

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL  
SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

Autor: María Cielo Velandrino Gómez

Tutor: Marcos Calle Suárez

Departamento de Organización Industrial y  
Gestión de Empresas I  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Aeroespacial

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL  
SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST**

Autor:

María Cielo Velandrino Gómez

Tutor:

Marcos Calle Suárez

Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado:  
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

Autor: María Cielo Velandrino Gómez

Tutor: Marcos Calle Suárez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

*A mis padres, por confiar siempre en mí y no dejar que nunca me rinda.*





# Resumen

---

Actualmente, las empresas se encuentran en una continua competición para conseguir ser las mejores en su sector. Para ello, deben cumplir las exigencias que hoy día plantea el mercado, poder ofrecer al cliente un mayor grado de personalización del producto y a su vez, poder entregar dicho producto lo antes posible, todo ello sin incrementar costes.

Los sistemas de producción han ido evolucionando a lo largo de los años, pues se han tenido que ir adaptando a las necesidades del momento, debido al constante desarrollo de las nuevas tecnologías y las posibilidades que estas ofrecen. De esta manera, la gestión de la producción se encuentra en la búsqueda de nuevos sistemas que permitan desarrollar una producción acorde a los objetivos marcados.



# Índice

Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	ix
Índice .....	xi
Índice de Tablas .....	xiii
Índice de Ilustraciones .....	xiv
<b>1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Justificación</i> .....	1
1.2 <i>Objeto del trabajo</i> .....	2
1.2.1 <i>Objetivos</i> .....	2
1.3 <i>Sumario</i> .....	2
<b>2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
2.1 <i>Introducción</i> .....	11
2.2 <i>Sistemas básicos</i> .....	12
2.2.1 <i>Engineering To Order (ETO)</i> .....	12
2.2.2 <i>Make to Order (MTO)</i> .....	14
2.2.3 <i>Assemble to Order (ATO)</i> .....	15
2.2.4 <i>Make To Stock (MTS)</i> .....	16
2.3 <i>Sistemas avanzados</i> .....	18
2.3.1 <i>Make to Forecast (MTF)</i> .....	18
<b>3 SIMULACIÓN.....</b>	<b>21</b>
3.1 <i>Simulación</i> .....	21
3.1.1 <i>Introducción - Toma de decisiones</i> .....	21
3.1.2 <i>Concepto de simulación</i> .....	22
3.2 <i>El entorno ARENA</i> .....	23
3.2.1 <i>Reseña Histórica</i> .....	23
3.2.2 <i>Utilidades del uso del software ARENA</i> .....	23
3.2.3 <i>Ventajas del simulador ARENA</i> .....	24
3.2.4 <i>Desventajas del simulador ARENA</i> .....	24
3.3 <i>Conceptos Básicos</i> .....	25
3.3.1 <i>Fundamentos de la simulación</i> .....	25
3.4 <i>Descripción de los módulos lógicos de ARENA</i> .....	28
3.4.1 <i>Create</i> .....	29
3.4.2 <i>Dispose</i> .....	30
3.4.3 <i>Assign</i> .....	31
3.4.4 <i>Process</i> .....	32
3.4.5 <i>Decide</i> .....	33
3.4.6 <i>Hold</i> .....	35
<b>4 MODELO DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>37</b>

4.1	<i>Introducción</i> .....	37
4.2	<i>Regla de simulación y condiciones iniciales</i> .....	39
4.3	<i>Atributos y Variables del modelo</i> .....	40
4.3.1	Atributos.....	40
4.3.2	Variables.....	43
4.4	<i>Modelo del proyecto en ARENA</i> .....	44
4.4.1	Flujo de fabricación.....	45
4.4.2	Flujo de llegada de clientes.....	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>57</b>
5.1	<i>Introducción</i> .....	57
5.2	<i>Modelo Meredith y Akinc (2007)</i> .....	57
5.2.1	Modelo con 10 Configuraciones.....	57
5.2.2	Modelo con 11 Configuraciones.....	59
5.2.3	Modelo con 12 Configuraciones.....	61
5.2.4	Modelo con 13 Configuraciones.....	63
5.2.5	Modelo con 14 Configuraciones.....	65
5.2.6	Discusión de los resultados.....	67
5.3	<i>Estudio del comportamiento de <math>\lambda</math></i> .....	69
5.3.1	Introducción .....	69
5.3.2	Estudio para $\lambda = 1.13$ .....	69
5.3.3	Estudio para $\lambda = 1.16$ .....	69
5.3.4	Estudio para $\lambda = 1.175$ .....	70
5.3.5	Estudio para $\lambda = 1.2$ .....	70
5.3.6	Estudio para $\lambda = 1.25$ .....	71
5.3.7	Estudio para $\lambda = 1.3$ .....	71
5.3.8	Discusión de los resultados.....	72
5.4	<i>Comparaciones entre Modelos</i> .....	73
5.4.1	Introducción .....	73
5.4.2	Modelo con 11 Configuraciones.....	73
5.4.3	Modelo con 12 Configuraciones.....	74
5.4.4	Modelo con 13 Configuraciones.....	75
5.4.5	Discusión de los resultados.....	76
5.5	<i>Conclusiones y futuras líneas de trabajo</i> .....	77
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>79</b>

# Índice de Tablas

---

Tabla 1: Posibles configuraciones	41
Tabla 2: Lista de atributos Fuente: ARENA	42
Tabla 3: Atributos del Modelo con 10 Configuraciones	57
Tabla 4: Resultados Modelo con 10 Configuraciones	58
Tabla 5: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 10 Configuraciones	58
Tabla 6: Atributos del Modelo con 11 Configuraciones	59
Tabla 7: Resultados Modelo con 11 Configuraciones	60
Tabla 8: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 11 Configuraciones	60
Tabla 9: Atributos del Modelo con 12 Configuraciones	61
Tabla 10: Resultados Modelo con 12 Configuraciones	62
Tabla 11: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 12 Configuraciones	62
Tabla 12: Atributos del Modelo con 13 Configuraciones	63
Tabla 13: Resultados Modelo con 13 Configuraciones	64
Tabla 14: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 13 Configuraciones	64
Tabla 15: Atributos del Modelo con 14 Configuraciones	65
Tabla 16: Resultados Modelo con 14 Configuraciones	66
Tabla 17: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 14 Configuraciones	66
Tabla 18: Resultados para $\lambda = 1.13$	69
Tabla 19: Resultados para $\lambda = 1.16$	69
Tabla 20: Resultados para $\lambda = 1.175$	70
Tabla 21: Resultados para $\lambda = 1.2$	70
Tabla 22: Resultados para $\lambda = 1.25$	71
Tabla 23: Resultados para $\lambda = 1.3$	71
Tabla 24: Comportamiento $\lambda$	72
Tabla 25: Atributo del Componente 10	73
Tabla 26: Resultados con distintas probabilidades Componente 10	73
Tabla 27: Tabla 28: Atributo del Componente 9	74
Tabla 29: Resultados con distintas probabilidades Componente 9	74
Tabla 30: Tabla 31: Atributo Componente 8	75
Tabla 32: Resultados con distintas probabilidades Componente 8	75

# Índice de Ilustraciones

---

Ilustración 1: Motor aeronáutico Rolls-Royce Fuente: mpl	12
Ilustración 2: Misión a Júpiter con la sonda espacial Voyager Fuente: NASA	13
Ilustración 3: Empresa de fabricación de material compuestos Fuente: triumphgroup	14
Ilustración 4: Empresa especializada en fabricación de Drones. Fuente:basedrone	15
Ilustración 5: Industrias Lotu fabricación de tornillos y remaches. Fuente: Lotu Industrias	17
Ilustración 6: Localización Make to Forecast frente a otras estrategias Fuente: Sciencedirect	19
Ilustración 7: Montaje de la cola para una aeronave. Fuente: Taringa	20
Ilustración 8: Toma de decisiones mediante simulación Fuente: 4DLABS, Simulación	21
Ilustración 9: Simulación de una planta aeronáutica Fuente: Youtube	22
Ilustración 10: ARENA software Fuente: visiongss	23
Ilustración 11: Simulación de una fábrica Fuente: Youtube	23
Ilustración 12: Simulación de un aeropuerto con gráficos Fuente: Youtube	24
Ilustración 13: Estado de una variable Fuente: ucsimulacionsistemas-wordpress	27
Ilustración 14: Eventos durante la fase de despegue y aterrizaje Fuente: slideplayer	27
Ilustración 15: Concepto de sistema Fuente: vri.unicauca.edu	28
Ilustración 16: Bloque Create Fuente: ARENA	29
Ilustración 17: Bloque Dispose Fuente: ARENA	30
Ilustración 18: Bloque Assign Fuente: ARENA	31
Ilustración 19: Bloque Process Fuente:ARENA	32
Ilustración 20: Bloque Decide, dos caminos por probabilidad Fuente: ARENA	33
Ilustración 21: Bloque Decide, dos caminos por condición Fuente: ARENA	34
Ilustración 22: Bloque Decide, dos caminos por condición con una expresión Fuente: ARENA	34
Ilustración 23: Bloque Hold - Type Wait for Signal Fuente:ARENA	35
Ilustración 24: Bloque Hold – Type Scan for Condition Fuente: ARENA	35
Ilustración 25: Bloque Hold – Type Infinite Hold Fuente: ARENA	36
Ilustración 26: Proceso de producción simulado Fuente: artículo Meredith y Akinc (2007)	37
Ilustración 27: Estaciones de trabajo de una aeronave Fuente: Zonamilitar.com	38
Ilustración 28: Flujo de trabajo	40
Ilustración 29: Identificadores de las entidades en las estaciones de trabajo Fuente: ARENA	43
Ilustración 30: Vista general del proyecto en ARENA Fuente: ARENA	44
Ilustración 31: Creación de entidades para la fabricación Fuente: ARENA	45
Ilustración 32: Simulación de estaciones de trabajo Fuente: ARENA	45
Ilustración 33: Flujos de trabajo MTS/MTO Fuente: ARENA	46

Ilustración 34: Flujo de trabajo MTS Fuente: ARENA	47
Ilustración 35: Componentes para las diez primeras semanas Fuente: ARENA	47
Ilustración 36: Estaciones de trabajo para las diez primeras semanas Fuente: ARENA	48
Ilustración 37: Estación de trabajo para la semana trece Fuente: ARENA	49
Ilustración 38: Identificador de la entidad de entrada Fuente: ARENA	49
Ilustración 39: Módulo Decide para la semana trece Fuente: ARENA	50
Ilustración 40: Entidad no asignada Fuente: ARENA	50
Ilustración 41: Variable contador de la semana trece Fuente: ARENA	51
Ilustración 42: Procesado de entidad Fuente: ARENA	51
Ilustración 43: Reducción de los bloques para el flujo MTO Fuente: ARENA	52
Ilustración 44: Posibles salidas del producto Fuente: ARENA	52
Ilustración 45: Llegada de clientes Fuente: ARENA	53
Ilustración 46: Retención de clientes Fuente: ARENA	53
Ilustración 47: Requerimientos de los clientes Fuente: ARENA	54
Ilustración 48: Búsqueda del producto Fuente: ARENA	54
Ilustración 49: Asignación del cliente y producto Fuente: ARENA	55
Ilustración 50: Salida de clientes Fuente: ARENA	55
Ilustración 51: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 10 Configuraciones	59
Ilustración 52: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 11 Configuraciones	61
Ilustración 53: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 12 Configuraciones	63
Ilustración 54: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 13 Configuraciones	65
Ilustración 55: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 14 Configuraciones	67
Ilustración 56: Clientes Satisfechos para las distintas Configuraciones	67
Ilustración 57: Productos Huérfanos para las distintas Configuraciones	68
Ilustración 58: Tiempos de Espera de los Clientes para las distintas Configuraciones	68
Ilustración 59: Comportamiento $\lambda$ frente al Grado de Satisfacción	72
Ilustración 60: Comportamiento $\lambda$ frente al número de Productos Huérfanos	73
Ilustración 61: Resultados con distintas probabilidades Componente 10	74
Ilustración 62: Resultados con distintas probabilidades Componente 9	74
Ilustración 63: Resultados con distintas probabilidades Componente 8	75
Ilustración 64: Clientes Satisfechos para Configuraciones con distintas Probabilidades	76
Ilustración 65: Productos Huérfanos para Configuraciones con distintas Probabilidades	76
Ilustración 66: Aplicación del sistema MTF a la aeronáutica Fuente: elconfidencialdigital	77





# 1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO

---

## 1.1 Justificación

Hoy día, en el mercado actual existe una lucha cada vez más intensa por ser capaz de satisfacer la demanda lo más rápido posible y ofrecer al cliente un producto con una mayor posibilidad de customización. Las empresas se encuentran en una carrera constante por ser las primeras en desarrollar innovadoras respuestas a este problema y alcanzar así grandes objetivos.

La gestión de la producción a lo largo de los años ha sido enfocada a dos tipos principales de ambientes: la fabricación bajo inventarios, Make to Stock (MTS) y la fabricación bajo pedido, Make to Order (MTO). Estos dos sistemas, a la hora de afrontar la dinámica de la producción de una compañía presentan características muy distintas. Por un lado, el sistema MTS está basado en pronósticos de demanda y se utiliza principalmente para desarrollar productos genéricos y de alta rotación. Por otro lado, el sistema MTO produce acorde a la orden del cliente, lo cual permite una mayor flexibilidad de las características del producto, aunque con un tiempo de entrega mayor. El problema real que aparece en la industria, es que a pesar de ser estos sistemas muy distintos, aparecen en algunos ambientes de forma conjunta.

Esta última cuestión ha ido tomando una mayor relevancia con las exigencias que actualmente plantea el mercado, como se ha comentado anteriormente, un aumento de la variación del producto y un tiempo de entrega menor, sin incrementar costes. Así pues, se ha observado una evolución en las políticas de producción de las empresas hacia un sistema de producción híbrido MTS/MTO.

Han sido múltiples las propuestas híbridas ante este problema, en el cual se combinan los ambientes de fabricación para inventario (MTS) y bajo pedido (MTO). Esto supone un impacto en el nivel de servicio, pues se pretende atender objetivos diferentes e incluso a veces opuestos, a partir de ciertos recursos limitados. Pues bien, una de estas propuestas es el modelo desarrollado por Meredith y Akinc (2007), denominado Make to Forecast (MTF), en el cual el sistema empieza produciendo productos generales según un pronóstico (MTS) y después finaliza la producción según las exigencias de los clientes que van llegando (MTO).

El presente proyecto está basado en la publicación realizada por Meredith y Akinc (2007), en la cual se aporta este nuevo enfoque a la producción híbrida y se analiza un modelo de empresa concreto en distintos escenarios y con diferentes reglas de secuenciación, consiguiendo unos resultados optimistas.

Para continuar la investigación del sistema productivo MTF, en este trabajo se estudia el modelo específico de empresa propuesto en dicho artículo, para poder confirmar los resultados conseguidos y se evalúa si este sistema productivo se podría extrapolar para una empresa con condiciones similares pero con algunas diferencias. El avance de la tecnología ha conseguido que mediante la simulación sea posible el estudio de un sistema productivo sin necesidad de llevarlo a la práctica, evitando así los posibles costes que podían acarrear dicho análisis. En este proyecto se ha utilizado la simulación como medio para la evaluación de un sistema productivo.

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

## 1.2 Objeto del trabajo

Este proyecto tiene como objeto el estudio y análisis del sistema productivo MTF, con la finalidad de seguir avanzando en el estudio de este sistema híbrido y poder aportar nuevas conclusiones.

Para ello se creará un modelo con las exigencias que Meredith y Akinc (2007) proponen en su artículo y se simulará bajo una determinada regla de secuenciación, para poder así estudiar los resultados extraídos del modelo desarrollado mediante simulación. Una vez confirmado, se pasará a estudiar el MTF en condiciones similares pero con pequeños cambios, para poder así determinar si el sistema productivo propuesto por Meredith y Akinc (2007) es sólo válido para esa empresa concreta o se puede llevar a otros ámbitos similares.

### 1.2.1 Objetivos

El primer objetivo para conseguir los resultados buscados, será desarrollar un modelo que cumpla las exigencias descritas en el artículo de Meredith y Akinc (2007). Posteriormente, se analizarán los resultados de este modelo sometido al sistema productivo MTF propuesto y con una de las reglas de secuenciación establecidas en dicha publicación.

Para poder realizar este estudio se hará uso del software ARENA, el cual permite la simulación de sistemas productivos, con resultados muy cercanos a la realidad y con todo el ahorro económico que ello supone, pues se evita el posible fracaso a la hora de implantar un nuevo sistema.

En segundo lugar, se avanzará en la investigación de este enfoque híbrido, pues se variará algunas de las condiciones iniciales de la empresa que se ha tomado de referencia y se hará una comparación y análisis entre todos los resultados conseguidos.

Por último, con todos los datos conseguidos, se realizará una discusión, en la cual se podrán obtener conclusiones finales que permitan avanzar en el enfoque híbrido del sistema productivo MTF.

## 1.3 Sumario

Cada capítulo de este trabajo presenta las siguientes ideas:

- Capítulo 2: Sistemas de Producción. En este capítulo, se desarrolla una introducción y recorrido por distintos sistemas de producción, desde los más básicos hasta llegar al modelo de producción híbrida a estudiar, en particular el modelo MTF.
- Capítulo 3: Simulación. En este apartado, se realiza una introducción básica y se explica el simulador utilizado en este proyecto.
- Capítulo 4: Modelo de Simulación. En este capítulo, se explica detalladamente el modelo empleado para simular el escenario en cuestión.
- Capítulo 5: Resultados obtenidos y Conclusiones. En este último capítulo, se muestran los resultados conseguidos y se discuten las conclusiones que podemos obtener a través de dichos resultados.

## 2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

---

### 2.1 Introducción

Una actividad productiva es el conjunto de acciones necesarias que una empresa realiza para obtener un determinado producto. Así pues, cada empresa decide adoptar un sistema de producción con el fin de poder realizar sus operaciones y producir sus productos o servicios garantizando una eficiencia y eficacia en su desarrollo. El sistema de producción es la forma en la cual la empresa ordena las etapas del proceso productivo con el fin de conseguir una interdependencia entre sus organismos y sus operaciones de producción de manera lógica. Además, el sistema de producción que utiliza cada empresa depende del producto, con lo cual es el tipo de producto lo que define el sistema de producción que la empresa debe llevar a cabo.

Este proyecto se basa en esa idea, en la toma de decisión y gestión por parte de la empresa para determinar a través de un específico producto que se quiere fabricar, cuál sería el sistema de producción idóneo que pueda ajustarse de la mejor forma al servicio que se quiere dar al cliente.

Además, cada empresa para asegurarse un rendimiento óptimo, planifica una estrategia para desarrollar sus operaciones para conseguir así que el sistema productivo que se va a emplear cumpla los objetivos marcados. Esto se basa en la toma de una serie de decisiones estructurales interrelacionadas que deben garantizar que en el futuro la empresa desempeñe sus actividades productivas de la mejor manera posible. Para ello, se hace necesario considerar:

- Los objetivos que se quieren cumplir.
- Respecto a los productos o servicios a elaborar, las correspondientes cantidades y momentos de tiempo que permitan alcanzar dichas metas.
- Los componentes que hay que elaborar o adquirir y en qué momento de tiempo, para conseguir satisfacer lo establecido.
- Las actividades que deberán desarrollarse y en qué momentos, para cumplir los requerimientos de los componentes.
- Los recursos disponibles para evitar la problemática de la capacidad.
- Las necesidades de materiales, tanto de productos terminados para los clientes como de materias primas y componentes intermedios para la fabricación, de acuerdo con la planificación y programación elaborada (planificación, gestión y control de inventarios).

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST



Ilustración 1: Motor aeronáutico Rolls-Royce Fuente: mpl

Todas estas ideas que las empresas han tenido que llevar a cabo han provocado una constante evolución en los sistemas productivos. Así, en los siguientes apartados se explican las estrategias más básicas y utilizadas de producción que han servido de base para el desarrollo del nuevo sistema productivo MTF.

### 2.2 Sistemas básicos

Los siguientes sistemas de producción se consideran ambientes de trabajo clásicos, los cuales a lo largo de los años con el crecimiento industrial han desembocado en nuevas fórmulas para producir, que se intentan adaptar a los nuevos cambios. A continuación se detallan, con el objetivo de que posteriormente se puedan entender mejor sistemas más avanzados, como el propio MTF.

#### 2.2.1 Engineering To Order (ETO)

El ambiente de trabajo ETO es uno de los sistemas de producción clásicos de la manufactura. En el caso de este sistema, es el propio cliente quién define prácticamente todas las características, esto hace que el proceso sea único e irrepetible.

