento Operación Máquina normales

<b>Operación</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
Operación 1 (O1)	1			
Operación 2 (O2)		4	4	
Operación 3 (O3)		2	2	
Operación 4 (O4)				3
Operación 5 (O5)		2	2	
Operación 6 (O6)	1			

**Tabla 3.5.** Matriz B de tiempos de procesamiento Operación Máquina normales

Las Tabla 3.6 y Tabla 3.7 representan los tiempos de procesamiento Operación-Máquina tras sufrir una perturbación del tipo 1, es decir, la máquina 2 y 3 respectivamente aumentan su tiempo de procesamiento por algún evento inesperado.

Operación	M1	M2	M3	M4	M5
Operación 1 (O1)		30	20		
Operación 2 (O2)		40	20		
Operación 3 (O3)				20	
Operación 4 (O4)		50		20	
Operación 5 (O5)			20	20	
Operación 6 (O6)					10
Operación 7 (O7)	10				
Operación 8 (O8)	10				

**Tabla 3.6.** Matriz D de tiempos de procesamiento con la máquina 2 trabajando con bajo desempeño

Operación	M1	M2	M3	M4
Operación 1 (O1)	1			
Operación 2 (O2)		4	7	
Operación 3 (O3)		2	4	
Operación 4 (O4)				3
Operación 5 (O5)		2	6	
Operación 6 (O6)	1			

**Tabla 3.7.** Matriz C de tiempos de procesamiento con la máquina 3 trabajando con bajo desempeño

Finalmente, la Tabla 3.8 y Tabla 3.9 representan las matrices de tiempo de procesamiento Operación-Máquina tras sufrir una perturbación del tipo 2, es decir, la máquina 2 y 3 respectivamente se encuentran apagadas:

Operación	M1	M2	M3	M4	M5
Operación 1 (O1)		-	20		
Operación 2 (O2)		-	20		
Operación 3 (O3)				20	
Operación 4 (O4)		-		20	
Operación 5 (O5)			20	20	
Operación 6 (O6)					10
Operación 7 (O7)	10				
Operación 8 (O8)	10				

**Tabla 3.8.** Matriz E de tiempos de procesamiento con la máquina 2 bloqueada

Operación	M1	M2	M3	M4
Operación 1 (O1)	1			
Operación 2 (O2)		4	-	
Operación 3 (O3)		2	-	
Operación 4 (O4)				3
Operación 5 (O5)		2	-	
Operación 6 (O6)	1			

**Tabla 3.9.** Matriz F de tiempos de procesamiento con la máquina 3 bloqueada.

## 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y consta de dos secciones. En la primera sección se desarrolla la primera instancia para ambos modelos y en la segunda se encuentran los resultados de todas las instancias.

### 4.1 Resolución instancia 1

De la Tabla 3.3 se obtiene la instancia 1 y se organiza la información en la Tabla 4.1.

Producto	AA
Cantidad de piezas	3
Secuencia	1-2-3-4-5-6
Perturbación	Tipo 1
Matrices relacionadas	B-C

**Tabla 4.1.** Requerimiento para fabricación instancia 1

Para medir la flexibilidad se considera la ejecución del modelo tradicional y el modelo PDS bajo condiciones normales y al sufrir una perturbación. La perturbación tipo 1 es cuando una máquina sufre una alteración y su funcionamiento resulta en tiempos más extensos de procesamiento. La Tabla 3.5 muestra los tiempos de procesamiento normales y la Tabla 3.7 muestra los tiempos de procesamiento luego de sufrir este tipo de perturbación, donde se puede notar que la máquina 3 es la que sufre una alteración y aumenta sus tiempos de procesamiento Operación-Máquina.

#### 4.1.1 Resultado modelo tradicional

Considerando los tiempos que se presentan en la Tabla 3.5, se genera una carta Gantt como se muestra en la Figura 4.1, donde se realiza la asignación de producto-máquina bajo la regla de un modelo tradicional, obteniendo un Makespan de 21 segundos (para efectos prácticos, la carta Gantt diferencia el tipo de pieza por color).

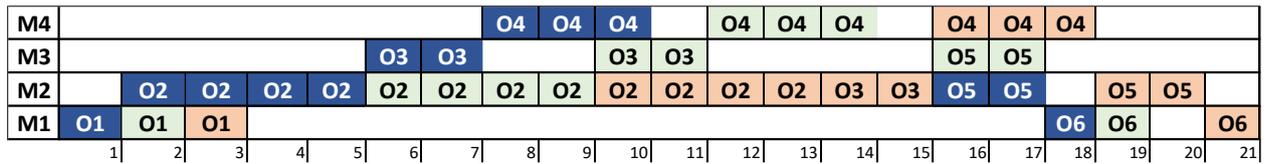


Figura 4.1. Gantt de sistema con tiempos presentados en Matriz B.

Luego, se tiene el mismo requerimiento de fabricación, pero esta vez el sistema opera con un rendimiento distinto dado que sufre una perturbación en la máquina 3 implicando que ahora procesar y terminar algunas operaciones le toma más tiempo que en condiciones normales. Los tiempos de procesamiento para este sistema se presentan en la Tabla 3.7. La Figura 4.2 corresponde a la Gantt que modela este sistema y se obtiene un Makespan de 26 segundos. Es decir, este modelo aumenta su tiempo de finalización en 5 segundos al sufrir esta perturbación.

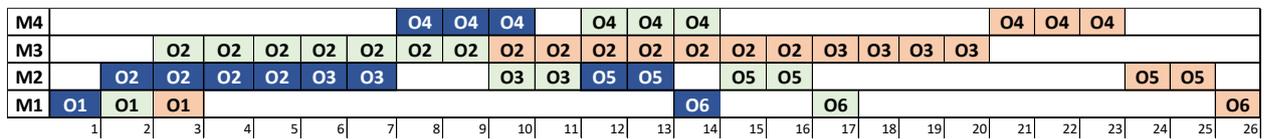


Figura 4.2. Gantt de sistema con tiempos presentados en Matriz C.

Una vez que se tiene los resultados de las asignaciones Operación-Máquina realizadas, se procede a evaluar la flexibilidad mediante la medida propuesta en este estudio.

Primero, para conocer la cantidad de intervalos que presenta el sistema, se debe identificar la cantidad de veces que trabaja la máquina que sufre la perturbación. En este caso, tal como se muestra en la Carta Gantt de la Figura 4.3 que compara las asignaciones Operación-Máquina de la ejecución normal y post perturbación, se tiene que la máquina 3 trabaja tres veces al ejecutar la operación 2 de la segunda pieza y la operación 2 y 3 de la tercera pieza. Por lo tanto, se tiene que la cantidad de intervalos está dada por:

$$n = Q + 1 = 3 + 1 = 4 \text{ intervalos}$$

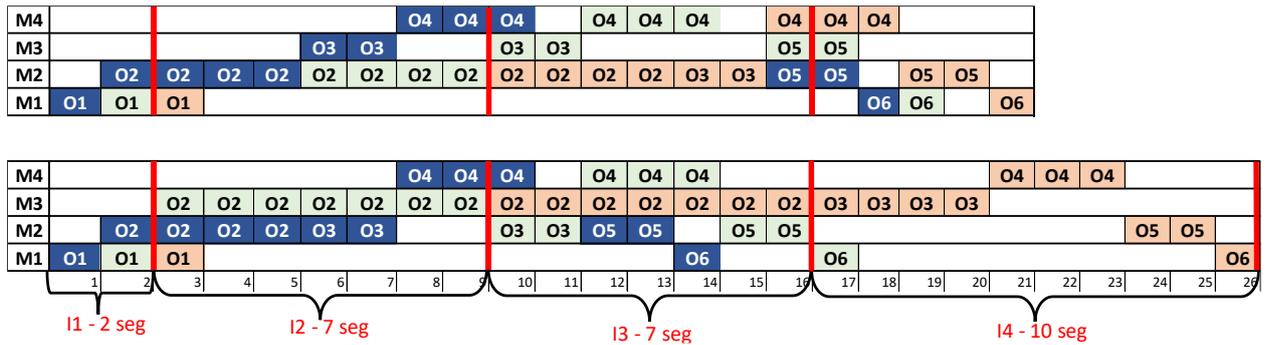


Figura 4.3. Gantt del sistema sin y con perturbación

Ahora, se evalúa la flexibilidad parcial de cada intervalo. Utilizando la ecuación 4, se obtiene el valor de variación de tiempo de procesamiento total de máquinas para cada intervalo:

$$TpM_1 = \frac{3}{3} = 1,0$$

$$TpM_2 = \frac{15}{12} = 1,3$$

$$TpM_3 = \frac{18}{15} = 1,2$$

$$TpM_4 = \frac{11}{9} = 1,2$$

Luego, utilizando la ecuación 3, se obtiene el valor de la flexibilidad parcial para cada intervalo:

$$f_1 = \frac{2}{2} \times 1 = 1,0$$

$$f_2 = \frac{7}{7} \times 1,3 = 1,3$$

$$f_3 = \frac{7}{7} \times 1,2 = 1,2$$

$$f_4 = \frac{5}{10} \times 1,2 = 0,6$$

Los resultados obtenidos, se resumen en la Tabla 4.2 y además se indica el porcentaje de participación de tiempo del intervalo  $Tp_i$  en el Makespan  $Cmax$ .

$i$	$TpMN_i$	$TpMP_i$	$TpM_i$	$Tn_i$	$Tp_i$	$Peso$	$f_i$
1	3	3	1,0	2	2	8%	<b>1,0</b>
2	12	15	1,3	7	7	27%	<b>1,3</b>
3	15	18	1,2	7	7	27%	<b>1,2</b>
4	9	11	1,2	5	10	38%	<b>0,6</b>

**Tabla 4.2.** Resultados del modelo tradicional para la instancia 1.

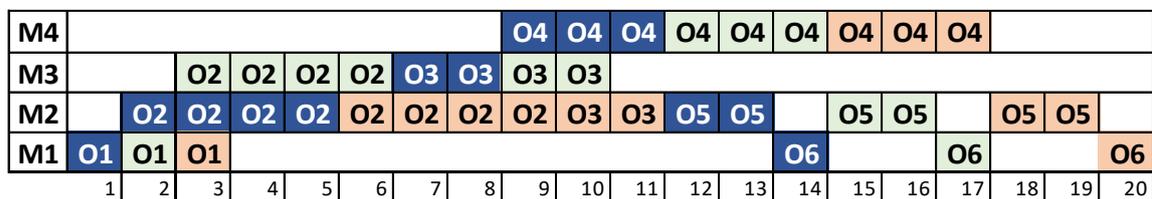
Finalmente, la flexibilidad  $F$  está dada por:

$$F = \frac{2 \times 1,0}{26} + \frac{7 \times 1,3}{26} + \frac{7 \times 1,2}{26} + \frac{10 \times 0,6}{26} = 0,98 = 98\%$$

Por lo tanto, este modelo tradicional presenta una flexibilidad de un 98% al verse afectado por una perturbación que cambia sus condiciones normales de funcionamiento.

#### 4.1.2 Resultado modelo PDS

Considerando los tiempos de la Matriz B presentados en la Tabla 3.5, se genera una carta Gantt como se muestra en la Figura 4.4, donde se realiza la asignación de producto-máquina bajo la regla del PDS que busca la asignación de tareas en función de optimizar el tiempo total de finalización y bajo la regla de la *primera máquina disponible*, obteniendo un Makespan de 20 segundos (para efectos prácticos, la carta Gantt diferencia el tipo de pieza por color).



**Figura 4.4.** Gantt de sistema con tiempos presentados en Matriz B.

Luego, para el mismo requerimiento de fabricación, pero esta vez con el sistema impactado por la perturbación, se tiene la Gantt de la Figura 4.5 la cual está construida en base a los tiempos de procesamiento presentados en la Tabla 3.7., y que resulta en un Makespan de 23 segundos. Es decir, este modelo aumenta su tiempo de finalización en 3 segundos al sufrir la perturbación.



Luego, utilizando la ecuación 3, se obtiene el valor de la flexibilidad parcial para cada intervalo:

$$f_1 = \frac{2}{2} \times 1 = 1,00$$

$$f_2 = \frac{7}{7} \times 0,9 = 0,94$$

$$f_3 = \frac{11}{14} \times 1,3 = 1,02$$

Los resultados obtenidos, se resumen en la Tabla 4.3 y además se indica el porcentaje de participación de tiempo del intervalo  $Tp_i$  en el Makespan  $Cmax$ .

$i$	$TpMN_i$	$TpMP_i$	$TpM_i$	$Tn_i$	$Tp_i$	<i>Peso</i>	$f_i$
1	3	3	1,0	2	2	9%	<b>1,00</b>
2	16	15	0,9	7	7	30%	<b>0,94</b>
3	20	26	1,3	11	14	61%	<b>1,02</b>

**Tabla 4.3.** Resultados del modelo PDS para la instancia 1.

Finalmente, la flexibilidad  $F$  está dada por:

$$F = \frac{2 \times 1,00}{23} + \frac{7 \times 0,94}{23} + \frac{14 \times 1,02}{23} = 0,99 = 99\%$$

Por lo tanto, este modelo PDS presenta una flexibilidad de un 99% al verse afectado por una perturbación que cambia sus condiciones normales de funcionamiento.

## 4.2 Resultados 100 instancias

Luego de ejecutar las 100 instancias, la Tabla 4.4 resume los tiempos de finalización (en segundos) de cada modelo antes y después de la perturbación, con *Cmax N*: Makespan sin perturbación y *Cmax P*: Makespan cuando el modelo sufre la perturbación:

Inst.	Modelo Tradicional [s]		Modelo PDS [s]		Inst.	Modelo Tradicional [s]		Modelo PDS [s]		Inst.	Modelo Tradicional [s]		Modelo PDS [s]		Inst.	Modelo Tradicional [s]		Modelo PDS [s]	
	<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>	<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>		<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>	<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>		<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>	<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>		<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>	<i>Cmax N</i>	<i>Cmax P</i>
1	21	26	20	23	26	390	480	330	390	51	150	150	150	150	76	430	640	340	490
2	170	210	170	170	27	420	530	330	440	52	170	170	170	170	77	350	560	240	360
3	150	180	150	150	28	430	540	340	440	53	110	110	110	110	78	400	570	340	450
4	170	220	170	170	29	350	380	240	260	54	170	170	170	170	79	370	500	250	320
5	110	140	110	110	30	400	490	340	390	55	110	110	110	110	80	360	510	250	350
6	170	240	170	170	31	370	390	250	280	56	110	110	110	110	81	28	40	24	32
7	110	140	110	110	32	360	390	250	290	57	13	13	13	13	82	440	730	410	630
8	110	170	110	110	33	28	36	24	28	58	200	310	190	270	83	450	860	420	800
9	13	16	13	13	34	440	550	410	480	59	220	350	200	310	84	460	790	420	710
10	200	260	190	210	35	450	610	420	500	60	220	320	210	300	85	390	570	290	410
11	220	300	200	240	36	460	620	420	510	61	150	220	130	170	86	450	700	410	620
12	220	280	210	240	37	390	430	290	330	62	200	280	190	230	87	400	570	300	410
13	150	180	130	150	38	450	570	410	490	63	160	210	130	140	88	410	510	310	380
14	200	270	190	210	39	400	440	300	330	64	170	230	140	160	89	32	52	26	40
15	160	190	130	150	40	410	460	310	330	65	18	21	16	18	90	560	870	490	750
16	170	190	140	160	41	32	44	26	32	66	290	450	270	390	91	580	950	490	780
17	18	21	16	16	42	560	660	490	550	67	320	590	270	480	92	600	930	500	760
18	290	350	270	310	43	580	700	490	590	68	300	490	280	440	93	440	660	340	490
19	320	410	270	340	44	600	730	500	610	69	220	320	190	260	94	570	830	500	640
20	300	380	280	340	45	440	490	340	390	70	300	410	280	370	95	460	650	350	480
21	220	250	190	220	46	570	660	500	560	71	230	320	190	250	96	460	630	350	470
22	300	370	280	320	47	460	510	350	400	72	220	310	200	260	97	35	60	29	42
23	230	260	190	220	48	460	540	350	420	73	24	34	22	26	98	700	1210	610	830
24	220	260	200	220	49	35	50	29	37	74	390	590	330	510	99	740	1320	620	920
25	24	30	22	25	50	170	170	170	170	75	420	680	330	520	100	770	1280	640	900

**Tabla 4.4:** Resultados del makespan de ambos modelos con y sin perturbación

Luego, la Tabla 4.5 muestra los resultados de la flexibilidad asociada a cada modelo para las 100 instancias; considerando *F. MT*: Flexibilidad Modelo Tradicional y *F. PDS*: Flexibilidad Product Driven System.

<b>Inst.</b>	<b>F. MT</b>	<b>F. PDS</b>									
<b>1</b>	98,0%	99,0%	<b>26</b>	91,1%	97,9%	<b>51</b>	100,0%	100,0%	<b>76</b>	67,2%	69,4%
<b>2</b>	99,9%	100,0%	<b>27</b>	92,3%	97,1%	<b>52</b>	100,0%	100,0%	<b>77</b>	62,5%	66,7%
<b>3</b>	99,8%	100,0%	<b>28</b>	92,7%	97,4%	<b>53</b>	100,0%	100,0%	<b>78</b>	70,2%	75,6%
<b>4</b>	99,5%	100,0%	<b>29</b>	93,3%	98,2%	<b>54</b>	100,0%	100,0%	<b>79</b>	74,0%	78,1%
<b>5</b>	99,9%	100,0%	<b>30</b>	92,6%	98,1%	<b>55</b>	100,0%	100,0%	<b>80</b>	70,6%	71,4%
<b>6</b>	99,1%	100,0%	<b>31</b>	94,8%	97,7%	<b>56</b>	100,0%	100,0%	<b>81</b>	70,0%	75,0%
<b>7</b>	99,9%	100,0%	<b>32</b>	94,2%	97,2%	<b>57</b>	100,0%	100,0%	<b>82</b>	60,2%	65,1%
<b>8</b>	98,4%	100,0%	<b>33</b>	92,1%	97,9%	<b>58</b>	64,5%	70,4%	<b>83</b>	52,3%	52,5%
<b>9</b>	99,8%	100,0%	<b>34</b>	93,1%	97,6%	<b>59</b>	62,9%	64,5%	<b>84</b>	58,2%	59,2%
<b>10</b>	97,8%	100,0%	<b>35</b>	92,3%	97,4%	<b>60</b>	68,8%	70,0%	<b>85</b>	68,4%	70,7%
<b>11</b>	97,1%	100,0%	<b>36</b>	93,2%	97,1%	<b>61</b>	68,2%	76,5%	<b>86</b>	64,3%	66,1%
<b>12</b>	97,5%	100,0%	<b>37</b>	93,0%	97,4%	<b>62</b>	71,4%	82,6%	<b>87</b>	70,2%	73,2%
<b>13</b>	98,0%	100,0%	<b>38</b>	92,6%	96,8%	<b>63</b>	76,2%	92,9%	<b>88</b>	80,4%	81,6%
<b>14</b>	97,2%	100,0%	<b>39</b>	94,4%	98,0%	<b>64</b>	73,9%	87,5%	<b>89</b>	61,5%	65,0%
<b>15</b>	97,7%	100,0%	<b>40</b>	93,9%	98,4%	<b>65</b>	85,7%	88,9%	<b>90</b>	64,4%	65,3%
<b>16</b>	97,3%	100,0%	<b>41</b>	92,1%	97,4%	<b>66</b>	64,4%	69,2%	<b>91</b>	61,1%	62,8%
<b>17</b>	97,3%	100,0%	<b>42</b>	94,2%	97,6%	<b>67</b>	54,2%	56,3%	<b>92</b>	64,5%	65,8%
<b>18</b>	96,7%	100,0%	<b>43</b>	91,8%	97,0%	<b>68</b>	61,2%	63,6%	<b>93</b>	66,7%	69,4%
<b>19</b>	95,6%	99,2%	<b>44</b>	90,7%	96,8%	<b>69</b>	68,8%	73,1%	<b>94</b>	68,7%	78,1%
<b>20</b>	95,1%	99,6%	<b>45</b>	93,0%	97,6%	<b>70</b>	73,2%	75,7%	<b>95</b>	70,8%	72,9%
<b>21</b>	96,7%	99,4%	<b>46</b>	92,2%	97,1%	<b>71</b>	71,9%	76,0%	<b>96</b>	73,0%	74,5%
<b>22</b>	96,1%	99,2%	<b>47</b>	94,0%	96,6%	<b>72</b>	71,0%	76,9%	<b>97</b>	58,3%	69,0%
<b>23</b>	95,9%	98,9%	<b>48</b>	93,2%	96,3%	<b>73</b>	70,6%	84,6%	<b>98</b>	57,9%	73,5%
<b>24</b>	95,3%	99,1%	<b>49</b>	92,0%	97,0%	<b>74</b>	62,3%	64,7%	<b>99</b>	56,1%	67,4%
<b>25</b>	92,8%	98,4%	<b>50</b>	100,0%	100,0%	<b>75</b>	61,8%	63,5%	<b>100</b>	60,2%	71,1%

**Tabla 4.5:** Flexibilidad de los modelos MT y PDS.

## 5. Discusión de resultados

En este punto se discutirán los resultados obtenidos, tras evaluar la flexibilidad de ambos modelos al verse expuestos a una perturbación. El análisis se divide en dos partes, la primera revisa el caso del sistema al verse sometido a una perturbación que baja el rendimiento de una máquina desencadenando mayores tiempos de procesamiento, y la segunda, es el caso cuando dentro del sistema, una máquina se encuentra bloqueada. Para ambos casos, se menciona el comportamiento de los modelos en diferentes demandas de producción.

### 5.1 Perturbación tipo 1

La Tabla del Anexo 1, presenta todas las instancias. Las primeras 49 instancias corresponden a esta perturbación y por lo tanto significa que dos matrices representan los tiempos de procesamiento Operación-Máquina. Una primera matriz para los tiempos normales de ejecución, y una segunda matriz que representa los mismos tiempos, pero con un aumento de tiempo en la máquina que se encuentra perturbada. A continuación, se apertura este análisis por cantidad de productos a fabricar, para entender como varía el comportamiento.