Este sistema de producción representa una situación extrema donde el tiempo de espera del cliente tiene que dar cabida al diseño y fabricación y por lo tanto, permite una personalización total del producto, pero con una respuesta muy retardada.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Además, cada orden del cliente requiere una planificación y organización concreta, como por ejemplo un set específico de números de parte, listas de materiales, y rutas de trabajo. Es por ello, que este tipo de escenarios tan concretos requieren que un contrato o una orden hayan sido claramente recibidas antes de comenzar el trabajo.

Normalmente, los productos que necesitan de la sistemática de los procesos ETO utilizan un proceso de administración de proyectos. Un ejemplo de productos que se fabrican bajo este sistema podría ser la construcción de una sonda espacial para una misión en Júpiter para la investigación de la naturaleza de su entorno. Para el éxito de este proyecto es necesaria una alta participación por parte del cliente en las etapas de diseño y en todas sus especificaciones, como puede ser en los requerimientos en los sistemas de navegación, baterías, el sistema para poner en órbita la sonda y los instrumentos de investigación para tomar medidas.

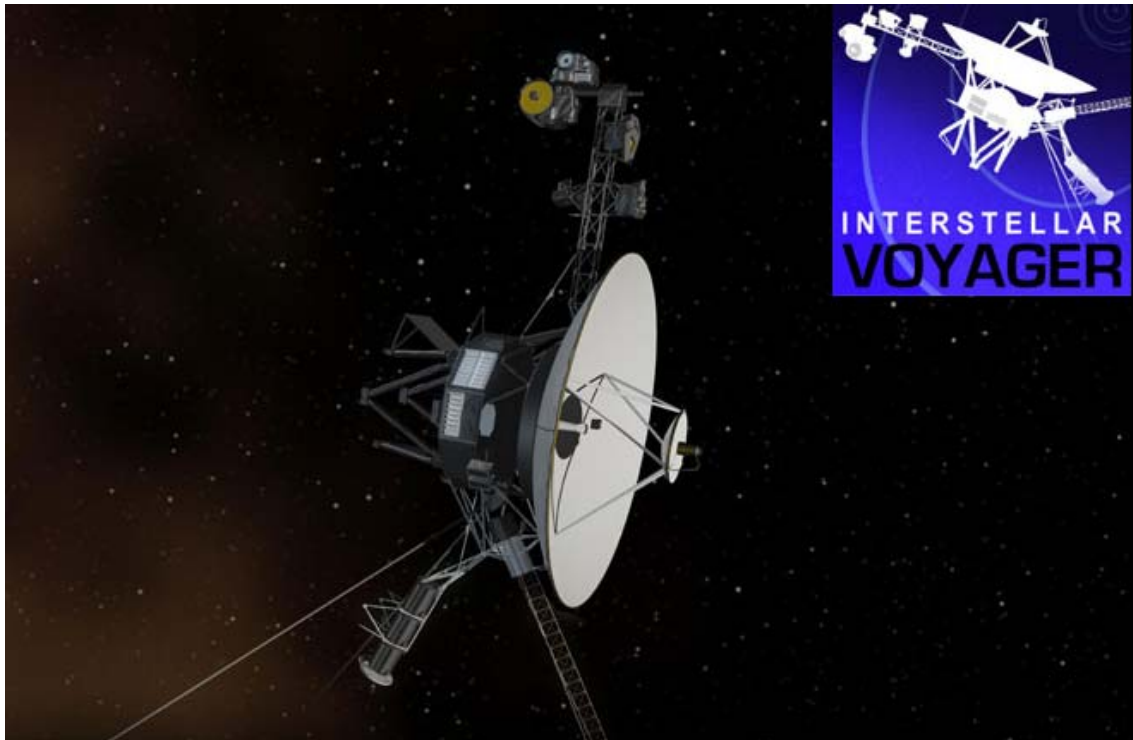


Ilustración 2: Misión a Júpiter con la sonda espacial Voyager Fuente: NASA

Las industrias que utilizan el ambiente ETO se encuentran con una problemática debido a las actividades de ingeniería de fabricación que deben realizarse tras la recepción del pedido con altas especificaciones y requerimientos. Dicha problemática se encuentra en la dificultad de la gestión del sistema de planificación y en la complejidad del control de la producción, que suele desembocar en una repuesta al cliente demorada.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 2.2.2 Make to Order (MTO)

Este escenario se basa en producir solamente cuando se recibe por parte del cliente un pedido o encargo de sus productos. Es decir, la empresa sólo comienza la producción de un determinado producto después de un contrato o encargo del cliente. En este tipo de ambientes, la empresa en primer lugar ofrece sus productos o servicios al mercado y posteriormente tras el contrato de compra o pedido es cuando se prepara para producir.

A pesar de tener los sistemas de producción ETO y MTO características muy similares, existe una diferencia fundamental entre estos dos ambientes de trabajo. Dicha diferencia se encuentra en que en el caso del MTO las características del producto están prácticamente definidas y el cliente únicamente define ciertos detalles para comenzar a producir el producto que solicita.

La producción bajo pedido es probablemente el escenario más común empleado por empresas donde se requieren estrategias para lograr una alta customización del producto que ofrecen al público. Así pues, el éxito del sistema de producción MTO depende de la capacidad de gestión de cada contrato o encargo. Por tanto, el plan de producción debe adaptarse a las necesidades del encargo y tratar de ser lo más eficiente posible. Además, para conseguir lograr las expectativas de la empresa, es necesario que la tecnología sea la adecuada. Esto dependerá del tipo de empresa, y a medida que aumenten las necesidades tecnológicas, también crecerán las necesidades de gestión, de organización, de apoyo logístico y de más recursos que influyen de forma directa o indirecta en la producción.

Un ejemplo de ambiente MTO podría ser una empresa que se dedique a proporcionar a sus clientes soluciones de materiales compuestos para el sector aeronáutico. La empresa estaría especializada en materiales compuestos para el sector y de esta forma, adaptaría en el producto la composición del material a las necesidades de la pieza o estructura acorde a los requerimientos del cliente de fatiga, resistencia, tensión... En resumen, la empresa ofrecería al mercado un servicio en soluciones de materiales productos y sería el cliente quién daría una serie de requerimientos que dicha solución debe cumplir.



Ilustración 3: Empresa de fabricación de material compuestos Fuente: triumphgroup

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 2.2.3 Assemble to Order (ATO)

El sistema de producción ATO es una mezcla entre los sistemas de almacenamiento y los sistemas bajo pedido. Los productos que fabrican las empresas que utilizan este escenario, se caracterizan por previamente tener la base del producto elaborada pero no ensamblada con las partes finales. Cuando la orden de pedido del cliente es recibida, es cuando se ensamblan rápidamente las partes finales.

Este ambiente de trabajo permite dar al cliente un servicio rápido porque el tiempo de espera es tan sólo el que se requiere para completar el producto una vez llegue el pedido. Además, es un sistema flexible porque permite una personalización del producto al elegir las partes finales que se desean ensamblar.

Los subensambles o partes finales se fabrican al igual que la base para su almacenamiento, lo que realmente se fabrica a la orden es el ensamble final. Estas partes finales son tomadas del inventario acorde al pedido del cliente cuando este es recibido para poder así terminar el producto. Estos componentes finales aunque tienen un grado de customización, son partes estandarizadas, las cuales el cliente elige entre una serie de opciones. Todo los componentes que la empresa fabrica y son almacenados han sido planificados acorde a una previsión de la demanda.

Este escenario plantea una estrategia apropiada para situaciones en las cuales una rápida respuesta es altamente valorada. Sin embargo, esto provoca que sólo se le pueda ofrecer al cliente una variedad limitada de productos. Todo esto requiere que la empresa trabaje en una estrategia para conseguir que el producto que se ofrece al mercado pueda ser personalificado lo más tarde posible del proceso, para así disminuir el tiempo de espera y a la vez la empresa debe intentar que el coste de almacenamiento de los componentes sea lo menor posible. Por lo tanto, el sistema ATO exige que se desarrolle una planificación sofisticada que se adelante a la demanda, la cual a su vez puede ir constantemente requiriendo una evolución en los subensambles.

Un ejemplo podría ser una empresa dedicada a la fabricación de drones, en la cual se ofreciera al mercado una serie de modelos, en los que para cada uno de ellos se pudiere elegir sus características o accesorios como por ejemplo el tipo de batería, memoria, cámara integrada...



Ilustración 4: Empresa especializada en fabricación de Drones. Fuente:basedrone

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 2.2.4 Make To Stock (MTS)

El sistema MTS es utilizado por empresas que fabrican un producto concreto, para los cuales no existen cambios en la línea de producción durante largos periodos de tiempo. Los productos manufacturados bajo este esquema son fabricados sin existir una orden previa por parte del cliente.

Para que este ambiente de trabajo funcione es necesaria una planificación adecuada basada en la demanda. El MTS es utilizado por las empresas cuando se tiene una demanda constante y conocida, apoyada en el comportamiento histórico. Dicha planificación es de vital importancia, pues cuanto más se acerque a la demanda real, mayor será la satisfacción del cliente, serán evitados unos inventarios excesivos o bien, no tener en inventario suficiente producto para cubrir la demanda. Con lo cual, esto supone una alta inversión y disponer de espacio suficiente para almacenar los productos fabricados.

Además de tener una demanda controlada y constante de los clientes, son necesarias otras condiciones para que el ambiente MTS se desarrolle correctamente. Una de estas condiciones principales es que el producto debe presentar poca variedad, puesto que el sistema MTS es un sistema inflexible, lo cual supone un gran riesgo frente a los cambios en las exigencias del cliente que se pueden dar. Debido a esta inflexibilidad, el aprovisionamiento de material no puede presentar fallos puesto que todas las operaciones deben estar perfectamente definidas, y un cambio en el material supondría cambios en dichas operaciones, congelando así la línea de producción. Otra de las condiciones para que el sistema pueda cumplir los objetivos es que se debe utilizar una tecnología eficiente con un mantenimiento preventivo, para evitar un fallo en la maquinaria y por lo tanto, un desequilibrio en el sistema.

Por otro lado, el MTS presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Algunas de estas ventajas más importantes pueden ser las siguientes:

- Reducción de los tiempos de espera del cliente. La entrega del producto es inmediata pues el producto se encuentra en el inventario.
- Reducción del factor humano. La automatización permite una mínima manipulación del material, lo cual hace que se minimice el error humano.
- Mano de obra fácil de reemplazar debido a que los procesos están muy mecanizados.
- Reducción del coste unitario, puesto que los productos se fabrican en grandes cantidades.

En cambio, las empresas que trabajan con este escenario deben asumir los siguientes inconvenientes:

- Gran inversión. La implantación de estos sistemas requiere un coste elevado tanto en la automatización del sistema, con maquinarias caras, como en el sistema de gestión.
- Rigidez en el sistema. Este tipo de ambientes son inflexibles pues una vez diseñados e implantados son difíciles cambiarlos.
- Diseño complejo. Es necesario que no se requiera cambiarlo durante un largo periodo de tiempo.
- El ritmo de producción lo marca la estación más lenta, lo cual puede producir tiempos muertos en algunos puestos de trabajo.
- El fallo en alguna estación de trabajo puede suponer interrumpir todo el proceso.



## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Un ejemplo de este sistema podría ser una empresa de fabricación de tornillos o remaches, los cuales se fabrican bajo una normativa, con lo cual se pueden producir en masa pues no existe variación en las características del producto. Además, este sistema requiere de un proceso de elaboración con uso de maquinarias con alta automatización.



Ilustración 5: Industrias Lotu fabricación de tornillos y remaches. Fuente: Lotu Industrias

## 2.3 Sistemas avanzados

### 2.3.1 Make to Forecast (MTF)

A lo largo de los años la gestión de la producción ha reconocido dos tipos de escenarios básicos, el sistema MTO y MTS. Como se ha comentado anteriormente, estos dos tipos de ambientes presentan características muy distintas en la dinámica de su producción. Por un lado, el MTS está basado en pronósticos de la demanda, con la fabricación de productos genéricos y de alta rotación (Rafiei y Rabbani, 2009). En cambio, por otro lado, el sistema MTO trabaja bajo órdenes del cliente, con un tiempo de respuesta mayor (Chen, et al., 2009). A su vez, estos dos sistemas pueden ser más específicos y derivar a otros escenarios tradicionales, que como ya se han explicado, son los sistemas ETO y ATO.

Aunque los ambientes MTO y MTS presentan claras diferencias, resulta imposible evitar que dichos escenarios se den de manera conjunta en algunos sistemas de producción reales. En estos casos, la empresa debe afrontar la problemática de responder a objetivos diferentes, e incluso a veces opuestos, con unos recursos limitados, impactando en el servicio al cliente.

Pues bien, dicha problemática es reconocida desde los 60's cuando Pop (1965) presentó un modelo de inventario estocástico con tiempo de entrega cero para comparar el coste de fabricar bajo MTO y MTS (Rajagopalan, 2002). La búsqueda de soluciones para la temática MTS versus MTO ha sido cada vez más relevante y difícil de afrontar, pues hoy día la variación de producto aumenta constantemente y las condiciones de mercado son cada vez más exigentes (Kerkkanen, 2007). Así pues, en los últimos años las políticas tradicionales se han ido olvidando y en cambio, han ido evolucionando gradualmente hacia una producción híbrida MTS/MTO, en donde las compañías combinan ambos ambientes (Kalantari et al., 2011).

Las empresas al enfrentarse a esta cuestión reconocen tres grandes problemas principalmente, de hecho, Soman (2004) divide la problemática en tres grupos:

- La primera sería qué productos fabricar bajo pedido y cuáles para inventario (Rajagopalan, (2002); Kerkkanen, (2007); Zaerpour, et al., (2008); Olhager, (2001); Soman, (2004)).
- Otra cuestión planteada es la política de producción e inventario a seguir, la cual aborda decisiones de aceptación de pedidos, fechas de entrega y niveles de inventario adecuados, asignación de capacidad y tamaños de lote (Corti, et al., (2006); Gharehgozli y Rabbani, (2006); Jiang y Geunes, (2006); Kalantari et al., (2011); Kaminsky y Kaya, (2006)).
- La tercera aborda las decisiones sobre la programación y control de la producción, las cuales intentan resolver los problemas que se plantean de secuenciación en los sistemas de producción, (Soman, et al., (2006); Chang, (2003); Federgruen y Katalan, (1999); Soman, et al., (2007); Wu, et al., (2008)).

Todas estas cuestiones planteadas por Soman (2004) son afrontadas con un enfoque híbrido MTS/MTO por Meredith y Akinc, (2007), el cual es denominado Make to Forecast (MTF). Este sistema de producción híbrido resuelve la problemática planteada con un modelo basado en fabricar productos generales según un pronóstico y después los modifica parcialmente acorde a las órdenes de los clientes que van entrando. Es decir, es un modelo productivo que empieza fabricando siguiendo un ambiente MTS, pero sin inventario, para terminar entregando al cliente bajo un escenario MTO.

Meredith y Akinc, (2007) apuestan por esta solución debido a la inminente presión competitiva por las empresas para lograr una entrega del producto cada vez más rápida y a la vez con una customización del producto mayor, sin incrementar costes. Así pues, Meredith y Akinc, (2007) intentan describir este enfoque para su posible aplicación en diferentes industrias, pero especifican que el reto de este nuevo modelo es el llegar a poder hacer coincidir las unidades parcialmente acabadas con los pedidos entrantes y estudiar qué regla de decisión es más apropiada para esta función.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Para poder entender mejor el sistema MTF, la siguiente figura muestra la localización entre los escenarios mostrados en apartados anteriores. Por un lado, se puede situar el sistema MTF en relación a la capacidad de respuesta antes las órdenes de llegada de los clientes (eje horizontal). En este sentido, el modelo MTF no puede llegar a niveles de repuesta inmediata como un sistema con inventario, pero sin embargo consigue entregar al cliente el producto en un tiempo menor que al propio de fabricación del producto. Por otro lado, en la figura, también se ubica el sistema MTF en relación a los niveles de personalización del producto (eje vertical). En relación a esta cuestión, el sistema no puede ofrecer al cliente la posibilidad de añadir requerimientos únicos al producto, sin embargo le puede dar la opción de elegir entre una serie de configuraciones alternativas.

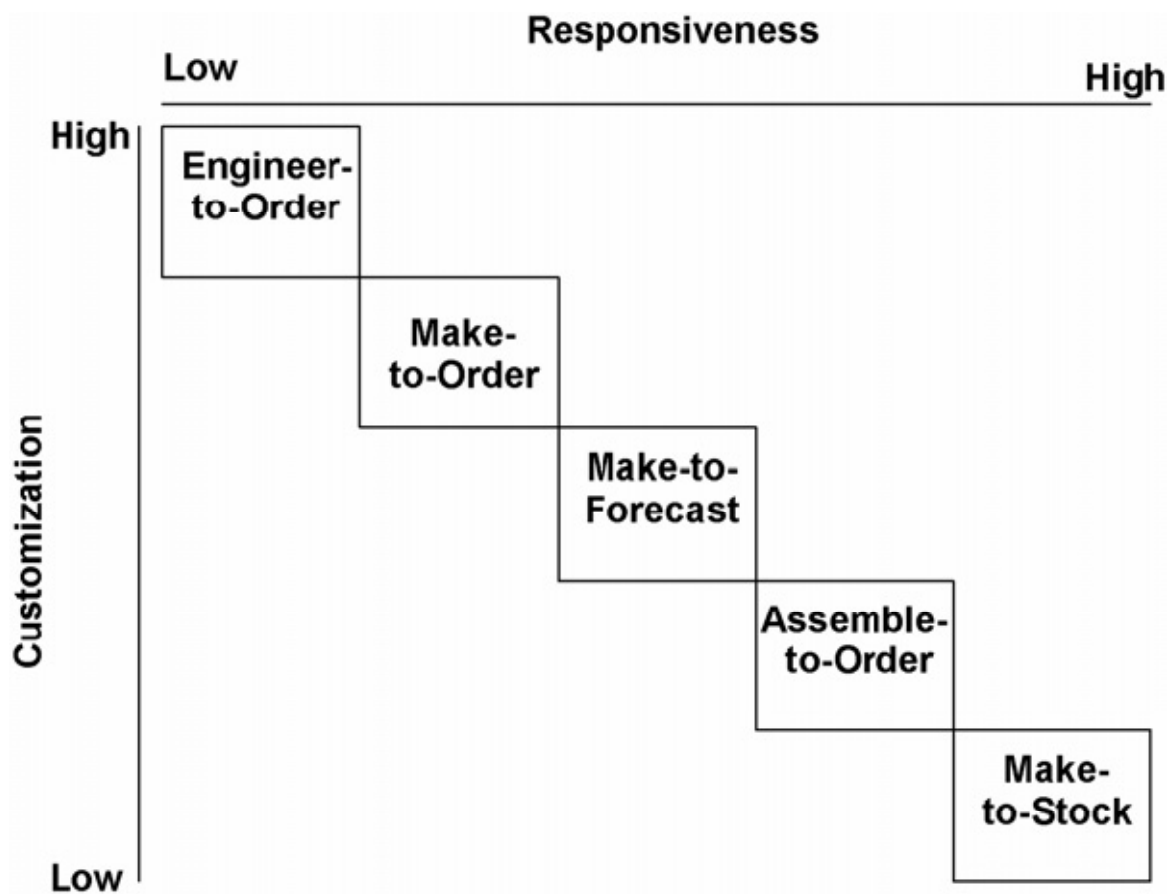


Ilustración 6: Localización Make to Forecast frente a otras estrategias Fuente: Sciencedirect

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

La situación MTF puede darse en muchos sectores de la ingeniería, como puede ser en la fabricación de herramientas mecánicas, válvulas de presión nuclear, máquinas de inyección de plástico o bien, maquinaria para la construcción. Aunque, Meredith y Akinc (2007) afirman que el posible sector donde su modelo podría adaptarse con grandes ventajas podría ser en industrias aeronáuticas, pues por ejemplo para una empresa que trabaja produciendo avionetas, se podría comenzar fabricando la estructura de la aeronave para luego acorde a las especificaciones del cliente equiparla.

Sin embargo, Meredith y Akinc (2007) también reconocen que se debe prestar especial atención a la gestión de adaptar los pedidos a las aeronaves que se encuentran en la línea de producción actual. Por ejemplo, mientras los aviones se están fabricando, órdenes entrantes de las compañías aéreas deberían ir siendo adaptadas al proceso del fuselaje para pintar así sus logos en la cola. Si un avión bastante avanzado aparece en la línea de producción sin un logo en su cola, se podría denominar un "cola blanca" y debería ser controlado por dos razones. En primer lugar, ya que no puede ser desprendiendo de la línea de producción a la espera de una orden del cliente, pues no existe inventario en el MTF, y debe avanzar por la línea donde más componentes se le añaden. En segundo lugar, cuanto más cerca "un cola blanca" llega al final del proceso de producción, es más probable que sea completado sin un comprador, a este producto acabado sin cliente lo denominan "huérfano". Aún así, el sistema MTF presenta grandes ventajas si se consiguen eliminar los posibles inconvenientes presentados, con lo cual es necesario seguir analizando y profundizando en su estudio.

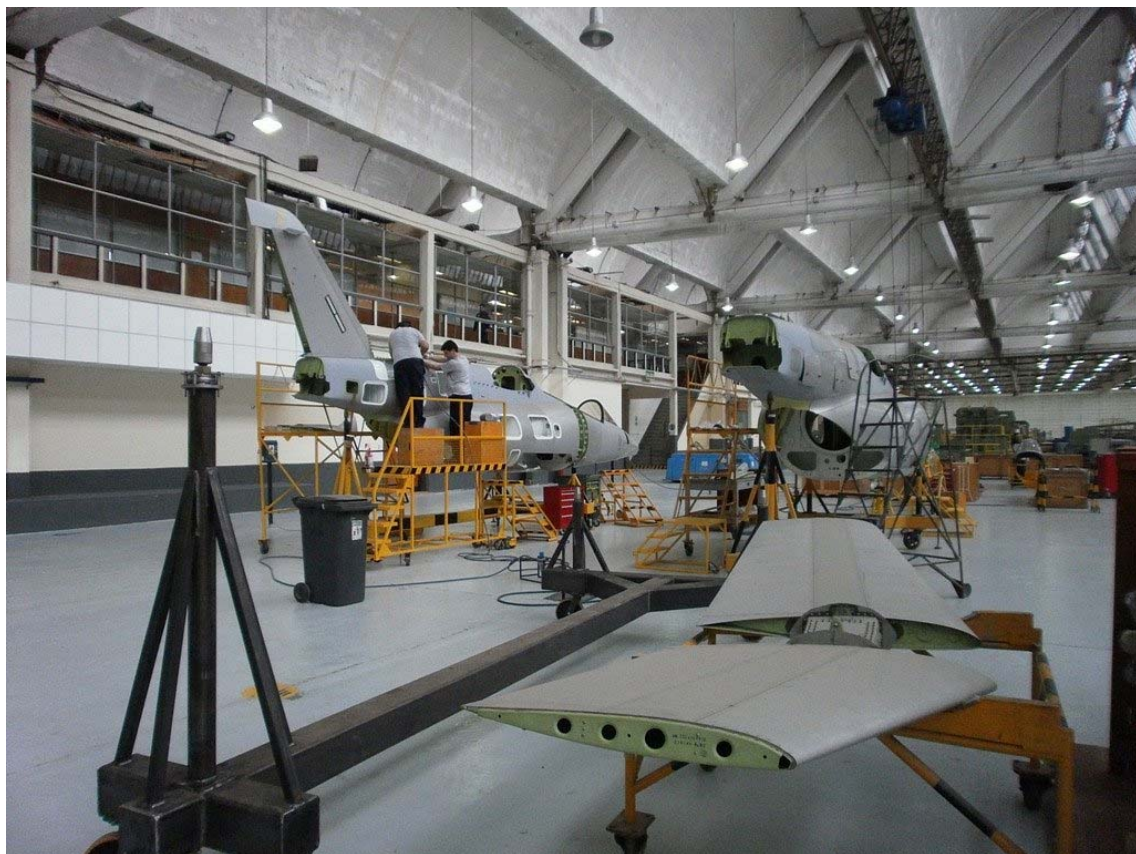


Ilustración 7: Montaje de la cola para una aeronave. Fuente: Taringa

## 3 SIMULACIÓN

### 3.1 Simulación

#### 3.1.1 Introducción - Toma de decisiones

Las empresas se enfrentan de manera constante a la toma de decisiones estratégicas que impactarán en el mediano y largo plazo de su gestión. Este impacto en la organización, deberá cumplir los objetivos marcados para el futuro, lo cual hace que se deban plantear todas las situaciones posibles que se puedan dar y analizar así tanto las deseadas, como las que no.

La toma de decisiones genera siempre enfrentarse a un cierto riesgo e incertidumbre, que por lo general se debe gestionar desde la inexperiencia o incompetencia, al ser una nueva situación la que se afronta. Es por ello, que se deben tener en cuenta todas las variables y en el caso que pudiera ocurrir un escenario no deseado en dicha toma de decisiones, se debe analizar la gestión para corregir su evolución. Los efectos de tomar una decisión sin evaluar un comportamiento de las variables no eficiente para la empresa, puede desencadenar un agravante que los controles de gestión podrían no llegar a resolver.

Acorde al marco anterior presentado, los efectos de una decisión gestionada mediante sistemas tradicionales, en los cuales se espera que el sistema reaccione después de la decisión implementada y se deba esperar un tiempo para conocer si la decisión tomada fue satisfactoria o no, pueden llegar a ser realmente ineficientes y costosos.

La solución a todo lo anterior la proporciona el uso de la simulación para el estudio y análisis de las estrategias de las empresas.

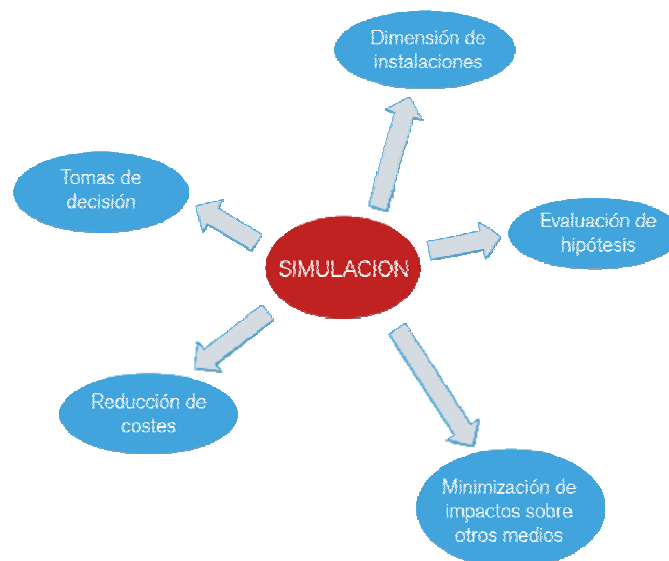


Ilustración 8: Toma de decisiones mediante simulación Fuente: 4DLABS, Simulación

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

La simulación permite utilizar un procedimiento en el que se puede implementar una decisión con todas sus variables, desarrollar distintas pruebas y ver los posibles errores que pueden surgir, para poder corregir y mejorar la decisión tomada y conseguir así los objetivos marcados.

En resumen, la simulación es la herramienta que puede ayudar a corroborar las hipótesis estudiadas durante la toma de decisiones y comprobar así los efectos que pueden provocar una vez sean implementadas.

### 3.1.2 Concepto de simulación

La simulación de proceso es una de las herramientas más importantes de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para conseguir plasmar una situación real imitando un escenario real con la máxima precisión posible.

Una de las ventajas del uso de la simulación es que con ella se consiguen minimizar los costos involucrados en la decisión, pues se disminuye el tiempo en la comprobación de los resultados y se minimizan las posibilidades de riesgo. Todo esto ha conseguido que la simulación se aplique a numerosos campos para poder experimentar muchas más situaciones que las que se pueden desarrollar en la práctica, pues como se ha dicho, se desarrolla con un ahorro de tiempo y dinero. Además, gracias a la simulación se consigue evitar experimentos que llevados a la realidad hubieran fracasado.

La aplicación de la simulación, implica por lo general el manejo de un gran volumen de datos y la ejecución de un considerable número de repeticiones, ya que se pretende reflejar un modelo lo más parecido posible a la realidad y que permita así tomar una decisión con un alto grado de confiabilidad. Este desempeño sólo es posible con el uso de un computador con la ayuda de un software. Este el caso de ARENA, que será el software utilizado en este proyecto.

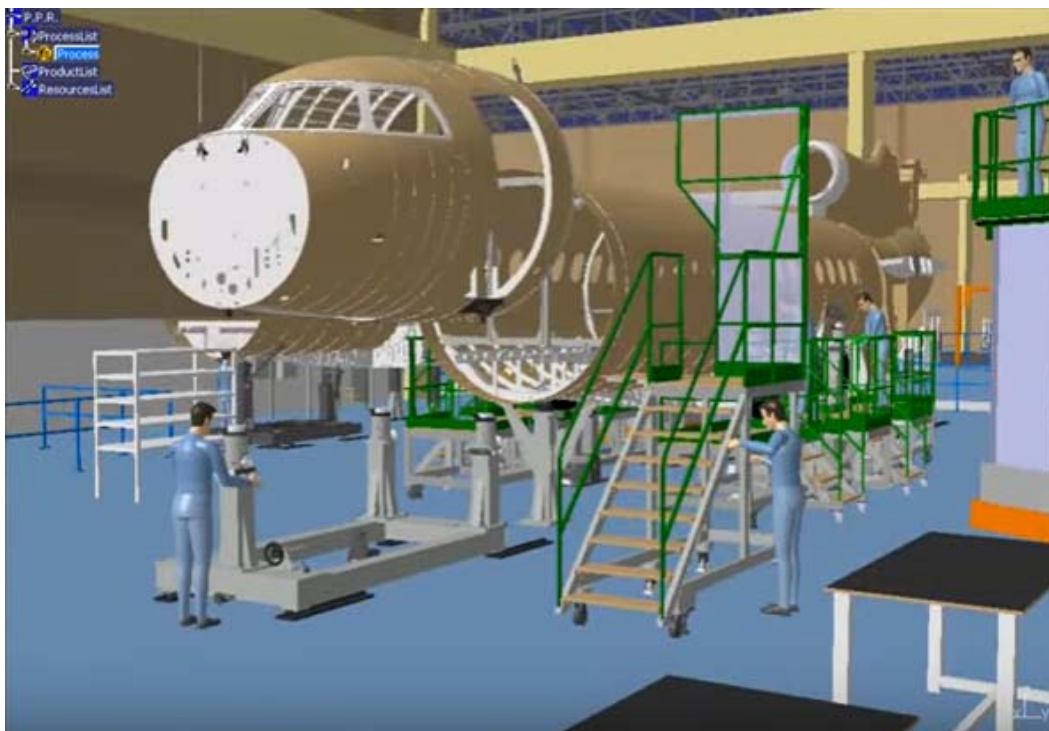


Ilustración 9: Simulación de una planta aeronáutica Fuente: Youtube

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

## 3.2 El entorno ARENA

### 3.2.1 Reseña Histórica

Los orígenes de ARENA se inician en 1982, año en el cual Dennis Pegden publicó un lenguaje de simulación para modelar en un ordenador sistemas de manufactura. Este lenguaje resultó ser bastante útil y eficiente y permitió poder simular sistemas grandes y complejos.

Sin embargo, el software ARENA se introduce en el mercado en el año 1993 para poder crear modelos de simulación con ambientes gráficos e interactivos, mediante el uso del lenguaje de programación llamado SIMAN.



Ilustración 10: ARENA software Fuente: visiongss

### 3.2.2 Utilidades del uso del software ARENA

El software ARENA permite el desarrollo de un entorno de trabajo integrado para modelar procesos en una amplia variedad de campos. Destaca en el análisis de procesos de gestión administrativa y servicios, o bien en el estudio de sistemas de producción y logística industrial.

Así pues, para estos sectores ARENA posibilita la simulación de eventos discretos, donde se crean modelos siguiendo un flujo de trabajo en los cuales las entidades se van moviendo entre los distintos bloques.

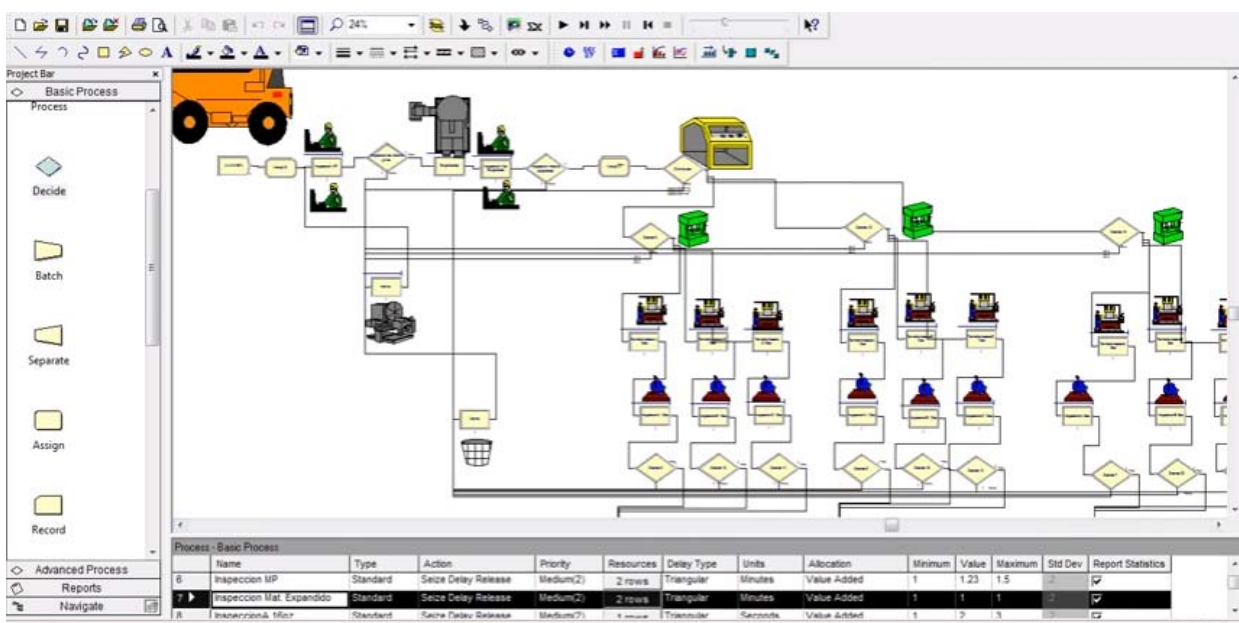


Ilustración 11: Simulación de una fábrica Fuente: Youtube

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 3.2.3 Ventajas del simulador ARENA

El entorno ARENA presenta múltiples ventajas, entre las que se pueden destacar:

- Es una herramienta fuerte para la simulación, mediante la cual se puede visualizar a tiempo real los distintos elementos del entorno, sin tener que esperar a que la simulación llega a su fin para detectar errores.
- El uso del simulador es de fácil uso con utilitarios de manejo sencillo, para el cual no se necesita altos conocimientos de programación.
- Presenta una excelente capacidad gráfica.
- Ofrece gran versatilidad, pues se puede adaptar a sectores muy distintos entre sí.
- Es compatible con las herramientas de MICROSOFT OFFICE.

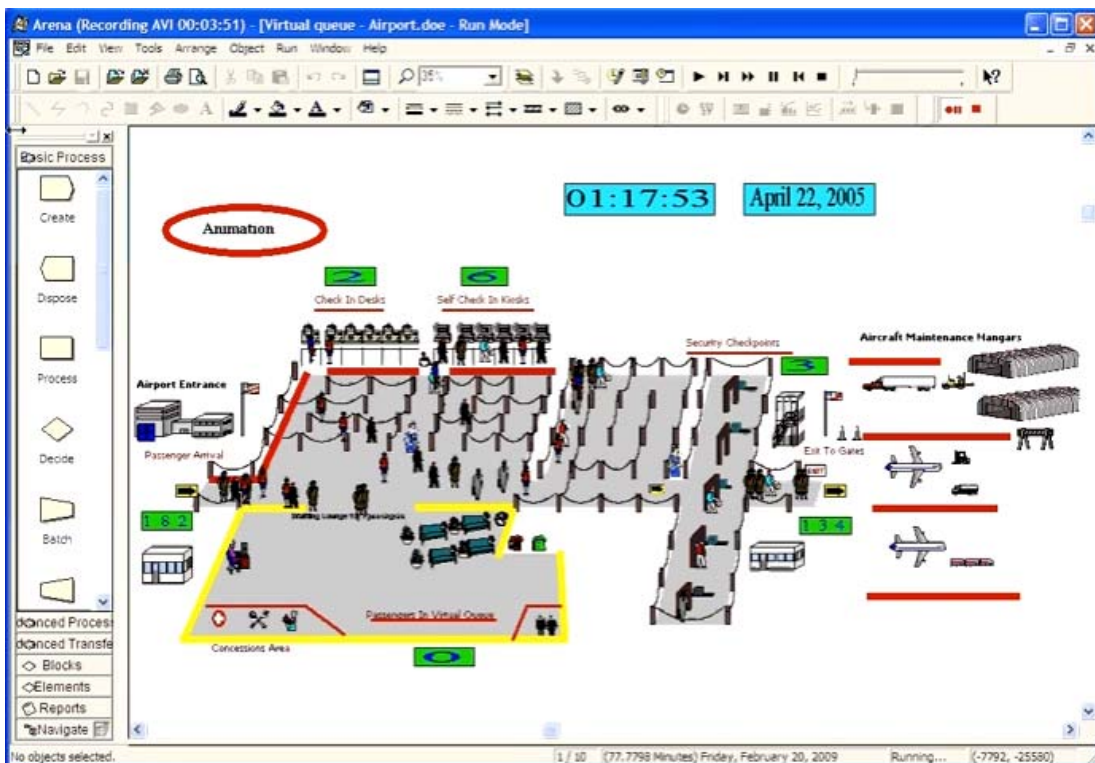


Ilustración 12: Simulación de un aeropuerto con gráficos Fuente: Youtube

### 3.2.4 Desventajas del simulador ARENA

Por otro lado, la herramienta ARENA frente a otros simuladores tiene algunos inconvenientes:

- Un modelo creado con ARENA es muy complicado que se pueda correr con otro programa de simulación, esto se debe fundamentalmente a que resulta difícil que se puedan sincronizar los relojes de ARENA con los de otros programas.
- La documentación y posible ayuda que ofrece la herramienta es escasa, con lo que a veces el usuario carece de información suficientemente clara para el uso del simulador.



### **3.3 Conceptos Básicos**

#### **3.3.1 Fundamentos de la simulación**

A continuación se detallan los conceptos básicos que son necesarios tener en cuenta para poder simular un escenario.

##### **3.3.1.1 Entidades**

Las entidades son objetos dinámicos en la simulación, que se mueven por el sistema y causan cambios en las variables de respuesta. Además, las entidades son elementos en el sistema que pueden abandonarlo o bien permanecer indefinidamente circulando en él.

Ejemplos de entidades:

- Un cliente en un banco.
- Una orden de pedido en un sistema de inventario.
- Una lámina de acero en un proceso de manufactura.

##### **3.3.1.2 Recurso**

Es un elemento estacionario que representan actividades que ocupan las entidades. Los recursos restringen los flujos de los sistemas, pues se emplean para representar las actividades por las cuales las entidades deben pasar, es decir, una entidad ocupa un recurso disponible para obtener un servicio, y una vez terminado libera dicho recurso.

Para el caso en el que la entidad fuese una pieza, los posibles recursos podrían ser una persona (un operario), una máquina (una fresadora), o bien el sitio de almacenamiento (zona de carga).

Un recurso puede ser individual o estar formado por un grupo de unidades de recurso. Además, el número de unidades de recurso disponibles para las entidades puede ir variando a lo largo de la simulación.

##### **3.3.1.3 Funcionamiento Entidad/Recurso**

Los posibles estados cuando una entidad solicita un recurso son los siguientes:

- Seize. La entidad ocupa el recurso porque está disponible.
- Queue. El recurso no está disponible y la entidad debe esperar en la cola asociada al recurso hasta que éste se desocupe.

Por otro lado, los estados que puede tener un recurso una vez la entidad ya ha tomado el control son los siguientes:

- Release. Una vez la entidad libera al recurso y por tanto, otra entidad puede pasar a ocuparlo.
- O bien, la entidad puede seguir ocupando el recurso para realizar los procesos que sean necesarios hasta terminar el ciclo en dicho recurso y posteriormente liberarlo.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 3.3.1.4 Atributo

Los atributos son características de una determinada clase que se le pueden otorgar a una entidad. En ARENA se pueden asignar a la entidad tantos atributos como el modelo de simulación requiera. Así pues, cada entidad posee un valor del atributo, esto supone que para determinar el valor asignado de un atributo a una entidad, a diferencia de una variable, se debe examinar la entidad que lo aporta.

Los atributos en ARENA se definen con un nombre, sin embargo deben tener un valor numérico una vez asignado. Un ejemplo, podría ser el atributo color, el cual dependiendo si se le asigna a la entidad el color rojo, verde, amarillo o azul, adopta los valores 1, 2, 3 o 4 respectivamente.