#### 5.1.1 Caso instancias con 1 producto

Para instancias con requerimiento de un producto para fabricar, se presenta el comportamiento del modelo tradicional y el modelo PDS para comprender las diferencias de cada uno:

##### a. Caso Modelo Tradicional

Como se muestra en la Figura 5.1, el gráfico superior representa la asignación del modelo tradicional en base a los parámetros definidos para la instancia 2. La gráfica inferior representa la asignación del modelo, pero al verse afectado a una perturbación que generó tiempos de procesamiento más extensos en la máquina 2. Por lo tanto, la distribución de las operaciones en las máquinas es diferente y dado que algunas operaciones ahora son trabajadas en una máquina

que tiempo un tiempo de procesamiento mayor, el tiempo de finalización del sistema aumenta desde 170 segundos a 210 segundos.

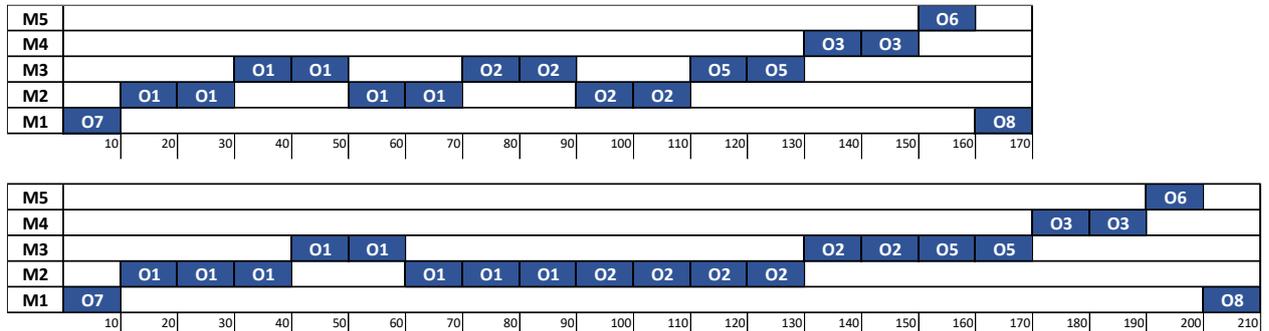


Figura 5.1: Carta Gantt instancia 2 modelo Tradicional

b. Caso Modelo PDS

Para el caso del Modelo PDS, tal como se aprecia en la Figura 5.2, vemos que la distribución de las operaciones en las máquinas es diferente luego de que el sistema sufre la perturbación. Esto gracias a la inteligencia que posee el modelo que permite asignar las operaciones buscando un mejor resultado final, y teniendo en cuenta que existen tiempos de procesamiento iguales en otras máquinas. Esto, finalmente genera que el tiempo total de finalización del sistema sea el mismo, 170 segundos.

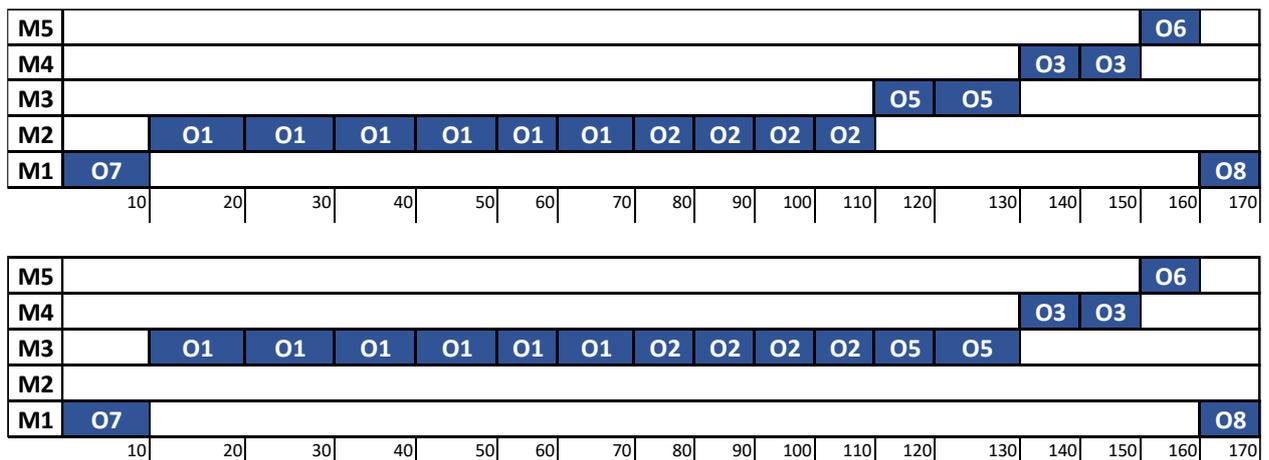


Figura 5.2: Carta Gantt instancia 2 modelo PDS

La flexibilidad en el caso del modelo tradicional es menor que la del modelo PDS. Principalmente por el aumento de tiempo de finalización del sistema. Sin embargo, es muy poca la diferencia en términos de flexibilidad (0,1% aproximadamente). Esto se debe a que es una única pieza que se

desea fabricar, no se generan colas y siempre existirá disponibilidad para procesar la siguiente operación sin sumar tiempo extra.

### 5.1.2 Caso instancias con 2 productos

Ahora, analizando el comportamiento de ambos sistemas cuando se desea fabricar dos productos, se tiene que las diferencias de tiempo son mayores. Para la instancia 10, en el caso del modelo tradicional, el tiempo de finalización total del sistema aumenta 60 segundos cuando sufre una perturbación. En el caso del modelo PDS, el tiempo de finalización del sistema ahora aumenta 20 segundos.

Nuevamente la flexibilidad del modelo tradicional es menor que la del modelo PDS, la diferencia es mayor (2,2% aproximadamente) dado que producir 2 productos obliga al sistema a asignar operaciones a una máquina con tiempos más extensos. La Figura 5.3 y Figura 5.4 que representan las gráficas de la instancia 10 de este estudio, que permiten observar el comportamiento de cada sistema, como se van distribuyendo las operaciones en máquinas en base a los tiempos requeridos pre y post perturbación.

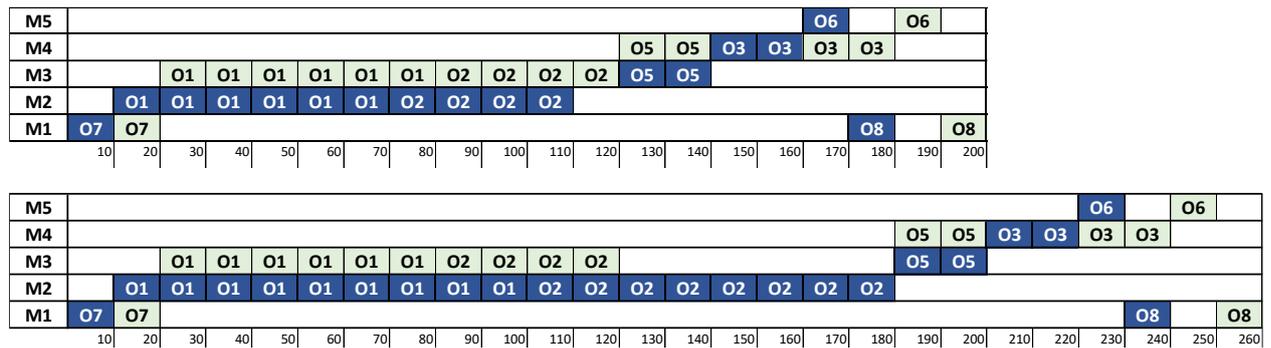


Figura 5.3: Carta Gantt instancia 10 modelo Tradicional



cuando el sistema fabrica sólo 2 piezas. Sin embargo, la flexibilidad también es de un 100%. Esto indica que este modelo continúa manteniendo una buena solución pese a sufrir la perturbación con un mayor requerimiento de fabricación.