Además, los atributos no tienen que tener un rango determinado de valores, sino que también permiten asignar un valor único a la entidad. Este es el caso de poder darle a la entidad un atributo que sea el número de pedido, así pues, se le otorga el valor 1 al primer pedido y conforme entra otro pedido se incrementa este valor.

Los atributos también pueden seguir una distribución, por ejemplo, en el proceso de fabricación de tornillos, el diámetro de la cabeza puede seguir una distribución normal con una desviación estándar. En este caso, el atributo sería el diámetro y el valor adoptado sería el proporcionado por la distribución asociada.

### 3.3.1.5 Variable

Las variables representan características del sistema, son de carácter global, es decir su valor es el mismo en cualquier parte del modelo y son independientes de los tipos de entidades. Además, las variables son accesibles desde todas las entidades y pueden llegar a ser modificadas por cualquier tipo de entidad.

Existen dos tipos de variables, por un lado las variables intrínsecas a los elementos del sistema y por otro lado, las variables que surgen por las necesidades del modelo de simulación.

En el caso de las variables que son independientes a los componentes del sistema, estas son predeterminadas por el programa de simulación. Un ejemplo claro sería el valor de entidades que existen en una cola de un recurso o bien el número de recursos ocupados. En definitiva, son variables que el sistema necesita para la gestión y control del mismo.

El otro tipo de variables que existe en un sistema son las creadas por el usuario para lograr el control del escenario simulado. Por ejemplo, una variable podría considerarse el nivel de inventario en un sistema de producción.

### 3.3.1.6 Evento

El concepto de evento se explica como la ocurrencia que genera un cambio en el estado del sistema. Los eventos son sucesos asociados a un determinado instante de tiempo simulado y pueden cambiar el valor de los atributos y las variables.

La ejecución de los eventos durante la simulación de modelos de tiempo discretos es lo que provoca los cambios en las propiedades de los modelos. Los cambios en los valores se realizan en los instantes en que los eventos son activados y se mantienen constantes entre la ejecución del modelo entre dos eventos sucesivos.

Un ejemplo sencillo de eventos en una simulación serían el inicio de la simulación, la llegada de una entidad a un recurso o bien, el final de la simulación. En la siguiente figura se muestra los diferentes estados de una variable en los distintos eventos y como entre dos eventos consecutivos se mantiene constante.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

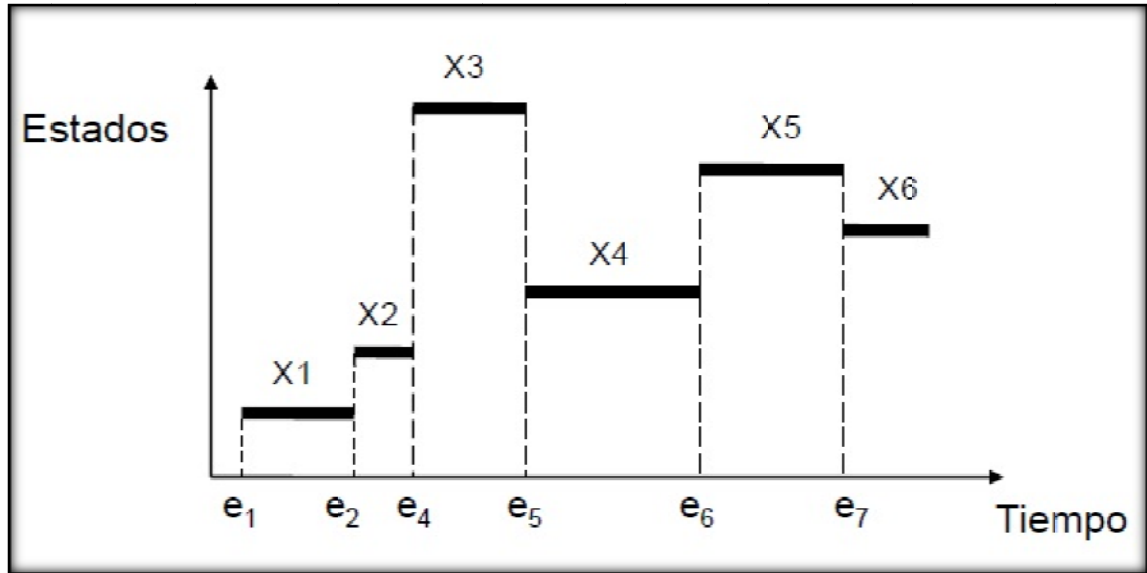


Ilustración 13: Estado de una variable Fuente: ucsimulacionsistemas-wordpress

En la siguiente figura se puede ver un ejemplo práctico de algunos eventos durante el despegue y aterrizaje de un avión:

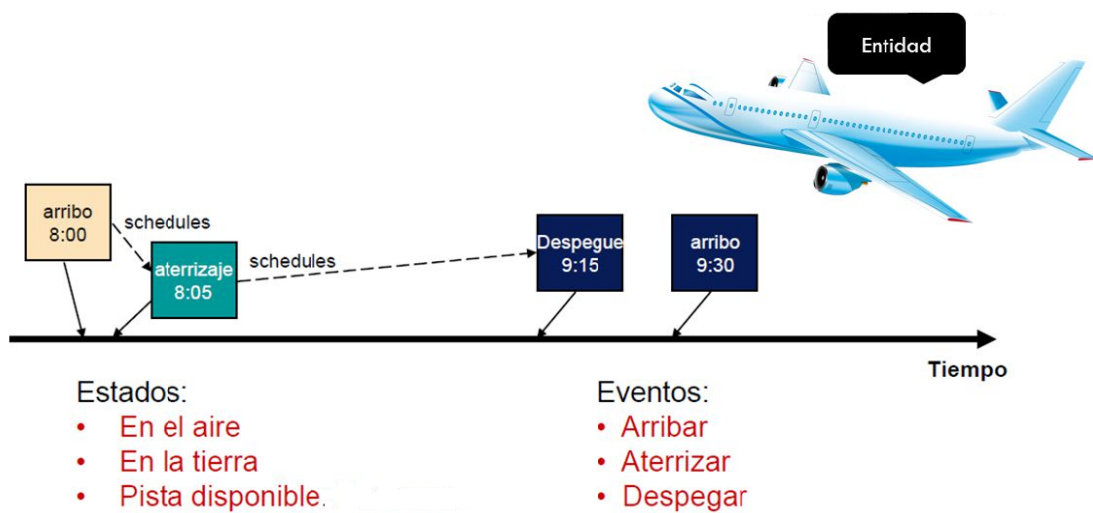


Ilustración 14: Eventos durante la fase de despegue y aterrizaje Fuente: slideplayer

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 3.3.1.7 Sistema

Un sistema es un conjunto de elementos interrelaciones entre sí de manera organizada, que recibe entradas, las procesa con el fin de emitir unas salidas que cumplan los objetivos marcados.



Ilustración 15: Concepto de sistema Fuente: vri.unicauca.edu

## 3.4 Descripción de los módulos lógicos de ARENA

Los siguientes módulos que se van a explicar son los utilizados en el modelo estudiado, aunque existen muchos más módulos que aportan nuevas funciones para aplicar a los escenarios de simulación. Cualquier módulo se relaciona entre sí con otros, permitiendo un flujo de operación, para poder llegar así a simular un escenario que se aproxime a la realidad.

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

## 3.4.1 Create

Las entidades procesadas a lo largo de la simulación se generan en este módulo, el cual es el punto de inicio para la construcción del modelo. Este módulo permite asignar el tipo de entidad que se va a crear.

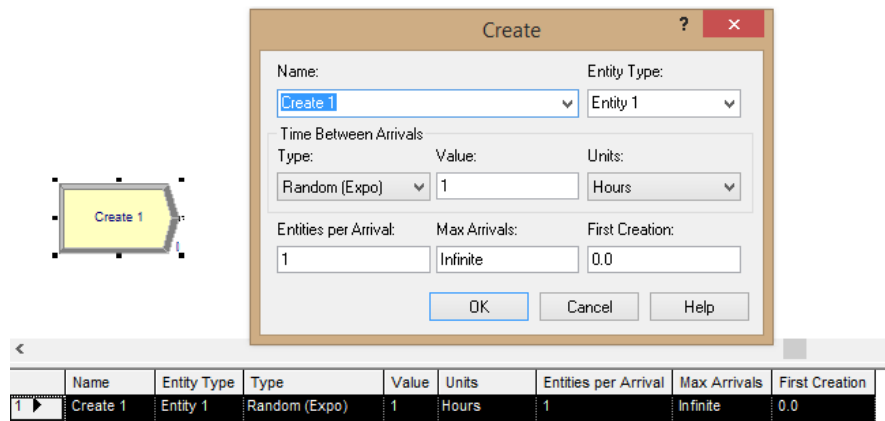


Ilustración 16: Bloque Create Fuente: ARENA

Los campos de este bloque son los siguientes:

- Name. Es el nombre que se le da al módulo y se utiliza para identificar y poder así referenciarlo en otros bloques del modelo. Este bloque debe ser único.
- Entity Type. Tipo de entidad que asigna de manera automática y sirve para definir los costos iniciales y animación.
- Type. Tipo de llegada de las entidades al modelo. Puede ser aleatorio (Random), programado (Schedule), constante (Constant) o bien puede seguir una distribución (Expression).
- Entities per arrival. Entidades por evento de llegada. Define la cantidad de entidades creadas en un evento. Este campo permite introducir una distribución.
- Max arrivals. Máximo de llegadas que se pueden crear en un evento.
- First create. Primera creación que define el tiempo en cual se crea la primera entidad. Por defecto es 0.

### 3.4.2 Dispose

Este bloque permite retirar una entidad del modelo y se localiza al final de todas las instrucciones cuando se considera que una entidad debe salir del escenario de simulación. En este módulo quedan recogidas todas las estadísticas correspondientes a la entidad.

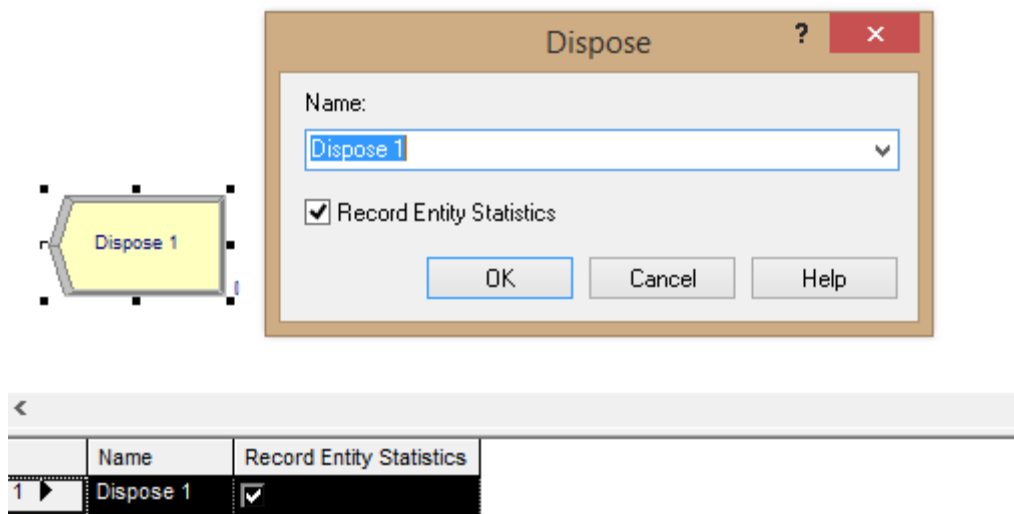


Ilustración 17: Bloque Dispose Fuente: ARENA

El único campo que se requiere rellenar es el nombre y si se quiere recolectar las estadísticas acorde a la entidad activar el cuadro de verificación (Record Entity Statistics).

### 3.4.3 Assign

La función de este módulo es cambiar el valor de un atributo, figura, nivel, secuencia o cualquier variable del sistema. Este bloque permite hacer varias asignaciones a la vez dentro del mismo.

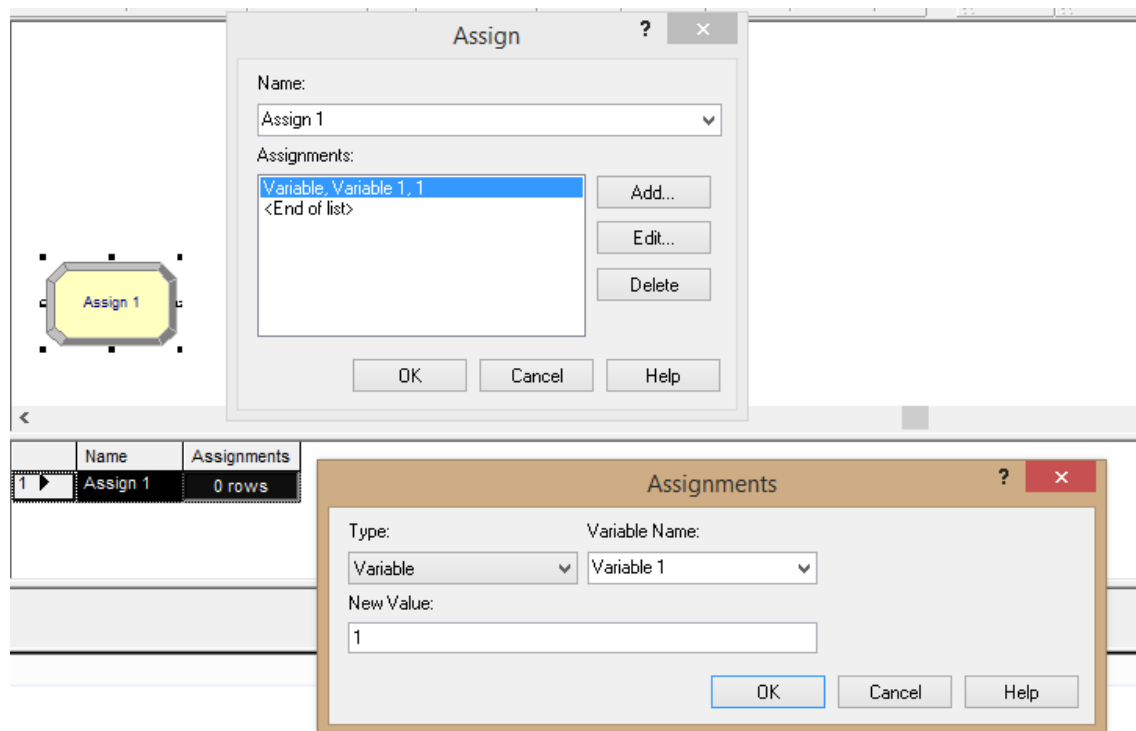


Ilustración 18: Bloque Assign Fuente: ARENA

Los campos de este bloque son los siguientes:

- Name. En el cual se identifica al módulo para poder referenciarlo en otras partes del modelo, por lo que debe ser único.
- Assignments. Lista de asignaciones dentro del módulo. Si se seleccionan cualquiera de ellas y se pulsa Add se pueden incluir más asignaciones.

Dentro de cada asignación se deben rellenar una serie de cambios:

- Type. Tipo de asignación, puede ser un atributo, variable, entidad...
- Attribute Name. Nombre del atributo que se va a modificar.
- New Value. Valor del atributo, que se asigna con una expresión.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 3.4.4 Process

En este módulo las entidades se procesan realizando una operación que conlleva la utilización de un recurso, la demora que supone el uso del propio recurso y posteriormente la liberación de ese recurso.

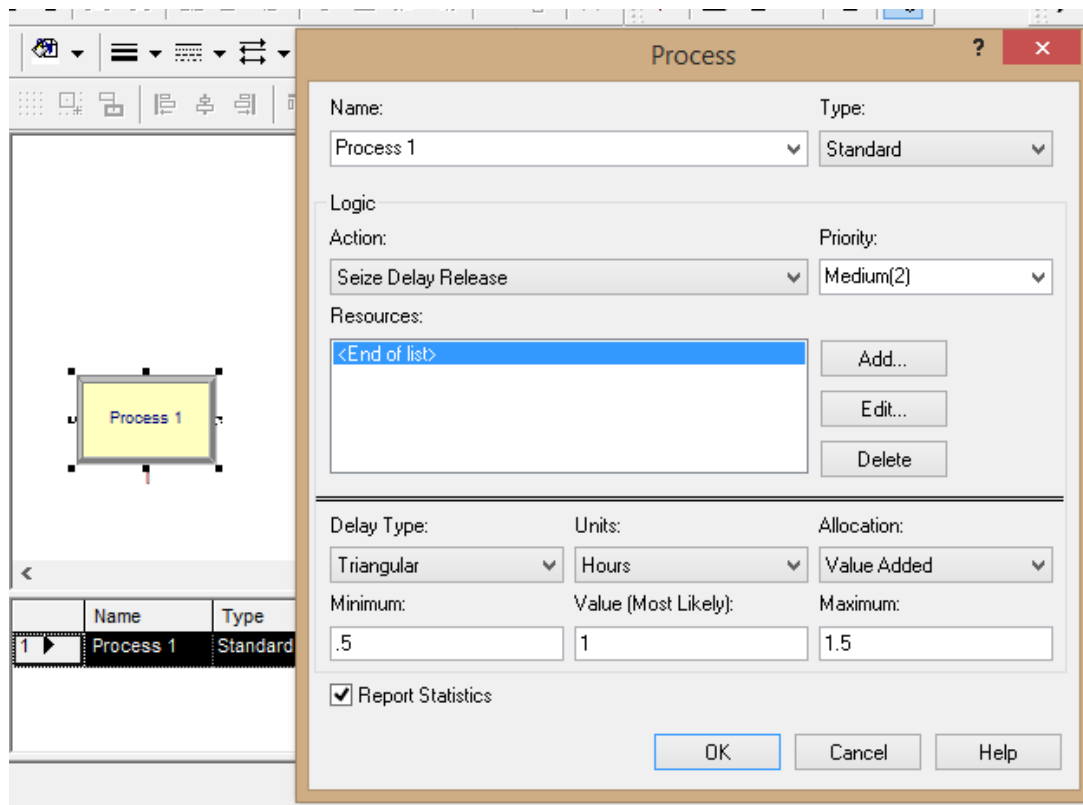


Ilustración 19: Bloque Process Fuente:ARENA

En primer lugar, los campos que se deben rellenar son los que se indican a continuación:

- Name. Nombre del módulo para poder referenciarlo en otras instancias. El nombre de este campo debe ser único.
- Type. Se define el tipo de módulo, puede ser estándar o un submodelo.

Por otro lado, existe un macro denominado Logic, en el cual se definen las acciones que la entidad va a experimentar una vez la entidad entra en el bloque Process. Las acciones (campo Action) que se pueden llevar a cabo son las siguientes:

- Delay. Se utiliza si durante el tiempo especificado la entidad sufre una demora sin ocupar recursos.
- Seize, Delay. La entidad ocupa el recurso y además sufre una demora, con lo que no libera el recurso.
- Seize, Delay, Release. La entidad ocupa el recurso, sufre una demora y posteriormente lo libera.
- Delay, Release. La entidad que previamente ocupaba el recurso, demora y finalmente lo libera.



## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Además, el campo Priority permite que un recurso atienda antes a entidades con valores de prioridad bajos que aquellas que los tienen altos. Esta función se emplea cuando existen varias entidades solicitando un recurso.

El resto de campos son similares a los mencionados previamente cuando se ha explicado el módulo Create, excepto el campo Allocate que sirve para el tratamiento de costos.

### 3.4.5 Decide

El módulo Decide permite separar el flujo en distintas ramificaciones en función de una regla de decisión que el usuario programa. Dicha regla puede estar basada en una probabilidad, condición o expresión. Además, el flujo se puede dividir tanto en dos ramificaciones (respuesta verdadero o falso) o bien en tantas salidas como se quiera.

En la siguiente figura se puede observar las distintas opciones que ARENA proporciona. Por un lado, se elige si se necesita dos caminos de salida (2-way) o bien un número específico de ramificaciones (N-way). Por otro, si la división del flujo va a seguir una probabilidad (Chance) o una condición (Condition).

En el caso de elegir una división por probabilidad tan solo es necesario introducir la probabilidad para que la salida sea verdadera (True):

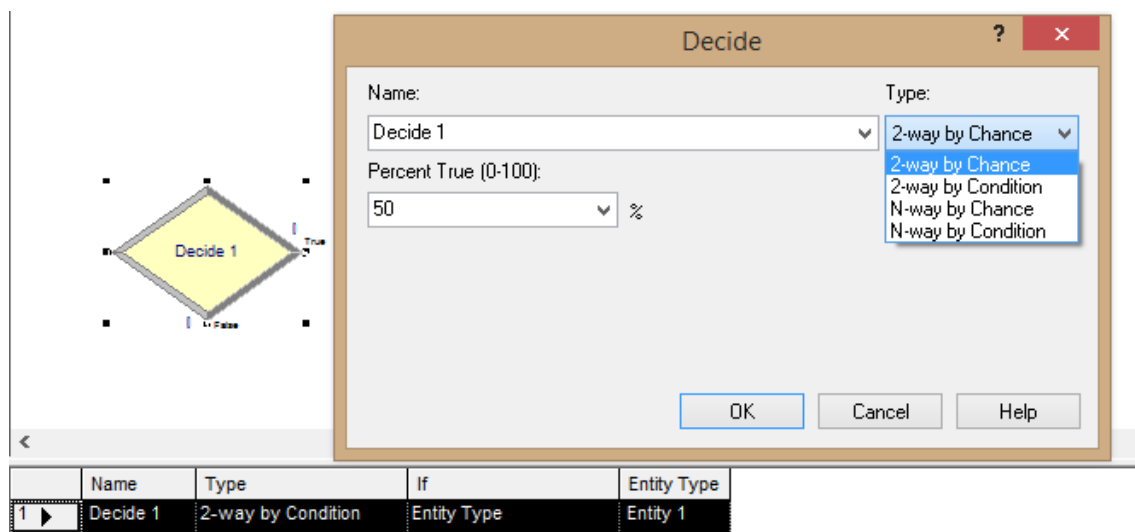


Ilustración 20: Bloque Decide, dos caminos por probabilidad Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Si se utiliza una condición para separar el flujo existen dos formas de proceder. El caso más sencillo es establecer por ejemplo que la condición sea que un atributo o bien una variable sea igual, mayor o menor a un valor. Este es el caso que se muestra en la siguiente figura:

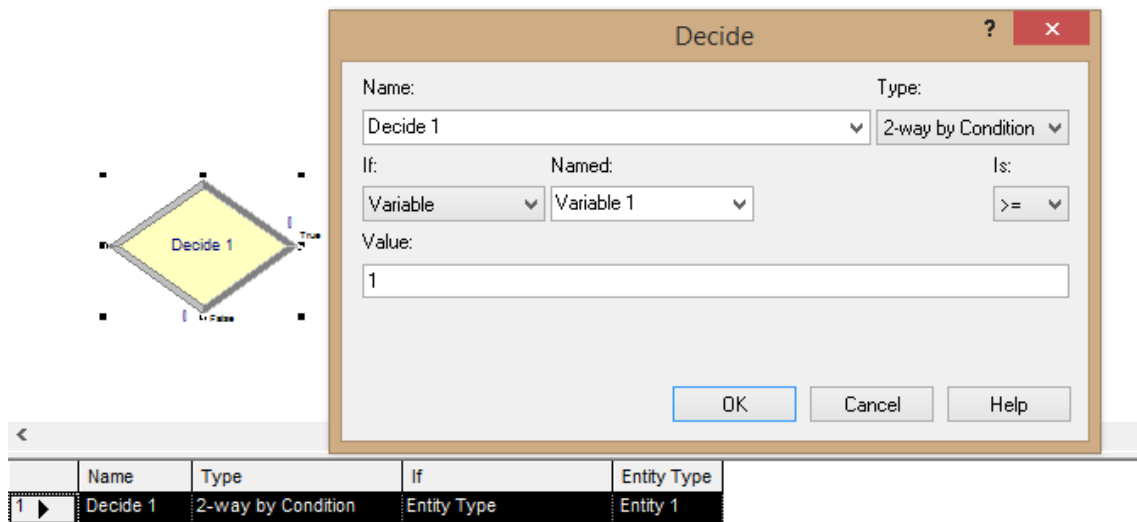


Ilustración 21: Bloque Decide, dos caminos por condición Fuente: ARENA

Por último, es posible meter una condición a través de introducir una expresión:

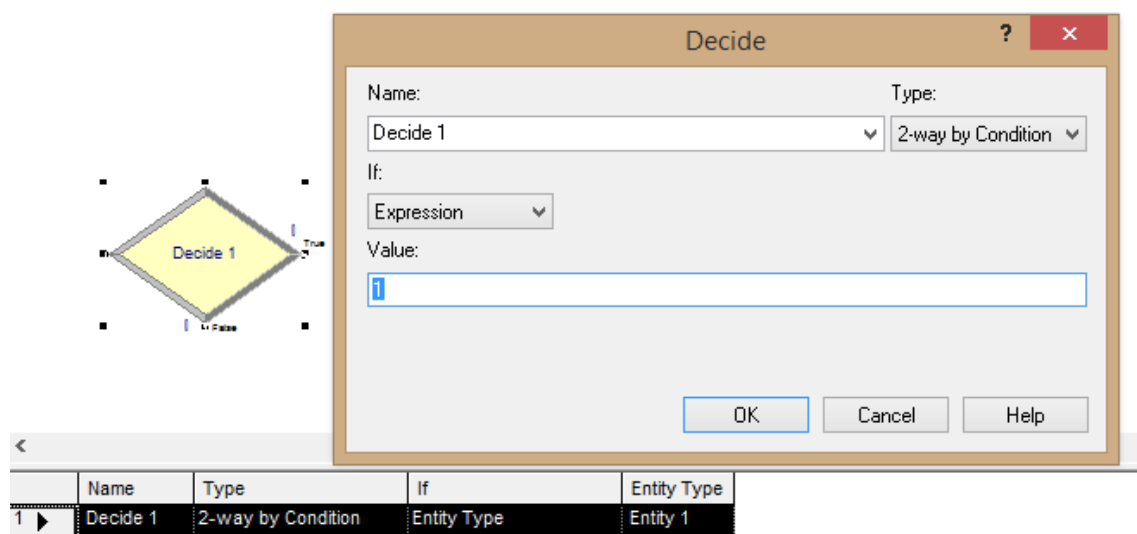


Ilustración 22: Bloque Decide, dos caminos por condición con una expresión Fuente: ARENA

### 3.4.6 Hold

Este módulo tiene la función de retener a una entidad o a varias en una cola hasta que una señal o bien una condición se cumpla. Existen tres casos, el primero de ellos se da cuando se retienen entidades hasta que una señal enviada por el módulo Signal envíe la orden de liberar. Este primer caso se muestra en la siguiente figura utilizando en el campo Type la opción Wait for Signal:

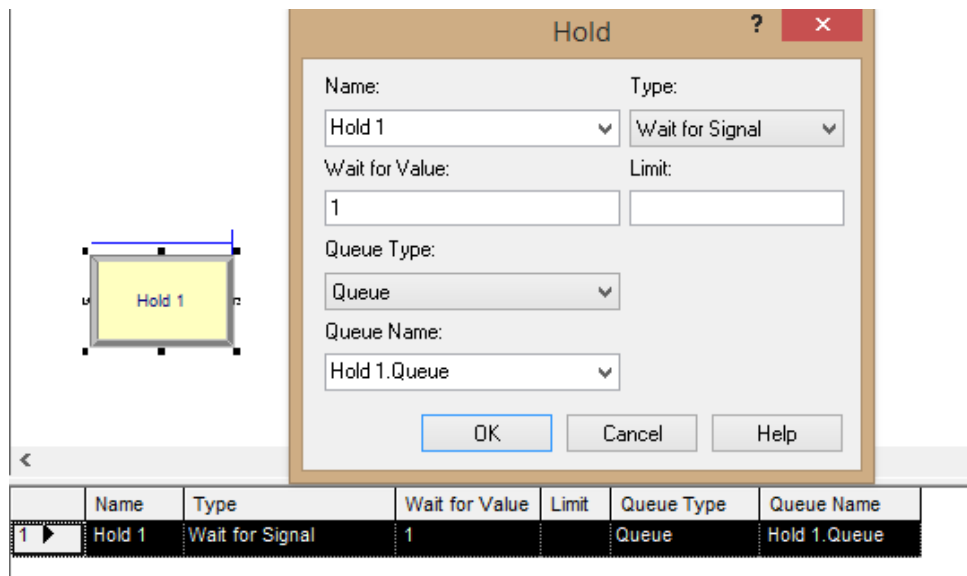


Ilustración 23: Bloque Hold - Type Wait for Signal Fuente:ARENA

La segunda función que ARENA permite utilizar con el módulo Hold es retener entidades en una cola hasta que se evalúa una condición y sólo si se cumple esta condición liberarlas. Dicha función se muestra a continuación utilizando en el campo Type la opción Scan for Condition:

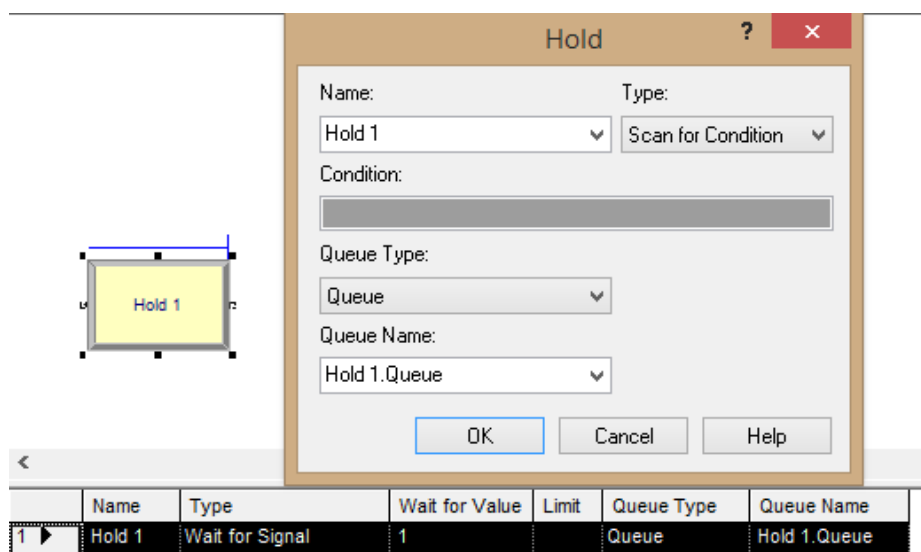


Ilustración 24: Bloque Hold – Type Scan for Condition Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

La última opción que se ofrece al usuario consiste en retener entidades indefinidamente, es decir, las entidades permaneces a la espera infinita de que sean removidas por alguna lógica externa. En este caso se debe introducir en el campo Type la opción Infinite Hold, como se muestra a continuación:

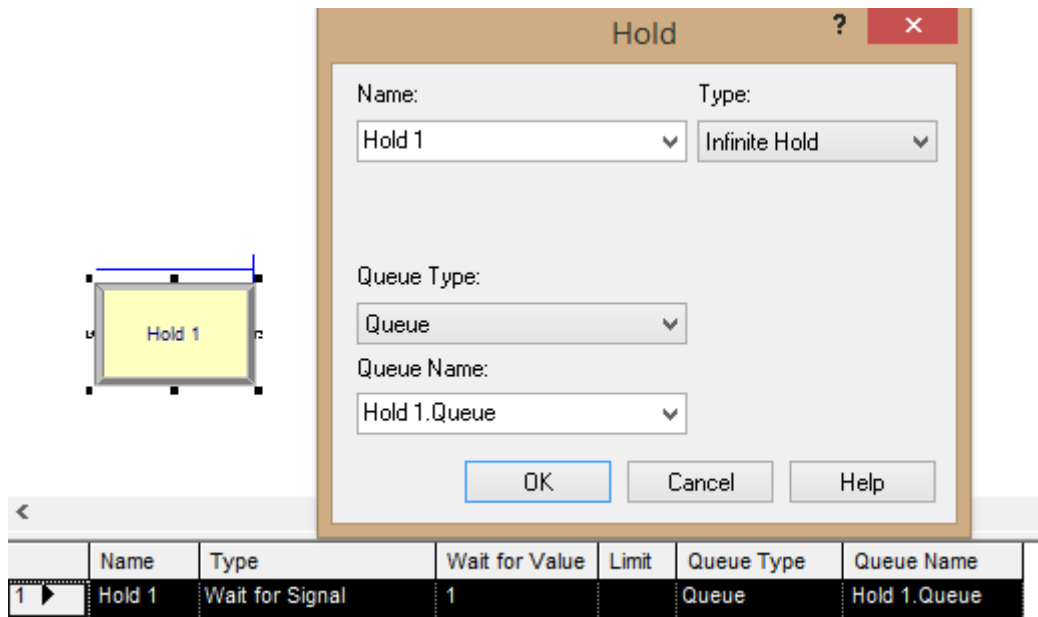


Ilustración 25: Bloque Hold – Type Infinite Hold Fuente: ARENA

## 4 MODELO DE SIMULACIÓN

### 4.1 Introducción

El modelo simulado en este proyecto se ha basado en un artículo publicado por Meredith y Akinc (2007) sobre los ambientes de trabajo MTF, en el cual se le da una nueva caracterización y estructura a este tipo de sistema productivo.

En el artículo propuesto por Meredith y Akinc (2007) se aportan algunos datos, de los cuales algunos han sido tomados como punto de partida para la simulación del modelo que se va a explicar a lo largo de este capítulo. Sin embargo, el escenario simulado no es una réplica del modelo que ellos proponen en su artículo, sino que se han realizado distintas suposiciones cambiando algunos parámetros con el objetivo final de poder adaptarlo al sector aeronáutico.

La idea y objetivo del modelo que se va a simular es investigar acerca del reto y posibilidades que ofrece un sistema productivo MTF en este sector. Para ello, se puede considerar que el ambiente de trabajo donde se va a aplicar el modelo que se va a simular es en una fábrica de pequeñas aeronaves.

En la siguiente figura se muestra el proceso de producción básico seguido. Este proceso presenta dos fases bien diferenciadas, por un lado, diez estaciones de trabajo siguiendo un enfoque MTS y por otro lado, posteriormente, diez estaciones siguiendo un concepto de producción MTO para el cual los ítems en estas estaciones pueden ser asignados a un pedido conforme las órdenes de los clientes van entrando.

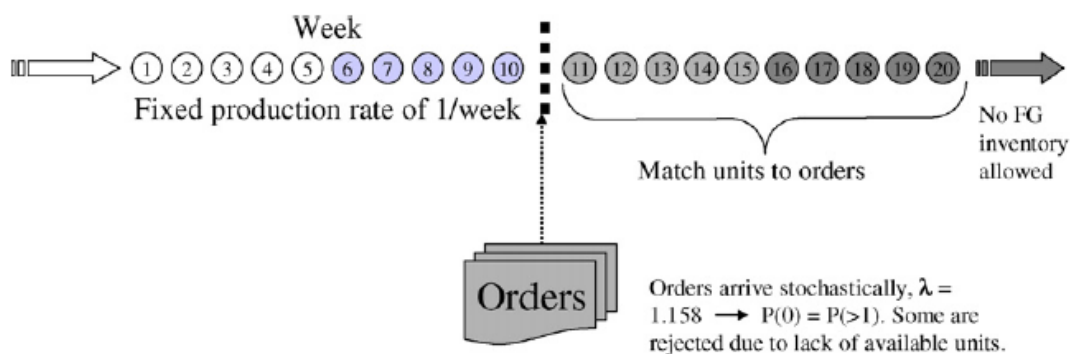


Ilustración 26: Proceso de producción simulado Fuente: artículo Meredith y Akinc (2007)

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Acorde al modelo anteriormente planteado, la idea se basaría en poder incorporar en las distintas estaciones un elemento nuevo a la aeronave. Así pues, en una semana se fabricaría la estructura de la aeronave que podría variar entre dos configuraciones distintas, por ejemplo una configuración militar donde la estructura del avión permitiese almacenar más combustible, pero reduciendo el sitio para el piloto, u otra configuración civil, para la cual tuviese capacidad para dos personas pero con menos capacidad de almacenamiento de combustible. Continuando con la siguiente semana, en la estación de trabajo para esta semana se podrían incorporar los motores, teniendo la opción de, por ejemplo, elegir entre tres modelos y progresivamente, en la siguiente estación añadir las alas a la aeronave. Sucesivamente se irían ensamblando elementos genéricos, para a partir de la semana diez, incorporar partes más específicas como los sistemas de navegación, las antenas, la pintura...



Ilustración 27: Estaciones de trabajo de una aeronave Fuente: Zonamilitar.com

El objetivo de seguir esta estructura de trabajo es poder conseguir reducir los tiempos de entrega al cliente, pues como se muestra en la figura el tiempo que se tarda en fabricar el producto es veinte semanas, pero el objetivo con este modelo es conseguir como máximo entregarlo al cliente en diez semanas.

En relación al modelo planteado en el artículo, se considera que los clientes llegan a partir de la semana diez, pudiendo asignar una unidad que se encuentre en las diez últimas estaciones de trabajo a un cliente. Siguiendo este método las diez primeras semanas seguirán un modelo de producción MTS, pero sin inventario, y las diez últimas un sistema MTO, donde cada cliente que se reciba se le intentará asignar una unidad que se encuentre en esta fase con las características que dicho cliente requiera.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Por último, como resumen de los términos que se van a utilizar se va a considerar que los ítems que se van ensamblando durante las primeras diez semanas son unidades y una vez entran en las últimas diez semanas serán unidades asignadas o no asignadas, según si tienes un cliente asignado para la entrega. La llegada de clientes se define como órdenes y a las unidades ensambladas que finalmente acaban el proceso de fabricación sin una orden asignada se les conoce como huérfanos.

### 4.2 Regla de simulación y condiciones iniciales

El propósito marcado es conseguir reducir los tiempos de entrega y a la vez que ninguna unidad quede huérfana, pues una unidad sin cliente asignado terminado el proceso de fabricación no genera beneficios a la empresa.

Para lograr estos objetivos se aplica al modelo de simulación una regla de combinación entre el cliente y las unidades que están siendo producidas. Así pues, en la asignación de las órdenes de entradas de los clientes a las unidades, esta regla da prioridad a las unidades que están siendo completadas. Dicha regla es sencilla, pues combina las órdenes conforme van llegando y asignan la orden entrante con la unidad más avanzada y completa, que no tenga una orden previamente asignada.

La asignación de un cliente a una unidad tan sólo se aplica si aparte de estar dicho ítem sin orden asociada, cumple los requisitos y propiedades que el cliente que llega reclama. De esta manera en el flujo de trabajo las combinaciones que se establecen son recordadas y de ninguna manera pueden volver a asignarse. Esta fase de asignación se realiza en las últimas diez semanas, consiguiendo así, como anteriormente se ha mencionado, reducir los tiempos de entrega.

El proceso acorde a esta regla de simulación, podría resumirse de la siguiente manera:

- Asignar la nueva orden de entrada a la unidad que se encuentre en la estación de trabajo más avanzada y además que no tenga un cliente asociado. Repetir si existen más clientes sin unidad combinada en esa semana.
- Si todas las unidades de la ventana de asignación (diez últimas estaciones de trabajo) están asignadas o bien, no cumplen los requisitos del cliente, rechazar la orden de entrada de esa semana.

A continuación, se muestra el funcionamiento básico de la regla de simulación. Se puede identificar la manera de proceder una vez un pedido entra, se empieza preguntando en la estación de trabajo número veinte, luego la diecinueve, y así sucesivamente hasta llegar a la estación once. Si no se le puede asignar a la orden una unidad en estas estaciones de trabajo, la empresa tendrá que rechazar el pedido y por lo tanto perderá el cliente.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

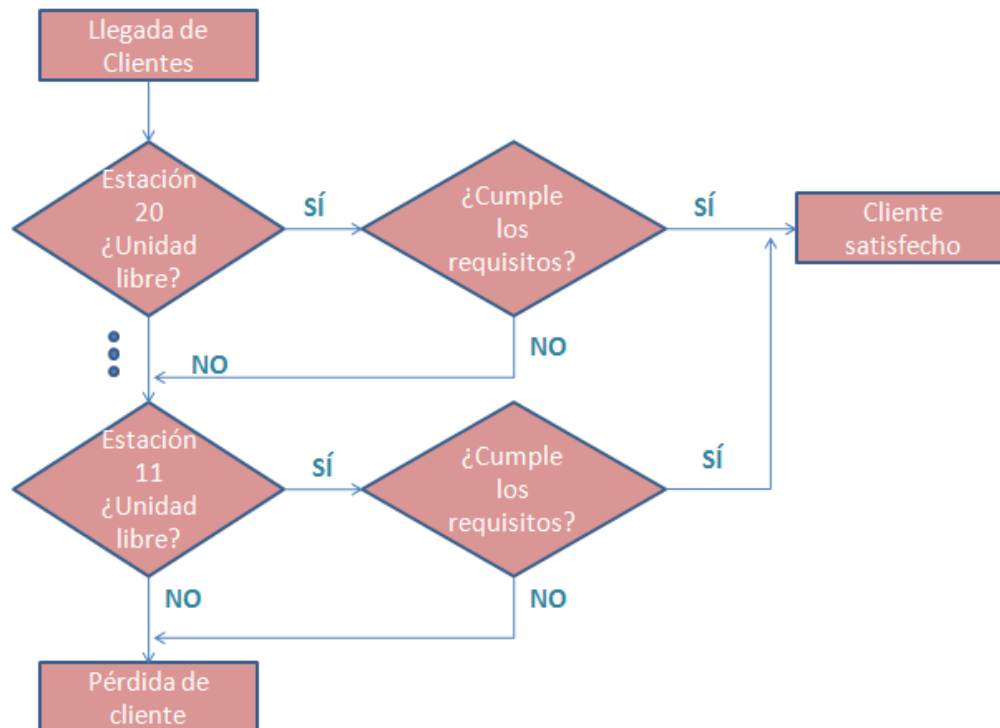


Ilustración 28: Flujo de trabajo

Es muy importante contabilizar los clientes rechazados para poder analizar las pérdidas que esto podría suponerle a una empresa. No sólo hay que estudiar cómo se reduce el tiempo de entrega, sino los factores negativos que podrían traer consigo, es decir, unidades acabadas sin un cliente a quien entregar y posibles clientes rechazados por no poder cumplir los requisitos establecidos.