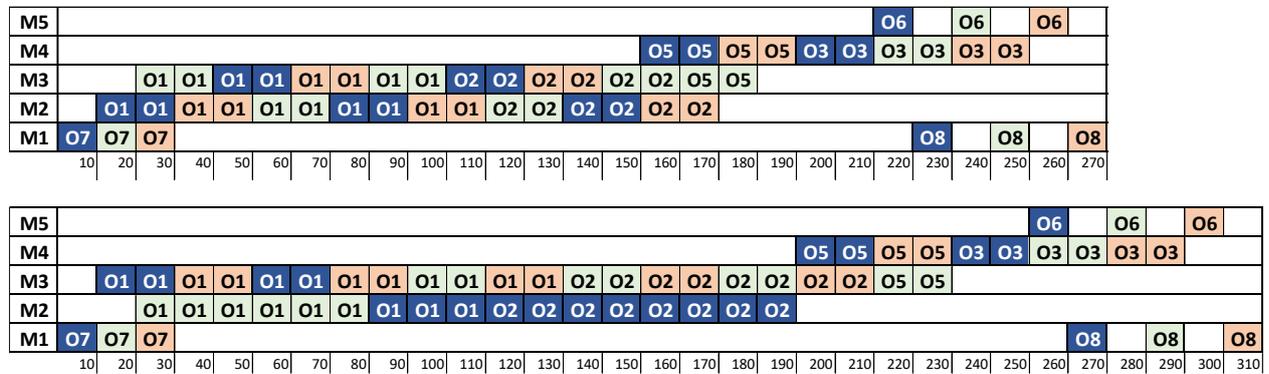


Figura 5.6: Carta Gantt instancia 18 modelo PDS

En general, cuando se da que  $TpM_i < 1$ , es porque debido a una perturbación, las operaciones se movieron y no se alcanzaron a procesar dentro del intervalo inicial (que no ha sufrido una perturbación), y se procesarán en un intervalo posterior.

### 5.2 Perturbación tipo 2

Las 51 instancias restantes corresponden a esta perturbación y por lo tanto, dos matrices también representan los tiempos de procesamiento Operación-Máquina. Una primera matriz para los tiempos normales de ejecución, y una segunda matriz que representa los mismos tiempos, pero con una máquina apagada.

Para el caso de instancias con un producto, el makespan en ambos modelos arroja el mismo resultado, pese a la perturbación. La Figura 5.7 representa el esquema de las asignaciones operación-máquina para el modelo tradicional. Como se puede ver, el tiempo de finalización no aumenta, ya que para todas las opciones de la secuencia en la que trabajaba la máquina que fue bloqueada, existía otra alternativa que requería del mismo tiempo de procesamiento.



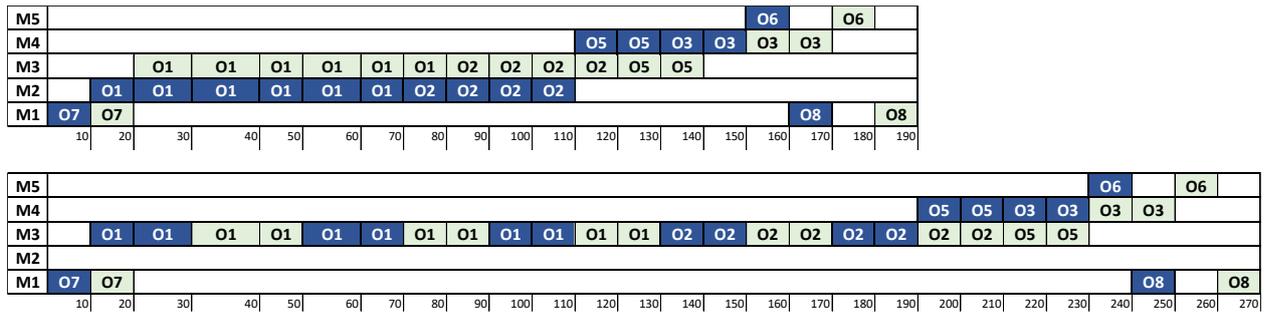


Figura 5.9: Carta Gantt instancia 58 modelo PDS

La principal diferencia que se da en un sistema con la perturbación que bloquea una máquina versus un escenario en el cual la perturbación sólo afecta que una máquina tenga un peor rendimiento (mayores tiempos de procesamiento), es que para un sistema que no presenta la inteligencia en la toma de decisiones, puede asignar una tarea en una máquina que hará el proceso más lento.

## 6. Conclusiones

En este estudio, se propuso una medida de desempeño que permite medir la flexibilidad en sistemas productivos del tipo Job Shop Flexible. Esta medida fue aplicada para evaluar un problema encontrado en la literatura, a través de dos modelos; un modelo tradicional y un modelo Product Driven System (PDS), donde se obtuvo que el modelo PDS es más flexible que el modelo tradicional dada la inteligencia que le permite a los productos adaptarse al cambio, tomando sus propias decisiones de asignación e impactando en un grado muy bajo la planificación. Por lo tanto, se comprueba la hipótesis de este estudio y se puede concluir que la medida de flexibilidad propuesta es válida y consistente con la literatura.

La medida de flexibilidad propuesta, considera en su medición; los factores de tiempo de finalización del sistema y la cantidad de veces que impacta una perturbación el sistema. Es por ello, que para el caso de una máquina que sufre una perturbación aumentando su tiempo de procesamiento, la medición evalúa y separa en distintos intervalos aquellos puntos donde interviene esta máquina.

Cada vez que una perturbación afecta al sistema perjudicando el rendimiento de una máquina, para el caso de ambos modelos; genera que la distribución de las operaciones sea diferente. En el caso del modelo tradicional cuando se requiere fabricar un producto, el tiempo de finalización aumenta dado que el modelo no discrimina al asignar una operación en una máquina que ahora requiere un mayor tiempo de procesamiento. El modelo PDS en cambio, dada la inteligencia que posee en la toma de decisiones, asigna operaciones sólo a la máquina que necesita un menor tiempo de procesamiento y podría permitir que el tiempo de finalización del sistema no aumente. En el caso de que se requiera fabricar más de un producto, en ambos modelos el tiempo de finalización aumenta dado que no se permite generar una cola si existe una máquina disponible.

Cuando una perturbación afecta al sistema directamente apagando una máquina, la medición de la flexibilidad sólo considera el tiempo de finalización dado que no interviene ninguna máquina irregular, es decir, la cantidad de intervalos siempre será 1. En cuanto a la lógica de asignación, cuando el requerimiento sea un producto, entonces ambos modelos obtendrán el mismo tiempo de finalización siempre y cuando exista una máquina alternativa que requiera el mismo tiempo de procesamiento que la máquina apagada. Para el caso de dos o más productos, los tiempos de finalización si pueden variar.