Por otro lado, en cuanto a los datos de partida se ha establecido un proceso con veinte estaciones de trabajo, en las cuales cada unidad estará una semana, siendo el tiempo total de ensamblaje del producto final veinte semanas. Además, las entidades que simulan las unidades seguirán una distribución constante, creándose una cada semana.

En cuanto a los clientes, no se sigue una distribución constante como para las unidades, sino que sigue una distribución Poisson con un factor  $\lambda = 1.1458$ , valor basado en el artículo de Meredith y Akinc (2007). A esta distribución se le ha añadido la condición inicial que en ninguna semana podrá ocurrir que no llegue ningún cliente.

### 4.3 Atributos y Variables del modelo

#### 4.3.1 Atributos

Los componentes que se ensamblan en cada estación de trabajo presentan distintas opciones con diferentes configuraciones. Para cada estación se decide si incorporar una opción u otra basándose en una probabilidad. Dicha casuística está fundamentada en datos de ventas anteriores, con lo cual se prevé que componentes a la hora de ensamblar podrían ser más requeridos por el cliente.



## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Un ejemplo de dichas configuraciones podría ser:

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
<b>Estructura</b>	1			
<b>Alas</b>	1			
<b>Cola</b>	1			
<b>Morro</b>	1			
<b>Motor</b>	1			
<b>Tren de aterrizaje</b>	1			
<b>Sistema hidráulico</b>	1			
<b>Sistema eléctrico</b>	1			
<b>Sistema neumático</b>	1			
<b>Sistema de combustible</b>	1			
<b>Presurización y sistema de oxígeno</b>	0.5	0.5		
<b>Sistema antihielo</b>	0.8	0.2		
<b>Sistemas auxiliares de potencia</b>	0.8	0.2		
<b>Puertas</b>	0.7	0.3		
<b>Sistemas de contramedidas/civil</b>	0.7	0.3		
<b>Computadoras</b>	0.7	0.3		
<b>Mandos de vuelo</b>	0.6	0.2	0.2	
<b>Navegación</b>	0.5	0.3	0.1	0.1
<b>Antenas</b>	0.4	0.3	0.2	0.1
<b>Pintura</b>	0.35	0.3	0.2	0.15

Tabla 1: Posibles configuraciones

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Acorde a la tabla anterior cada entidad posee veinte atributos, los cuales se asignan antes de entrar en cada estación de trabajo siguiendo las probabilidades de las configuraciones del sistema que se va a ensamblar. En paralelo, los requerimientos exigidos por el cliente también van a seguir estas probabilidades, con lo que una vez la entidad cliente se crea se le asigna los veinte atributos con estas probabilidades, para posteriormente preguntar qué estación de trabajo posee una unidad sin asignar y con los mismos atributos que el cliente requiere.

Además de estos veinte atributos que aportan las propiedades a las unidades en producción y a los requerimientos del cliente, también en el sistema se encuentran dos atributos más. Un atributo que se le asocia a la unidad en producción si tiene un cliente asignado (asignado\_producto) y a la vez otro atributo en cuanto al cliente se le asigna el producto (asignado\_cliente). A continuación se muestra la lista de atributos creados:

Attribute - Basic Process					
	Name	Rows	Columns	Data Type	Initial Values
1	Attribute 1			Real	0 rows
2	Attribute 2			Real	0 rows
3	Attribute 3			Real	0 rows
4	Attribute 4			Real	0 rows
5	Attribute 6			Real	0 rows
6	Attribute 7			Real	0 rows
7	Attribute 8			Real	0 rows
8	Attribute 9			Real	0 rows
9	Attribute 10			Real	0 rows
10	Attribute 11			Real	0 rows
11	Attribute 12			Real	0 rows
12	Attribute 13			Real	0 rows
13	Attribute 14			Real	0 rows
14	Attribute 15			Real	0 rows
15	Attribute 16			Real	0 rows
16	Attribute 17			Real	0 rows
17	Attribute 18			Real	0 rows
18	Attribute 19			Real	0 rows
19	Attribute 20			Real	0 rows
20	asignado_cliente			Real	0 rows
21	Attribute 5			Real	0 rows
22	asignado_produc			Real	0 rows

Tabla 2: Lista de atributos Fuente: ARENA

### 4.3.2 Variables

En el modelo de simulación se han creado multitud de variables, pero las que principalmente son más relevantes han sido las creadas para poder identificar la entidad que se encuentra en cada estación de trabajo y poder así hacer la consulta si dicha entidad que se encuentra en ese momento en la estación de trabajo posee los mismos atributos que el cliente reclama.

Este tipo de variables cambian conforme una nueva entidad entra en la estación de trabajo y permite de esta manera tener siempre identificadas las entidades en cada estación de trabajo.

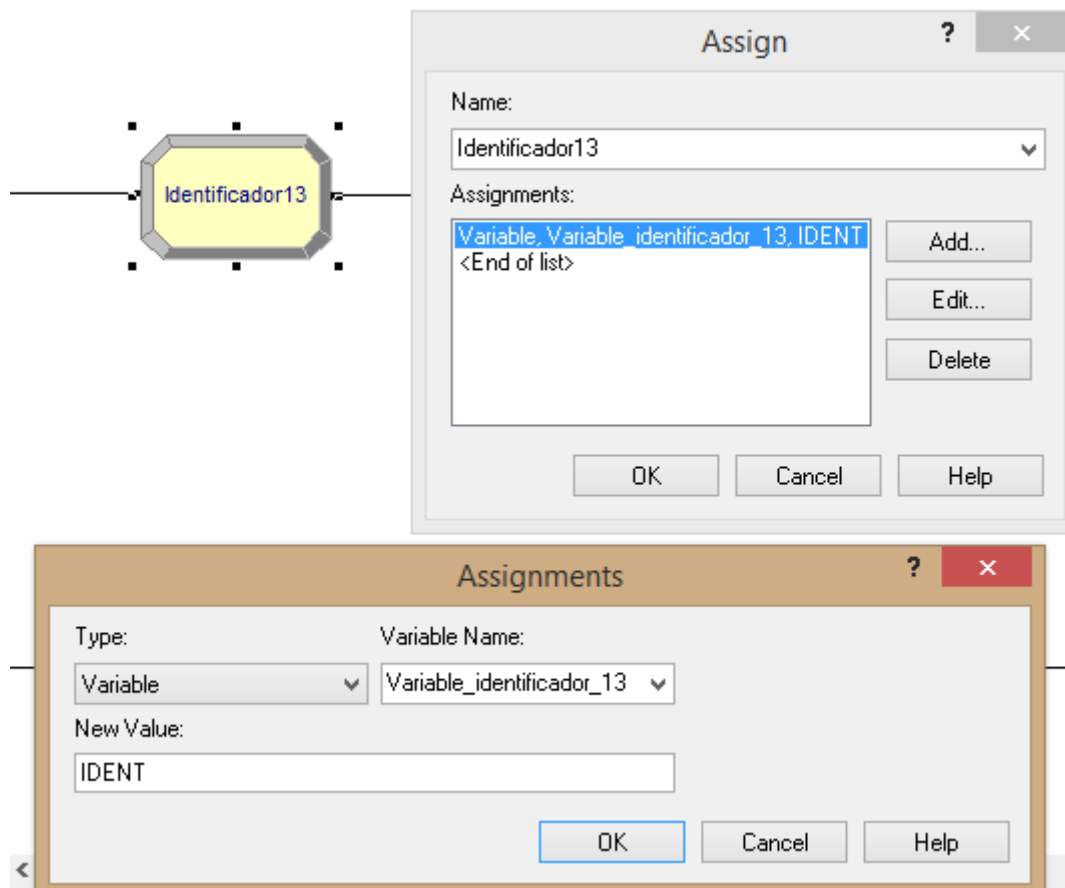


Ilustración 29: Identificadores de las entidades en las estaciones de trabajo Fuente: ARENA

Los identificadores están situaciones en las diez últimas estaciones de trabajo, pues son los puestos de trabajo en los cuales las órdenes de los clientes se pueden asignar.

#### 4.4 Modelo del proyecto en ARENA

El modelo de simulación en ARENA presenta dos flujos bien diferenciados. Por un lado, en la zona superior se simula el flujo de fabricación, y por otro, en la parte inferior, en paralelo, el flujo de clientes.

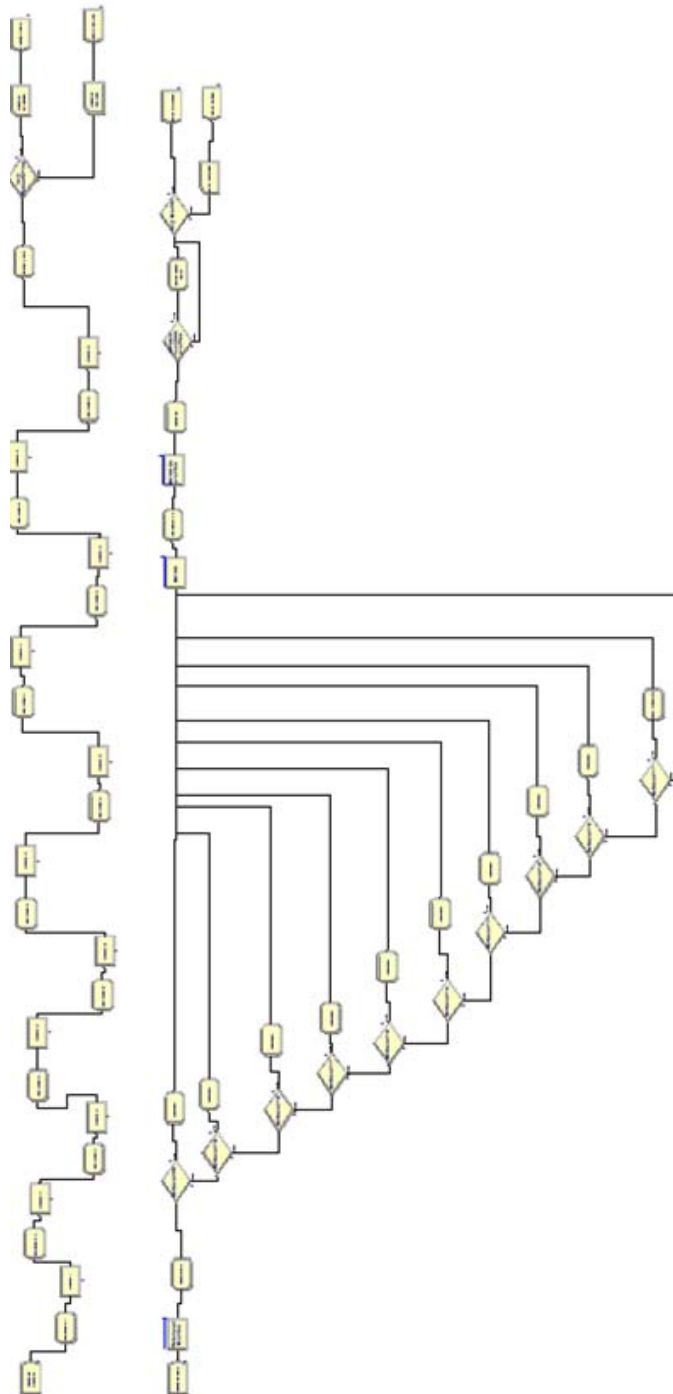


Ilustración 30: Vista general del proyecto en ARENA Fuente: ARENA

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

## 4.4.1 Flujo de fabricación

### 4.4.1.1 Creación de entidades para la fabricación

La creación de entidades que simulan el inicio del proceso de fabricación se realizan con el modulo Create con una distribución constante, lanzando una entidad cada semana.

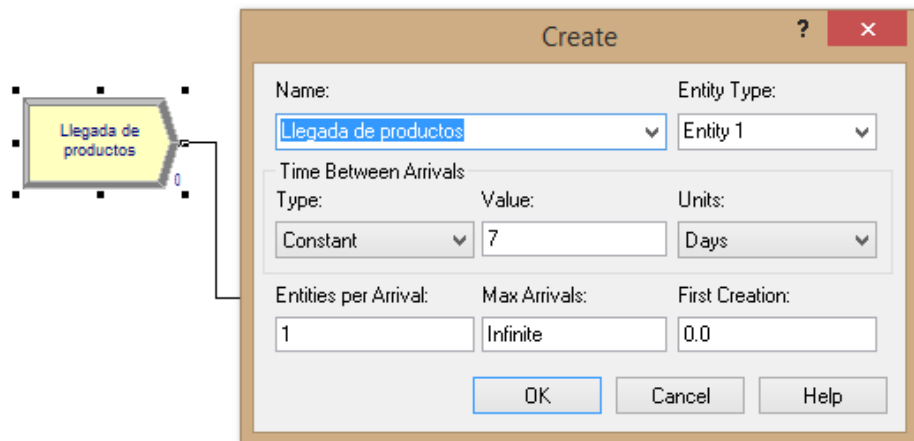


Ilustración 31: Creación de entidades para la fabricación Fuente: ARENA

### 4.4.1.2 Estaciones de trabajo

Cada estación de trabajo cuenta con un módulo Process, el cual retiene a la entidad generada previamente durante una semana.

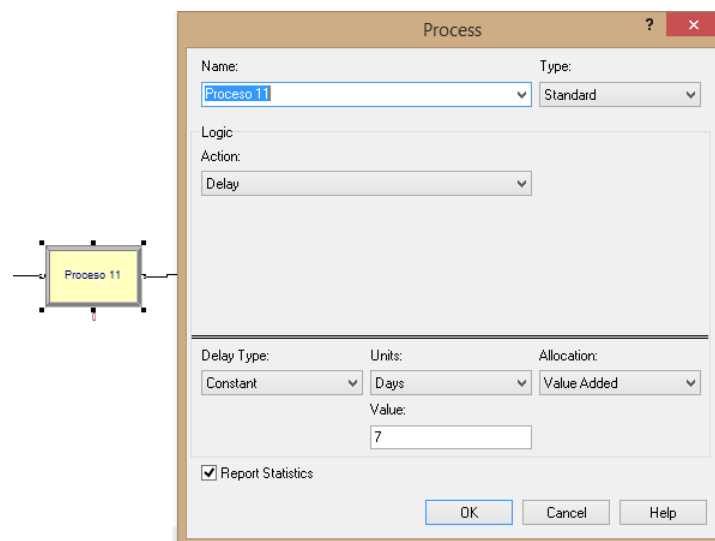


Ilustración 32: Simulación de estaciones de trabajo Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 4.4.1.3 Flujos de trabajo MTS/ MTO

Dentro del flujo de fabricación existen dos fases distintas, como anteriormente en otros apartados se ha mencionado. La primera etapa sigue un comportamiento MTS, pero sin llegar a almacenarse, y en cambio la segunda etapa, se comporta como un sistema productivo MTO.

En la siguiente ilustración se puede observar ambas etapas en el modelo de simulación, las cuales se explican detalladamente posteriormente:

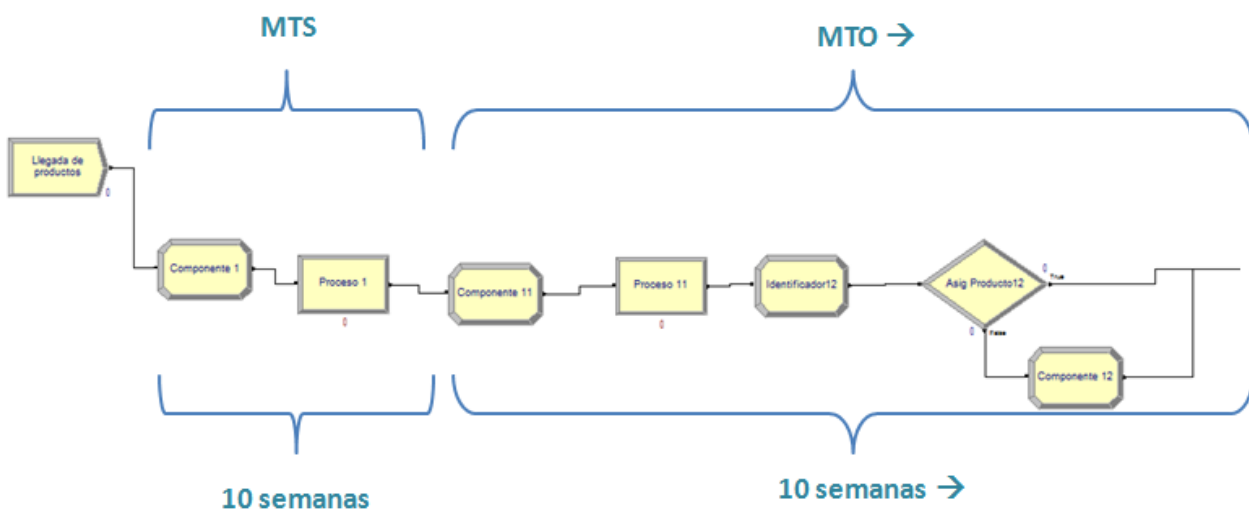


Ilustración 33: Flujos de trabajo MTS/MTO Fuente: ARENA

Se aprecia en la figura anterior las diferencias entre las dos fases de fabricación. Por un lado la etapa MTS no necesita tantos bloques pues es bastante sencilla, ya que no depende de ningún factor eterno. Por otro lado, la etapa MTO es mucho más compleja de, pues para poder ensamblar las unidades en cada estación de trabajo depende directamente de las órdenes de los clientes que van entrando.

Finalmente en la MTO se ha optado por reducir los bloques para ser más eficiente en la simulación, pero en la realidad este es flujo de trabajo que se seguiría.

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 4.4.1.4 Flujo de trabajo MTS

Las primeras diez semanas se ejecutan en esta etapa, ensamblando en cada semana un sistema nuevo, el cual se determina bajo una serie de probabilidades.

Para la simulación con ARENA de esta etapa no es necesario realizar una distinción entre las diferentes estaciones de trabajo de cada semana, pues una vez concretado los componentes que se van a ensamblar se procesan sin depender de ningún factor externo, es decir, esta fase no depende de los pedidos de los clientes que van entrando.

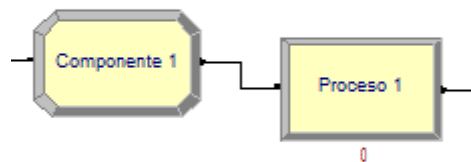


Ilustración 34: Flujo de trabajo MTS Fuente: ARENA

Como se puede apreciar se ha usado para esta fase un bloque Assign, en el cual antes de entrar en las estaciones de trabajo se determina los componentes que se procesarán durante las diez semanas.