Cuando una perturbación provoca que una máquina no pueda seguir operando, en el desarrollo del sistema como tal, varía muy poco la distribución de las operaciones entre el modelo tradicional y PDS, ya que la estructura de los tiempos de procesamiento (dos máquinas pueden realizar la misma operación y requerir el mismo tiempo de procesamiento) condicionan a tener un único comportamiento cuando una máquina está bloqueada. La única diferencia se dará en aquellos trabajos que nuevamente posean 2 alternativas de elección. Por otro lado, el  $TpM_i$  se mantiene constante para todas las instancias en ambos modelos, ya que no hay aumento en tiempos de procesamiento y las matrices comparten los mismos tiempos de procesamiento para las alternativas disponibles, es decir, siempre será el mismo tiempo de procesamiento del sistema.

El aumento del tiempo de finalización de un sistema producto de un evento inesperado, a priori no permite concluir nada respecto de la flexibilidad. Lo realmente importante, es cómo un modelo puede ordenar los trabajos en el sistema para reaccionar de la mejor forma ante una perturbación.

Las instancias afectadas por la perturbación 2, en general presentan un mayor aumento en los tiempos de finalización que la perturbación 1, debido a que existe una única opción que puede realizar la operación que realizaba la máquina que ahora está bloqueada, es decir, se irán encolando las operaciones y extenderán la finalización.

El modelo tradicional presenta un crecimiento del tiempo de finalización del sistema de un 34% promedio luego de sufrir una perturbación, mientras que el modelo PDS presenta un crecimiento del tiempo de finalización del sistema de un 25% promedio tras una perturbación. Entre ambos modelos, existe una diferencia porcentual promedio en la flexibilidad de un 3,8% para las instancias diseñadas.

Se puede observar que, en la mayoría de los casos, las diferencias porcentuales de flexibilidad entre un modelo y otro son muy bajas, esto se debe principalmente a la estructura de las instancias que son homologadas del artículo de Jimenez et al. (2017), existen pocas alternativas para que se puedan tomar decisiones. Si dicha estructura fuese diferente y/o con lotes de producción de mayor volumen, la diferencia del comportamiento de los modelos podría ser mayor obteniendo diferencias significativas en la flexibilidad. Por lo tanto, para futuras investigaciones se sugiere incorporar nuevas perturbaciones, mayores volúmenes de demanda y tiempos mayores de procesamiento, evaluar la flexibilidad y encontrar nuevas casuísticas de comportamiento.

## 7. Referencias

- Adler, P. S. (1988): «Managing Flexible Automation», *California Management Review*, 30, 34-56.
- Alvarez, M. (1993): “La flexibilidad en la fabricación: bases para su definición y medida”, Departamento de Economía. Universidad Carlos III de Madrid.
- Baker, A. D. (1998). A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: Dispatching, scheduling, and pull. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(4), 297–320.
- Barbosa, J., Leitaño, P., Adam, E., Trentesaux, D. Self-organized holonic manufacturing systems combining adaptation and performance optimization, in: *Technol. Innov. Value Creat.*, Springer, 2012, pp. 163–170.
- Benjaafar, S., and R. Ramakrishnan. 1996. “Modeling, Measurement and Evaluation of Sequencing Flexibility in Manufacturing Systems.” *International Journal of Production Research* 34 (5): 1195–1220.
- Bernardo, J. J., y Mohamed, Z. (1992): «The mesarument and use of operational flexibility in the loading of Flexible Manufacturing Systems”, *European Journal of Operational Research*, 60, 144-155.
- Bongaerts, L., Monostori, L., McFarlane, D., & Kádár, B. (2000). Hierarchy in distributed shop floor control. *Computers in Industry*, 43(2), 123–137.
- Brill, P. H., and M. Mandelbaum. 1989. “On Measures of Flexibility in Manufacturing Systems.” *International Journal of Production Research* 27 (5): 747–756.
- Browne, J., D. Dubois, K. Rathmill, S. P. Seth, and K. E. Stecke. 1984. “Classification of Flexible Manufacturing Systems.” *FMS Magazine*, April, 114–117.
- Buzacott, J. A. 1982. “The Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing Systems.” *Proceedings of the 1st International Conference on FMS*. Brighton, U.K., 13.
- Buzacott, J. A., & Mandelbaum, M. (2008). Flexibility in manufacturing and services: achievements, insights and challenges. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 20(1–2), 13–58.
- Buzacott, J. A., and J. G. Shantikumar. 1980. “Models for Understanding Flexible Manufacturing Systems.” *AIIE Transactions* 12:339.
- Chang, S. C.; Yang, C. L.; Cheng, H. C. and Sheu, C. (2006). “Manufacturing flexibility and business strategy: An empirical study of small and medium sized firms”. *International Journal of Production Economics*, vol. 83, No. 1 (January), pp. 13-26.

- Chatterjee, A., M. A. Cohen, W. L. Maxwell, and L. W. Miller. 1984. "Manufacturing Flexibility: Models and Measurements." In Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on FMSs, edited by K. E. Stecke, and R. Suri, 49–64. Elsevier, Ann Arbor: MI, USA, and Amsterdam.
- Cheng, F. T., Yang, H. C., & Lin, J. Y. (2004). Development of holonic information coordination systems with failure-recovery considerations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1(1), 58–72.
- Cheng, T., Zhang, J., Hu, C., Wu, B., & Yang, S. (2001). Intelligent Machine Tools in a Distributed Network Manufacturing Mode Environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(3), 221–232.
- Christensen, J. H. (1994). Holonic Manufacturing system: Initial architecture and standards directions - Presented at First European Conference on Holonic Manufacturing Systems, Hannover, Germany, 1 December 1994. March, 1–20.
- Cox, T. (1989): «Toward the measurement of manufacturing flexibility", *Production and Inventory Management Journal*, 30/1, 68-72.
- De Groote, X. 1994. "The Flexibility of Production Processes: A General Framework." *Management Science* 40: 933–945.
- Fattahi, P., Jolai, F., & Arkat, J. (2009). Flexible job shop scheduling with overlapping in operations. *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), 3076–3087.
- Ferdows, K., et al. (1988): Flexibility The next competitive battle, Manufacturing Roundtable Research Report Series, Bastan University School of Management.
- Gamboa, F., Quintanilla, O. Cardin, P. Castagna, Product specification for flexible workflow orchestrations in service oriented holonic manufacturing systems, in: *Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing and Robotics*, Springer, 2014, pp. 177–193.
- Gerwin D. An agenda for research on the flexibility of manufacturing processes. *International Journal of Operations & Production Management* 1987;7(1):38–49.
- Gunaratne, C., & Garibay, I. (2021). NL4Py: Agent-based modeling in Python with parallelizable NetLogo workspaces. *SoftwareX*, 16, 100801.
- Gustavson, S. 1984. "Flexibility and Productivity in Complex Production Processes." *International Journal of Production Research* 22 (5): 801–808.
- Hallgren, M. and Olhager, J. (2009). "Flexibility configurations: Empirical analysis of volume and product mix flexibility". *The International Journal of Management Science*, vol. 37, No. 4 (August), pp. 746-756.

- Hancock, T. H. 1989. "Effects of Alternate Routing Under Variable Lot Size Conditions." *International Journal of Production Research* 27: 247–259.
- Harmonosky, C. H., and R. S. Sadowsky. 1990. "The System Generator Concept for FMS Research and Analysis." *International Journal of Production Research* 28: 559–571.
- Hernández, J. E., Mula, J., & Ferriols, F. J. (2008). A reference model for conceptual modelling of production planning processes. *Production Planning & Control*, 19(8), 725–734.
- Herrera, C. (2011). *Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées*. Université Henry Poincaré - Nancy . Français, <NNT:2011NAN10046>. <tel-01746192v2>.
- Indriago, C., Cardin, O., Rakoto, N., Castagna, P. y Chacón, E. (2015): "H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems". LUNAM Université', IUT de Nantes – Université de Nantes, IRCCyN UMR CNRS 6597 (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes), 2 avenue du Prof. Jean Rouxel, 44475 Carquefou, France.
- Jimenez, J. F., Bekrar, A., Zambrano-Rey, G., Trentesaux, D., & Leitão, P. (2016). Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems. *International Journal of Production Research*, 55(15), 4229–4247.
- Jorapur, V., Puranik, V. S., Deshpande, A. S., & Sharma, M. R. (2014). Comparative Study of Different Representations in Genetic Algorithms for Job Shop Scheduling Problem. *Journal of Software Engineering and Applications*, 07(07), 571–580.
- Kochikar, V. P., and T. T. Narendran. 1992. "A Framework for Assessing Manufacturing Flexibility." *International Journal of Production Research* 30: 2873–2895.
- Koestler, A. (1967). *The Ghost in the Machine*, Hutchinson & Co., London (2nd Edition, Arkana Books, London, 1989).
- Koste, L. and Malhotra, M. (1999). "A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility". *Journal of Operations Management*, vol. 18, No. 1 (December), pp. 75-93.
- Koste, L.; Malhotra, M. and Sharma, S. (2004). "Measuring dimensions of manufacturing flexibility". *Journal of Operations Management*, vol. 22, No. 2 (April), pp. 171-196.
- Kumar, V. 1987. "Entropic Measures of Flexibility." *International Journal of Production Research* 25: 957–966.
- Leitao, P., Valckenaers, P., & Adam, E. (2009). Self-Adaptation for Robustness and Cooperation in Holonic Multi-Agent Systems. *Transactions on Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems I*, 267–288.

- Lindskog, E., Vallhagen, J., & Johansson, B. (2016). Production system redesign using realistic visualisation. *International Journal of Production Research*, 55(3), 858–869.
- Ma, A., Nassehi, A., & Snider, C. (2019). Anarchic manufacturing. *International Journal of Production Research*, 57(8), 2514–2530.
- Mandelbaum, M. (1978): «Flexibility in decision making: an exploration and Unification», Tesis Doctoral, Department of Industrial Engineering, University of Toronto, Ontario.
- Manyoma P. (2011). Medición de la flexibilidad en manufactura. Universidad Autónoma de Occidente. Escuela Ingeniería Industrial y Estadística, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- Margherita E., Braccini A., Managing industry 4.0 automation for fair ethical business development: A single case study. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021; 172: 121048.
- Masuyama, A. (1983): «Idea and practice of Flexible Manufacturing Systems of Toyota», Proceedings of the 7th International Conference on Production Research, Windsor, Ontar'lo, 584-590.
- McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J. L., Wong, C. Y., & Ashton, K. (2002). The intelligent product in manufacturing control and management. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC PapersOnline) (Vol. 15, Issue 1)*. IFAC.
- Meyer, G. G., Främling, K., & Holmström, J. (2009). Intelligent Products: A survey. *Computers in Industry*, 60(3), 137–148.
- Miller, J. G., y Roth, A. V. (1987): Manufacturing strategies, Executive Summary of the 1987 North American Futures Survey, Boston, MA.
- Molina, A., Rodriguez, C. A., Ahuett, H., Cortés, J. A., Ramírez, M., Jiménez, G., & Martinez, S. (2005). Next-generation manufacturing systems: key research issues in developing and integrating reconfigurable and intelligent machines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(7), 525–536.
- Nagarur, N. N. 1992. “Some Performance Measures of Flexible Manufacturing Systems.” *International Journal of Production Research* 30 (4): 799–809.
- Nof, S. Y., M. M. Barash, and J. J. Solberg. 1979. “Operational Control of Item Flow in Versatile Manufacturing Systems.” *International Journal of Production Research* 17: 479–489.
- Oborski P. and Wysocki P., “Intelligent Visual Quality Control System Based on Convolutional Neural Networks for Holonic Shop Floor Control of Industry 4.0 Manufacturing Systems,” *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 16, no. 2, pp. 89–98, 2022.

- Osorio, J. C., & Mota, T. G. (2008). Hierarchical production planning in the flexible job shop. *Facultad de Ingeniería*, 158–171.
- Pannequin, R., & Thomas, A. (2011). Another interpretation of stigmergy for product-driven systems architecture. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6), 2587–2599.
- Pichler, F. (2000). Modeling Complex Systems by Multi-agent Holarchies. *Computer Aided Systems Theory - EUROCAST'99*, 154–168.
- Sáez, P. (2023). Proposición de una arquitectura holónica basada en productos inteligentes para el aumento de la flexibilidad en planificación de la producción y logística.
- Saidi-Mehrabad, M., & Fattahi, P. (2006). Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(5–6), 563–570.
- Salvador F, Rungtusanatham M, Forza C, Trentin A. Mix flexibility and volume flexibility in a build-to-order environment: synergies and trade-offs. *International Journal of Operations & Production Management* 2007;27(11):1173–91.
- Sethi, A., & Sethi, S. (1990). Flexibility in manufacturing: A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2(4).
- Shen, W., Hao, Q., Yoon, H. J., & Norrie, D. H. (2006). Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*, 20(4), 415–431.
- Shewchuk, J. P., & Moodie, C. L. (1998). Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 10(4), 325–349.
- Slack N. Flexibility as managers see it. In: Warner E, Wobbe W, Brodner P, editors. *New technology and manufacturing management*. " New York: Wiley; 1990.
- Slack, N. 1983. "Flexibility as a Manufacturing Objective." *International Journal of Operations Management* 3 (3): 4–13.
- Sotskov, Y., & Shakhlevich, N. (1995). NP-hardness of shop-scheduling problems with three Jobs. *Institute of Engineering Cybernetics of the Belarusian Academy of Sciences, Surganov st. 6, 220012, Minsk, Belarus*.
- Suárez, F.; Cusumano, M. and Fine, C. (1996). "An empirical study of manufacturing flexibility in printed circuit board assembly". *Operations Research*, Special issue on New Directions in Operations Management, vol. 44, No. 1 (January-February), pp. 223-240.
- Swamidass, P.M. (1988): «Manufacturing Flexibility, Monograph n.o 2, Operations Management Association.

- Taherian, M., Mousavi, S. M., & Chamani, H. (2018). An agent-based simulation with NetLogo platform to evaluate forward osmosis process (PRO Mode). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(12), 2487–2494.
- Upton, D. (1994). “The management of manufacturing flexibility”. *California Management Review*. Winter 1994, pp. 72-89.
- Vokurka, R. and O’Leary-Kelly, S. (2000). “A review of empirical research on manufacturing flexibility”. *Journal of Operations Management*, vol. 18, No. 4 (June), pp. 485-501.
- Wahab M.; Wu, D. and Lee, C. (2008). “A generic approach to measuring the machine flexibility of manufacturing systems”. *European Journal of Operational Research*, vol. 186, No. 1 (April), pp. 137-149.
- Wilensky, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling Northwestern University Evanston.
- Wong, C. Y., McFarlane, D., Zaharudin, A. A., & Agarwal, V. (2002). The intelligent product driven supply chain. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4, 393–398.
- Yadav, A., & Jayswal, S. (2017): Modelling of flexible manufacturing system: a review, *International Journal of Production Research*.
- Yao, D. D., and J. A. Buzacott. 1985. “Modeling the Performance of Flexible Manufacturing Systems.” *International Journal of Production Research* 23: 945–959.
- Zelenovic’, D. M. 1982. “Flexibility – A Condition for Effective Production Systems.” *International Journal of Production Research* 20: 319–337.