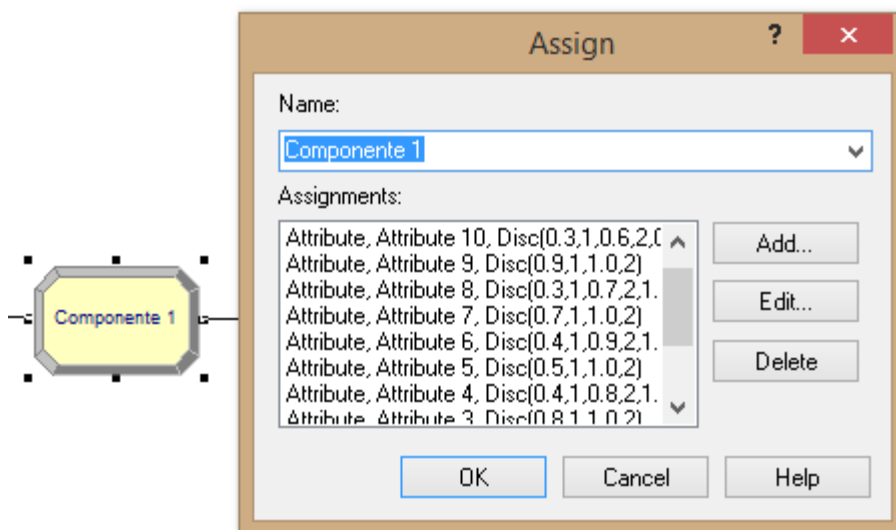


Ilustración 35: Componentes para las diez primeras semanas Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Además, el hecho de no depender de ningún factor externo permite, a la hora de la simulación, agrupar las diez estaciones de trabajo como si fuera una, contabilizando un total de diez semanas. Se emplea un bloque Process con un tiempo de procesamiento de diez semanas:

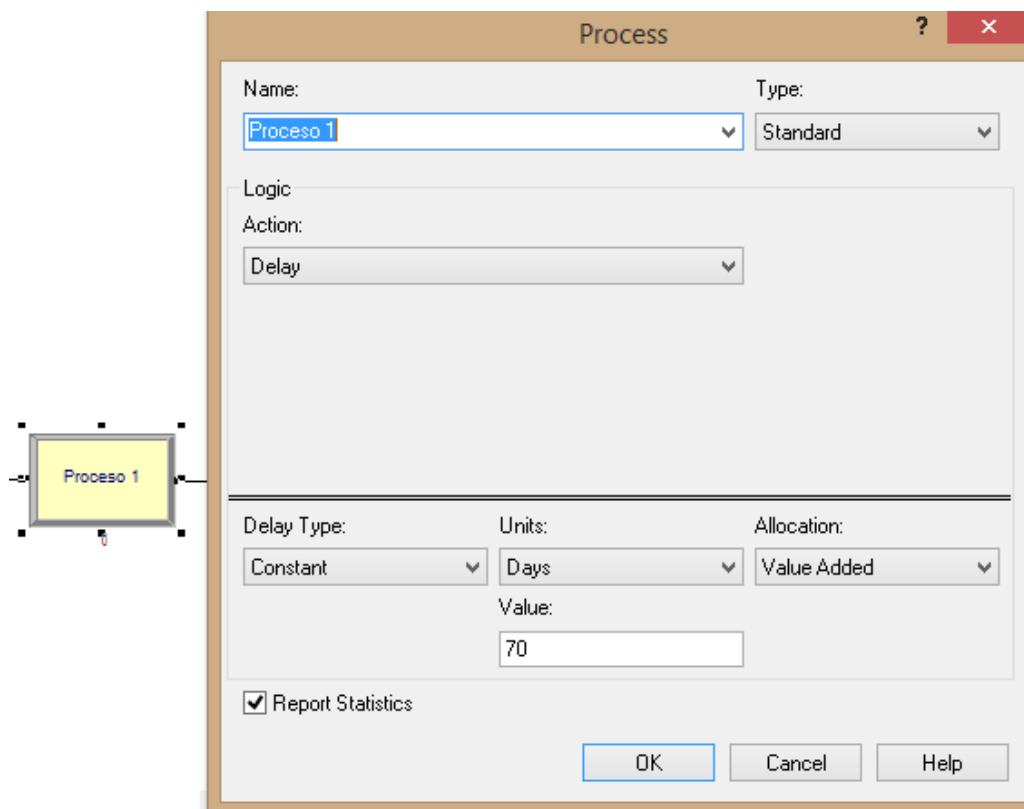


Ilustración 36: Estaciones de trabajo para las diez primeras semanas Fuente: ARENA



## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 4.4.1.5 Flujo de trabajo MTO

Las últimas diez semanas las unidades son procesadas bajo este método para el cual es necesario diferenciar cada estación de trabajo para poder localizar la entidad que se encuentre en ella. Esta etapa trabaja en paralelo con el flujo de llegada de clientes ya que resulta necesario poder asignar durante esta fase un cliente a la entidad que se está procesando.

A continuación se muestra una vista general de los bloques que cada estación de trabajo presenta:

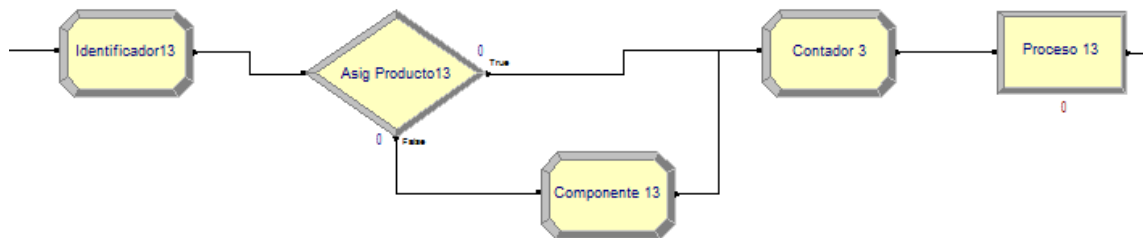


Ilustración 37: Estación de trabajo para la semana trece Fuente: ARENA

En primer lugar, antes de entrar en la estación de trabajo se identifica la entidad que va a entrar, permitiendo así conocer los componentes que posee, es decir, sus atributos. Se utiliza un módulo Assign, con una variable de identificación:

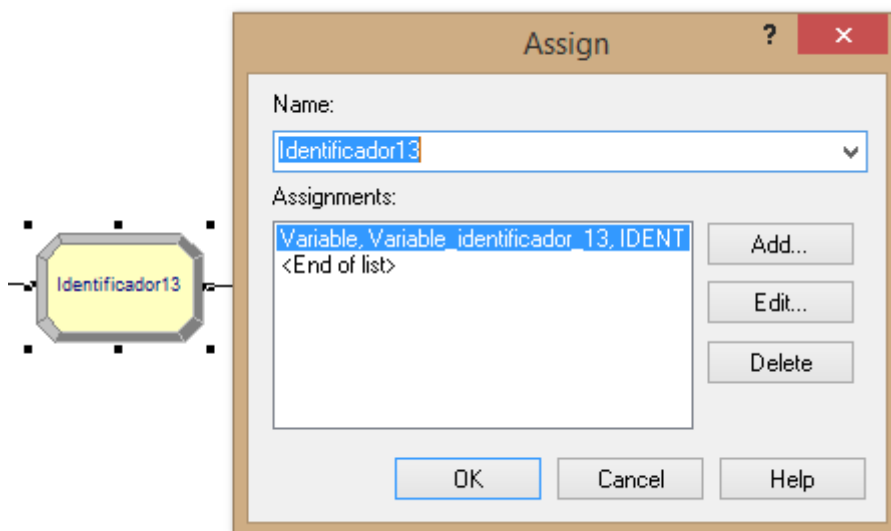


Ilustración 38: Identificador de la entidad de entrada Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Además, cada zona de trabajo contaría con un módulo Decide, el cual divide el flujo en dos salidas en función de si la entidad de entrada tiene un cliente asignado. En caso afirmativo, la entidad se procesa ensamblando los componentes requeridos por el cliente. En cambio, si la respuesta es negativa, se le asigna la configuración del nuevo sistema que se le va añadir siguiendo una probabilidad.

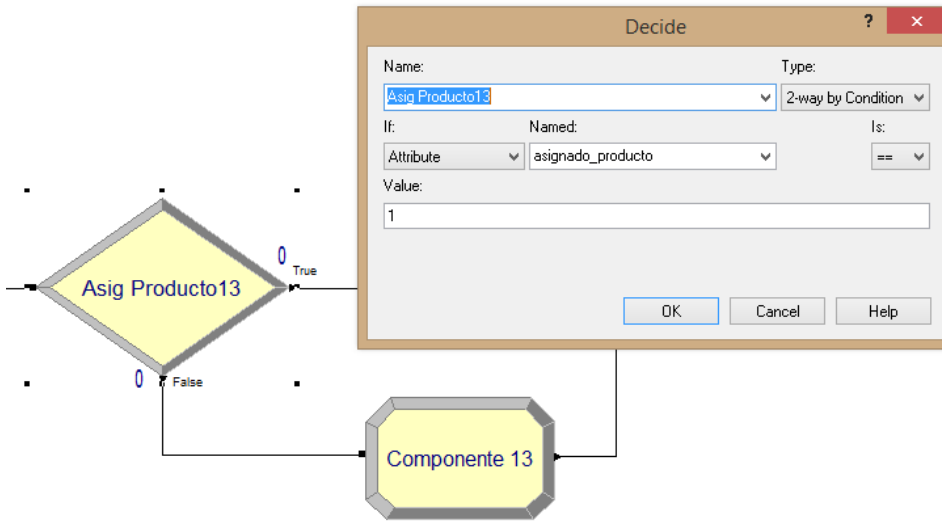


Ilustración 39: Módulo Decide para la semana trece Fuente: ARENA

Para el caso de la entidad no asignada, se añade un módulo Assign, que permite asignar la nueva configuración de la siguiente manera:

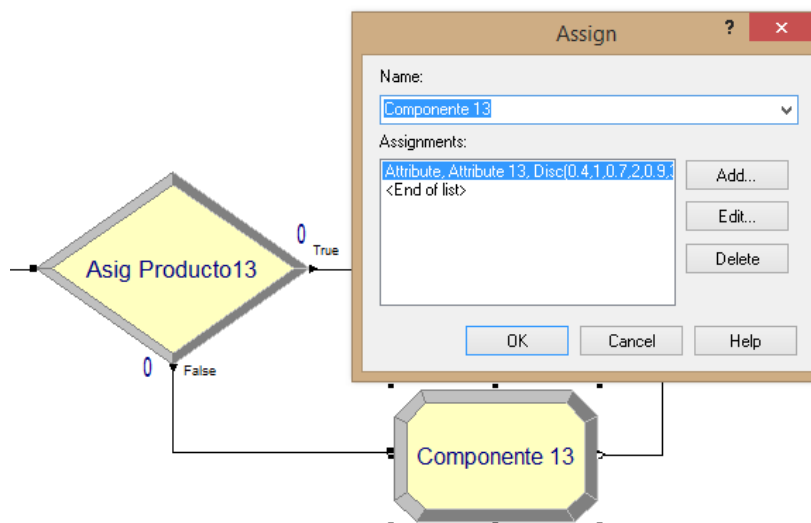


Ilustración 40: Entidad no asignada Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Antes de procesarse la variable contador de cada estación se pone a uno para asegurar que la entidad ha pasado. Esta variable se emplea en el flujo de llegada de clientes, pues permite asegurar que todas las entidades se encuentran en el módulo Process antes de empezar a asignar los clientes. Es tan sólo una herramienta para facilitar la simulación y retener en un módulo Hold a los clientes hasta que todas las entidades estén claramente identificadas.

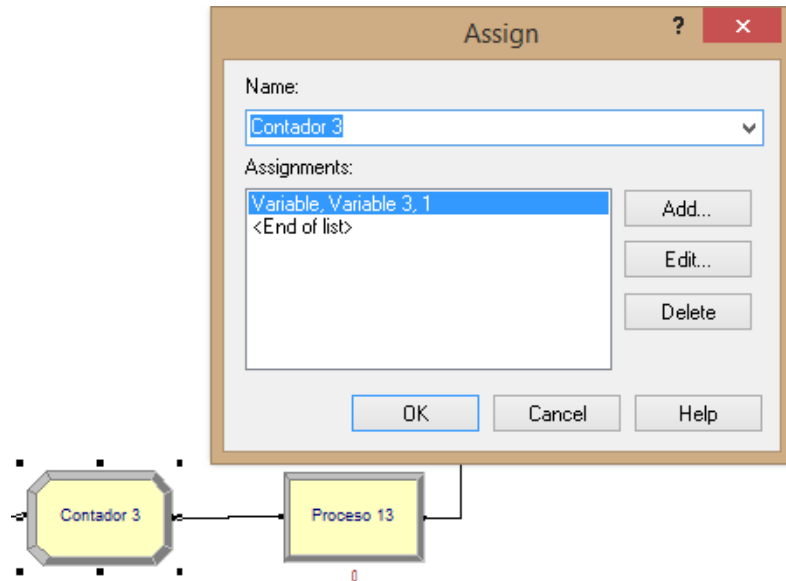


Ilustración 41: Variable contador de la semana trece Fuente: ARENA

En el último paso, la entidad se procesa acorde a los tiempos anteriormente comentados, para posteriormente entrar en una nueva estación de trabajo.

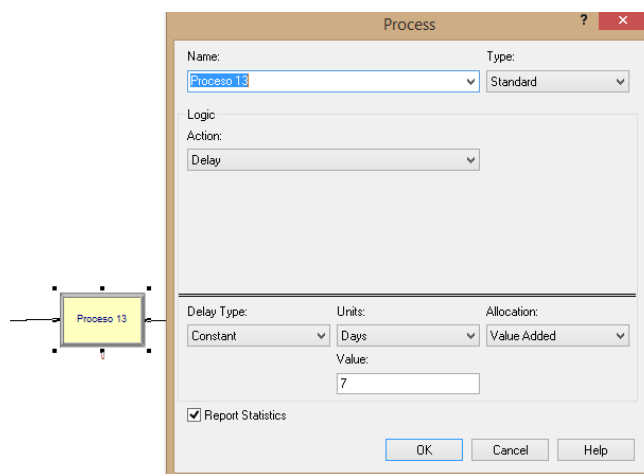


Ilustración 42: Procesado de entidad Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Finalmente, para simplificar el modelo simulado se han reducido los bloques de la siguiente forma, aunque el concepto es el anteriormente explicado.

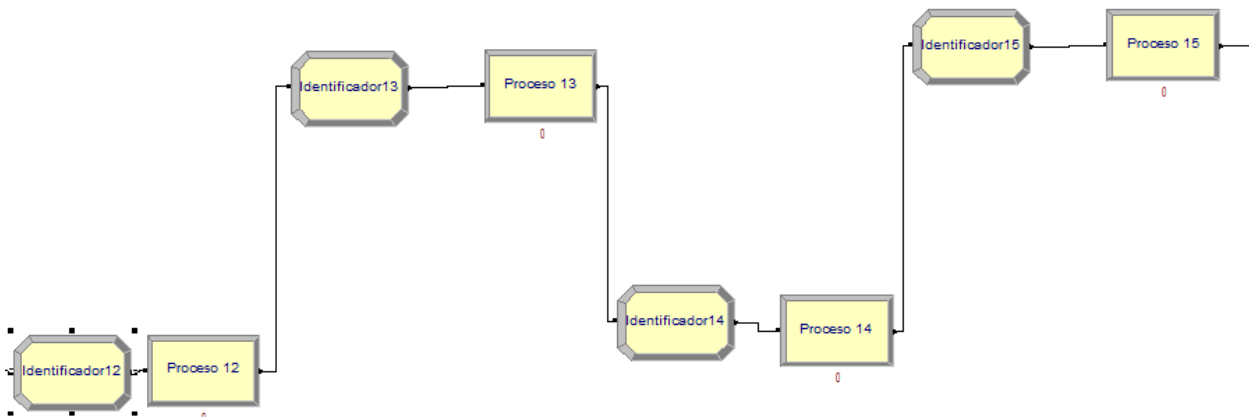


Ilustración 43: Reducción de los bloques para el flujo MTO Fuente: ARENA

### 4.4.1.6 Salida del flujo de fabricación

Una vez los distintos sistemas han sido ensamblados en las veinte estaciones de trabajo, el producto debe salir de la de la fábrica.

La entidad que abandona el flujo de trabajo puede salir de dos maneras. Una salida sería positiva para la empresa, si la entidad ha conseguido finalmente ser asignada a un cliente. La otra opción, sería totalmente negativa, pues se ha generado un producto totalmente acabado sin un cliente a quien entregar.

Para poder dividir esta salida, se hace uso del módulo Decide y se pregunta a la entidad si tiene asignado un cliente.

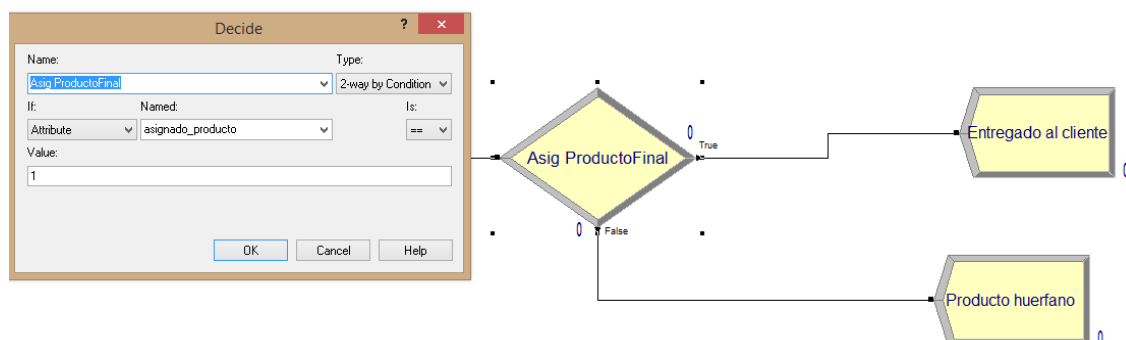


Ilustración 44: Posibles salidas del producto Fuente: ARENA

#### 4.4.2 Flujo de llegada de clientes

El flujo de simulación de los clientes presenta distintos bloques, muchos de ellos empleados únicamente para facilitar la simulación. En este apartado se explicarán únicamente aquellos que ayudan a entender mejor el modelo.

En primer lugar, la llegada de clientes se genera en función de una variable que sigue una distribución de Poisson, dicho valor proporciona la cantidad de clientes que llegan en una semana. Como anteriormente se ha mencionado en las condiciones iniciales, este valor debe ser distinto de cero.

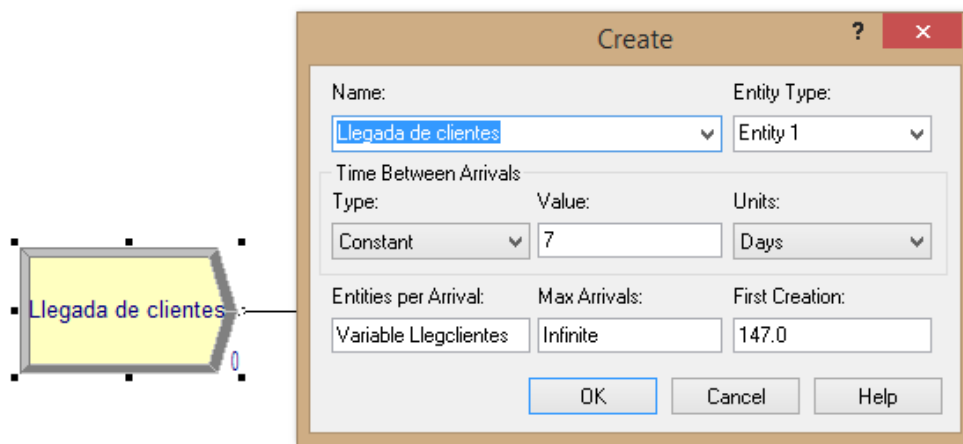


Ilustración 45: Llegada de clientes Fuente: ARENA

Además, como medida de seguridad para la simulación, se ha creado un bloque Hold que permite asegurar que cada entidad en cada estación de trabajo está identificada antes de proceder a asignar la orden del cliente a una unidad. Para ello, todos los contadores de las distintas zonas de trabajo deben estar a uno.

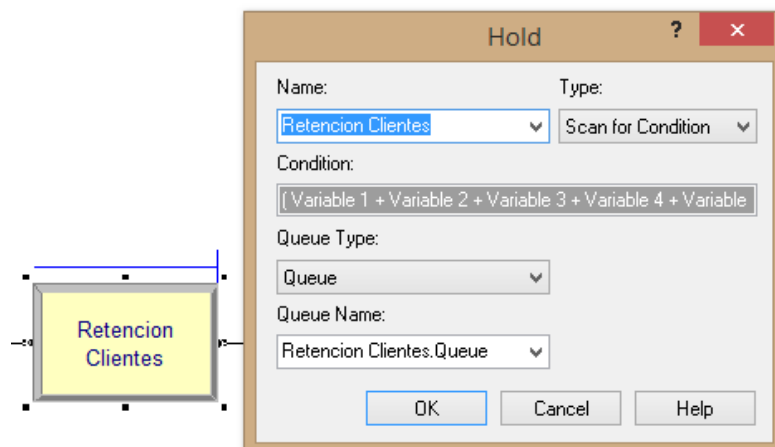


Ilustración 46: Retención de clientes Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Por otro lado, acorde a cómo han sido asignadas las propiedades de los sistemas a las entidades, se procede a descubrir los requerimientos que los clientes que llegan van a exigir. Se emplea un módulo Assign con veinte atributos, con las mismas probabilidades de las distintas configuraciones que las entidades.