## 8. Anexos

### Anexo I. Instancias del modelo

Instancia	Producto	Secuencia	Cantidad	Pert.	Matriz 1	Matriz 2
1	AA	1-2-3-4-5-6	3	1	B	C
2	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	1	1	A	D
3	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	1	1	A	D
4	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	1	1	A	D
5	T	7-1-1-2-4-6-8	1	1	A	D
6	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	1	1	A	D
7	I	7-1-1-5-3-6-8	1	1	A	D
8	P	7-1-1-2-4-6-8	1	1	A	D
9	AA	1-2-3-4-5-6	1	1	B	C
10	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	2	1	A	D
11	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	2	1	A	D
12	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	2	1	A	D
13	T	7-1-1-2-4-6-8	2	1	A	D
14	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	2	1	A	D
15	I	7-1-1-5-3-6-8	2	1	A	D
16	P	7-1-1-2-4-6-8	2	1	A	D
17	AA	1-2-3-4-5-6	2	1	B	C
18	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	3	1	A	D
19	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	3	1	A	D
20	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	3	1	A	D
21	T	7-1-1-2-4-6-8	3	1	A	D
22	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	3	1	A	D
23	I	7-1-1-5-3-6-8	3	1	A	D
24	P	7-1-1-2-4-6-8	3	1	A	D
25	AA	1-2-3-4-5-6	4	1	B	C
26	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	4	1	A	D
27	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	4	1	A	D
28	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	4	1	A	D
29	T	7-1-1-2-4-6-8	4	1	A	D
30	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	4	1	A	D
31	I	7-1-1-5-3-6-8	4	1	A	D
32	P	7-1-1-2-4-6-8	4	1	A	D
33	AA	1-2-3-4-5-6	5	1	B	C
34	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	5	1	A	D
35	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	5	1	A	D
36	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	5	1	A	D
37	T	7-1-1-2-4-6-8	5	1	A	D
38	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	5	1	A	D
39	I	7-1-1-5-3-6-8	5	1	A	D
40	P	7-1-1-2-4-6-8	5	1	A	D

41	AA	1-2-3-4-5-6	6	1	B	C
42	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	6	1	A	D
43	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	6	1	A	D
44	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	6	1	A	D
45	T	7-1-1-2-4-6-8	6	1	A	D
46	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	6	1	A	D
47	I	7-1-1-5-3-6-8	6	1	A	D
48	P	7-1-1-2-4-6-8	6	1	A	D
49	AA	1-2-3-4-5-6	7	1	B	C
50	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	1	2	A	E
51	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	1	2	A	E
52	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	1	2	A	E
53	T	7-1-1-2-4-6-8	1	2	A	E
54	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	1	2	A	E
55	I	7-1-1-5-3-6-8	1	2	A	E
56	P	7-1-1-2-4-6-8	1	2	A	E
57	AA	1-2-3-4-5-6	1	2	B	F
58	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	2	2	A	E
59	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	2	2	A	E
60	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	2	2	A	E
61	T	7-1-1-2-4-6-8	2	2	A	E
62	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	2	2	A	E
63	I	7-1-1-5-3-6-8	2	2	A	E
64	P	7-1-1-2-4-6-8	2	2	A	E
65	AA	1-2-3-4-5-6	2	2	B	F
66	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	3	2	A	E
67	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	3	2	A	E
68	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	3	2	A	E
69	T	7-1-1-2-4-6-8	3	2	A	E
70	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	3	2	A	E
71	I	7-1-1-5-3-6-8	3	2	A	E
72	P	7-1-1-2-4-6-8	3	2	A	E
73	AA	1-2-3-4-5-6	3	2	B	F
74	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	4	2	A	E
75	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	4	2	A	E
76	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	4	2	A	E
77	T	7-1-1-2-4-6-8	4	2	A	E
78	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	4	2	A	E
79	I	7-1-1-5-3-6-8	4	2	A	E
80	P	7-1-1-2-4-6-8	4	2	A	E
81	AA	1-2-3-4-5-6	4	2	B	F
82	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	5	2	A	E
83	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	5	2	A	E
84	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	5	2	A	E
85	T	7-1-1-2-4-6-8	5	2	A	E
86	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	5	2	A	E
87	I	7-1-1-5-3-6-8	5	2	A	E
88	P	7-1-1-2-4-6-8	5	2	A	E
89	AA	1-2-3-4-5-6	5	2	B	F

90	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	6	2	A	E
91	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	6	2	A	E
92	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	6	2	A	E
93	T	7-1-1-2-4-6-8	6	2	A	E
94	A	7-1-1-1-2-4-5-3-6-8	6	2	A	E
95	I	7-1-1-5-3-6-8	6	2	A	E
96	P	7-1-1-2-4-6-8	6	2	A	E
97	AA	1-2-3-4-5-6	6	2	B	F
98	B	7-1-1-1-2-2-5-3-6-8	7	2	A	E
99	E	7-1-1-1-2-2-4-6-8	7	2	A	E
100	L	7-1-1-1-5-5-3-3-6-8	7	2	A	E

---

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO**

<b>Departamento</b>	: Departamento de Ingeniería Industrial
<b>Carrera</b>	: Magíster en Ingeniería Civil Industrial
<b>Nombre del memorista</b>	: Benjamín Osvaldo León Bustamante
<b>Título de la memoria</b>	: Propuesta de medida de desempeño que permite medir la flexibilidad en sistemas productivos de tipo Job Shop Flexible a través de una plataforma Multi-Agente.
<b>Fecha de la presentación oral</b>	:
<b>Profesor Guía</b>	: Dr. Carlos Enrique Herrera López
<b>Profesor Revisor</b>	:
<b>Concepto</b>	:
<b>Calificación</b>	:

Resumen
<p>La flexibilidad en los sistemas de fabricación es una de las propiedades más buscadas en métodos modernos y una de las técnicas centrales más importantes para los sistemas de fabricación inteligentes. Pero, aun así, la flexibilidad es poco manejada en cuanto a la teoría y menos utilizada en la práctica.</p> <p>En este estudio, se presenta una medida de desempeño diseñada para cuantificar la flexibilidad en sistemas productivos de tipo Job Shop Flexible. Esta medida se desarrolla a partir de diversas perspectivas de flexibilidad mencionadas en la literatura y se emplea para evaluar un problema encontrado en la literatura, a través de dos modelos; un modelo tradicional y un modelo Product Driven System (PDS). La medida de desempeño propuesta fue aplicada para evaluar la flexibilidad de ambos modelos frente a dos tipos de perturbación distintas. El objetivo era verificar la aplicabilidad de esta medida en diversos escenarios.</p> <p>Los resultados obtenidos indican que el modelo PDS supera al modelo tradicional en términos de flexibilidad. Esto se traduce en un menor impacto de las perturbaciones debido a la capacidad de los productos para tomar decisiones autónomas y optimizar sus acciones en función de las nuevas condiciones. Dada la consistencia de estos resultados con la literatura y la realidad de los modelos inteligentes, se respalda la validez y aplicabilidad de la medida de flexibilidad para evaluar la respuesta de los sistemas ante eventos inesperados, tanto internos como externos.</p>