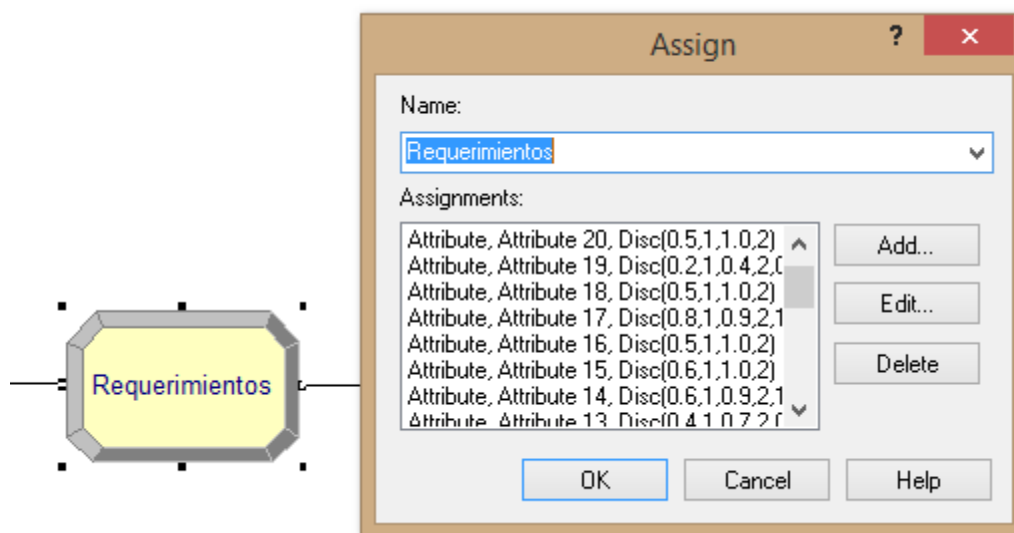


Ilustración 47: Requerimientos de los clientes Fuente: ARENA

Una vez se conozcan los requerimientos del cliente se procede a averiguar si existe alguna estación de trabajo que posea una unidad que pueda llegar a cumplir los requisitos exigidos. Para ello, siguiendo la regla de simulación de asignar el cliente al producto más avanzado, se comienza preguntando a la última estación de trabajo si la entidad con la que está trabajando presenta las propiedades buscadas, y en caso negativo, se continúa hasta la estación once.

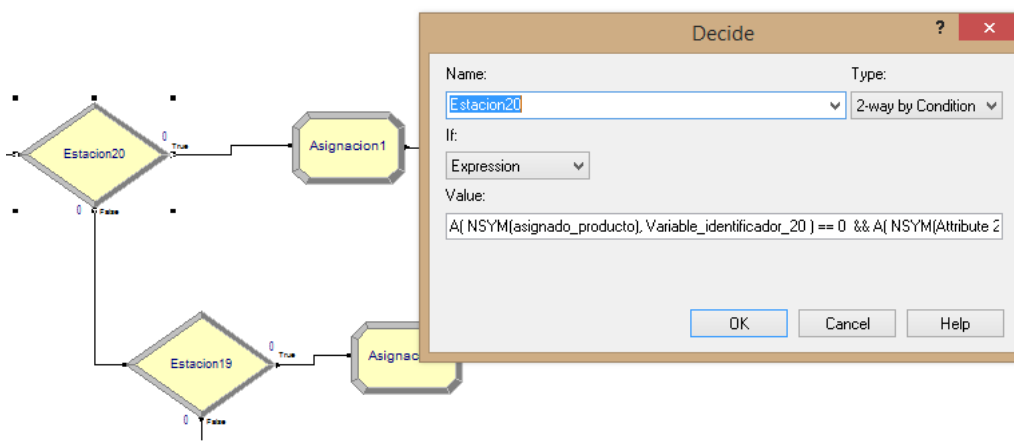


Ilustración 48: Búsqueda del producto Fuente: ARENA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

En caso afirmativo, para el cual exista un producto sin asignar que cumpla las propiedades requeridas por el cliente, se procede tanto a asignar el producto al cliente, como a identificar al cliente como satisfecho.

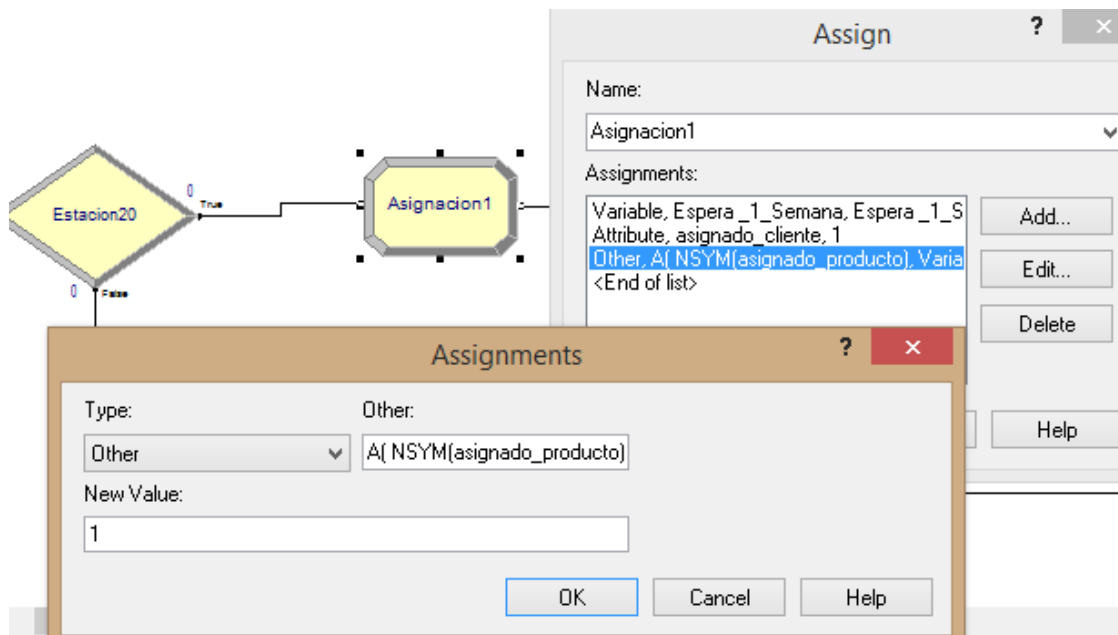


Ilustración 49: Asignación del cliente y producto Fuente: ARENA

Por último, antes de salir del modelo se le pregunta al cliente si ha quedado satisfecho, es decir, si se le va entregar el producto requerido en menos de diez semanas.

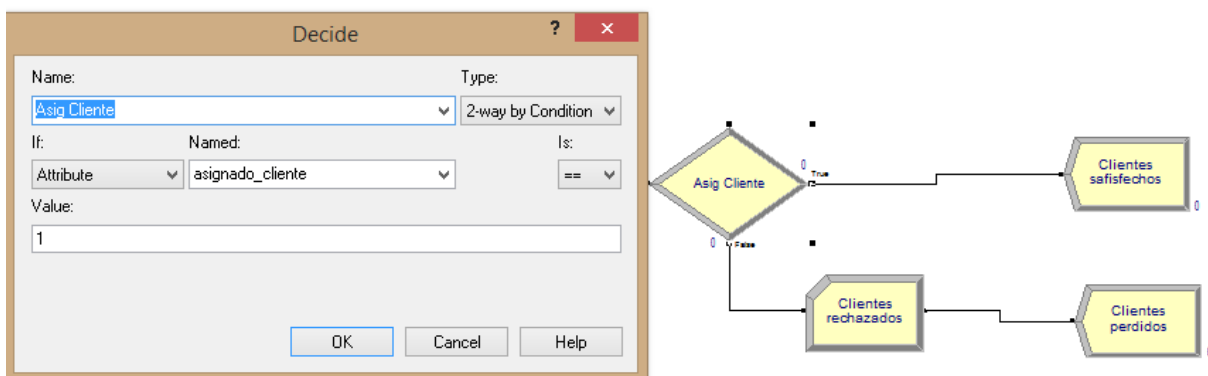


Ilustración 50: Salida de clientes Fuente: ARENA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST



## 5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 5.1 Introducción

En los siguientes apartados se van a mostrar los resultados obtenidos mediante tablas y gráficas, que van a permitir realizar comparativas y visualizar mejor los datos extraídos. Finalmente, una vez discutido los resultados conseguidos, se estará en disposición de sacar conclusiones y aportar futuras líneas de estudio.

### 5.2 Modelo Meredith y Akinc (2007)

Este modelo simulado sigue todos los parámetros comentados previamente, tanto la regla de secuenciación como el valor  $\lambda = 1.1458$  dado en el artículo de Meredith y Akinc (2007). Siguiendo estos datos, se va realizar un primer estudio con las posibles configuraciones que se ensamblan en las distintas estaciones de trabajo.

En una primera simulación, los diez primeros componentes tendrán una sólo configuración y en la segunda simulación, los nueve primeros presentarán una sola configuración, y así sucesivamente. Estos cambios de posibles configuraciones podrán ser apreciados en la tabla de atributos.

#### 5.2.1 Modelo con 10 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Componente 1	1			
Componente 2	1			
Componente 3	1			
Componente 4	1			
Componente 5	1			
Componente 6	1			
Componente 7	1			
Componente 8	1			
Componente 9	1			
Componente 10	1			
Componente 11	0,5	0,5		
Componente 12	0,8	0,2		
Componente 13	0,8	0,2		
Componente 14	0,7	0,3		
Componente 15	0,7	0,3		
Componente 16	0,7	0,3		
Componente 17	0,6	0,2	0,2	
Componente 18	0,5	0,3	0,1	0,1
Componente 19	0,4	0,3	0,2	0,1
Componente 20	0,35	0,3	0,2	0,15

Tabla 3: Atributos del Modelo con 10 Configuraciones

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

$\lambda = 1,1458$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	820	706	201
Simulación 2	812	651	209
Simulación 3	796	730	225
Simulación 4	835	641	186
Simulación 5	827	672	194
Simulación 6	814	630	207
Simulación 7	824	689	197
Simulación 8	826	623	195
Simulación 9	836	645	185
Simulación 10	811	692	210
<b>Promedio</b>	<b>820,1</b>	<b>667,9</b>	<b>200,9</b>

Tabla 4: Resultados Modelo con 10 Configuraciones

En la tabla anterior, se puede observar que el número de clientes satisfechos, a los cuales el producto ha sido entregado, en comparación con el número de productos huérfanos es bastante mayor. Sin embargo, la empresa debería considerar que el número de clientes insatisfechos asciende al 44% del total de clientes recibidos.

$\lambda = 1,1458$	Espera 10	Espera 9	Espera 8	Espera 7	Espera 6	Espera 5	Espera 4	Espera 3	Espera 2	Espera 1
Sim.1	483	184	83	45	19	6	2	4	1	0
Sim.2	463	197	86	37	22	10	3	2	0	0
Sim.3	467	190	79	30	18	11	7	0	0	0
Sim.4	492	194	92	39	18	5	1	0	0	0
Sim.5	447	217	105	32	21	9	1	1	1	0
Sim.6	440	226	81	40	21	7	3	1	0	0
Sim.7	458	207	109	38	14	3	1	1	1	0
Sim.8	499	202	74	27	20	10	0	0	0	0
Sim.9	459	191	108	45	24	13	2	0	0	0
Sim.10	460	187	85	41	29	9	2	3	0	0
<b>Promedio</b>	<b>56,92%</b>	<b>24,33%</b>	<b>11,00%</b>	<b>4,56%</b>	<b>2,51%</b>	<b>1,01%</b>	<b>0,27%</b>	<b>0,15%</b>	<b>0,04%</b>	<b>0,00%</b>

Tabla 5: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 10 Configuraciones

Se observa en la tabla anterior, que en un modelo con posibles configuraciones, para los últimos diez componentes, el tiempo de espera que tienen los clientes para recibir el producto es en más de la mitad de los casos diez semanas. El resto de clientes esperan entre nueve y ocho semanas, pues resulta casi imposible bajar de las ocho semanas de espera. A continuación se muestra una gráfica, en la que se puede apreciar este comportamiento de manera más sencilla:

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

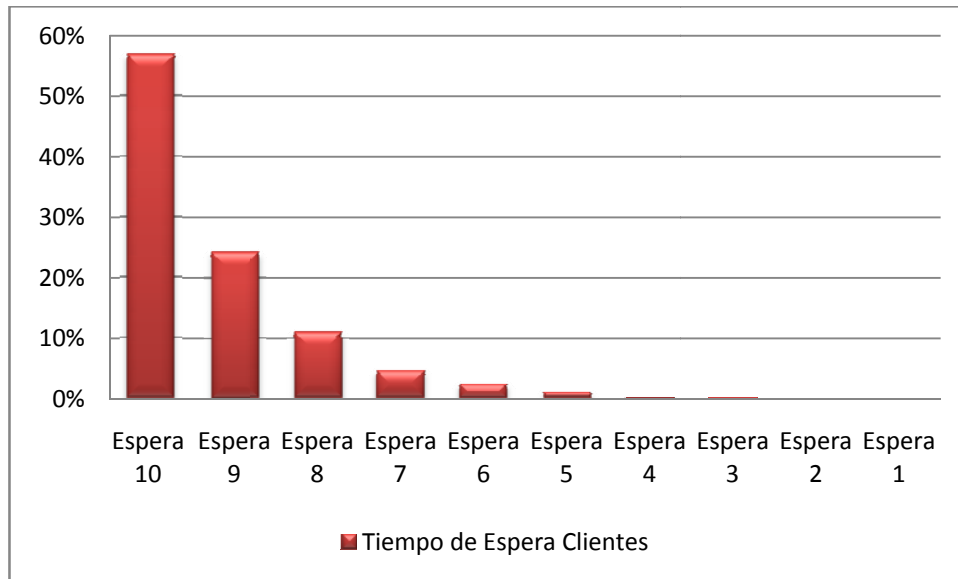


Ilustración 51: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 10 Configuraciones

5.2.2 Modelo con 11 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Componente 1	1			
Componente 2	1			
Componente 3	1			
Componente 4	1			
Componente 5	1			
Componente 6	1			
Componente 7	1			
Componente 8	1			
Componente 9	1			
Componente 10	0,8	0,2		
Componente 11	0,5	0,5		
Componente 12	0,8	0,2		
Componente 13	0,8	0,2		
Componente 14	0,7	0,3		
Componente 15	0,7	0,3		
Componente 16	0,7	0,3		
Componente 17	0,6	0,2	0,2	
Componente 18	0,5	0,3	0,1	0,1
Componente 19	0,4	0,3	0,2	0,1
Componente 20	0,35	0,3	0,2	0,15

Tabla 6: Atributos del Modelo con 11 Configuraciones

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

$\lambda = 1,1458$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	634	830	387
Simulación 2	660	821	361
Simulación 3	627	811	394
Simulación 4	649	841	372
Simulación 5	673	799	348
Simulación 6	648	846	373
Simulación 7	683	823	338
Simulación 8	666	826	335
Simulación 9	675	786	346
Simulación 10	655	835	366
<b>Promedio</b>	<b>657</b>	<b>821,8</b>	<b>362</b>

Tabla 7: Resultados Modelo con 11 Configuraciones

Como se puede deducir de la tabla anterior, en este caso, el número de productos entregados al cliente va descendiendo conforme se aumenta las configuraciones de los componentes a instalar. De esta manera, los productos huérfanos suponen un número considerable que la empresa debería tener muy presente. Además, entre los clientes que llegan, son más los pedidos rechazados que las órdenes aceptadas.

$\lambda = 1,1458$	Espera 10	Espera 9	Espera 8	Espera 7	Espera 6	Espera 5	Espera 4	Espera 3	Espera 2	Espera 1
Sim. 1	399	145	90	28	24	11	2	2	1	0
Sim. 2	345	156	81	52	20	11	2	1	0	0
Sim. 3	309	168	82	41	19	7	5	0	1	0
Sim. 4	345	151	83	42	21	9	4	0	0	0
Sim. 5	340	176	85	41	20	13	4	0	1	0
Sim. 6	33	155	88	39	23	8	5	2	0	0
Sim. 7	346	182	79	43	21	11	3	2	1	0
Sim. 8	350	163	88	44	13	11	1	1	1	0
Sim. 9	323	168	85	48	32	16	4	1	1	0
Sim. 10	345	153	96	27	2.4	12	3	2	0	0
<b>Promedio</b>	<b>47,72%</b>	<b>24,61%</b>	<b>13,04%</b>	<b>6,16%</b>	<b>3,3.0%</b>	<b>1,66%</b>	<b>0,50%</b>	<b>0,17%</b>	<b>0,09%</b>	<b>0,00%</b>

Tabla 8: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 11 Configuraciones

Al igual que ocurría para el modelo con diez configuraciones, la mayoría de clientes esperarán diez semanas. Sin embargo, se aprecia una leve mejoría, pues disminuye el número de clientes que esperan diez semanas y aumenta la cantidad de clientes que esperan entre nueve y siete semanas. A continuación se muestra una gráfica, en la que se puede apreciar este comportamiento de manera más sencilla:

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

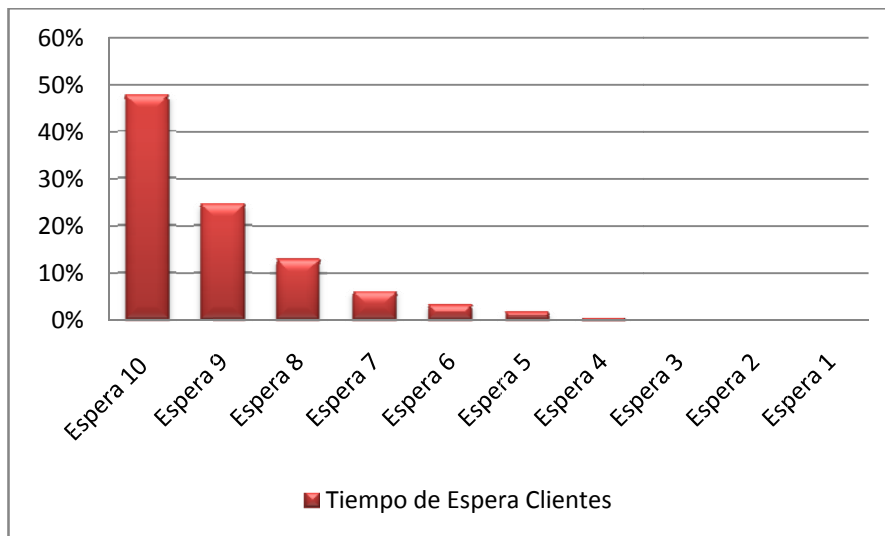


Ilustración 52: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 11 Configuraciones

### 5.2.3 Modelo con 12 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Componente 1	1			
Componente 2	1			
Componente 3	1			
Componente 4	1			
Componente 5	1			
Componente 6	1			
Componente 7	1			
Componente 8	1			
Componente 9	0,9	0,1		
Componente 10	0,8	0,2		
Componente 11	0,5	0,5		
Componente 12	0,8	0,2		
Componente 13	0,8	0,2		
Componente 14	0,7	0,3		
Componente 15	0,7	0,3		
Componente 16	0,7	0,3		
Componente 17	0,6	0,2	0,2	
Componente 18	0,5	0,3	0,1	0,1
Componente 19	0,4	0,3	0,2	0,1
Componente 20	0,35	0,3	0,2	0,15

Tabla 9: Atributos del Modelo con 12 Configuraciones

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

$\lambda = 1,1458$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	574	921	447
Simulación 2	575	895	446
Simulación 3	586	881	435
Simulación 4	594	852	427
Simulación 5	584	898	437
Simulación 6	571	961	450
Simulación 7	581	934	440
Simulación 8	562	913	459
Simulación 9	563	907	458
Simulación 10	556	908	455
<b>Promedio</b>	<b>574,6</b>	<b>907</b>	<b>445,4</b>

Tabla 10: Resultados Modelo con 12 Configuraciones

En la tabla anterior, se observa que para el modelo con doce configuraciones el número de productos huérfanos se hace cada vez mayor, acercándose al número de productos entregados. Este hecho supone que la empresa soporte una cantidad bastante considerable de productos acabados sin cliente asignado. Por otro lado, los clientes insatisfechos ascienden al 61% de los clientes recibidos.

$\lambda = 1,1458$	Espera 10	Espera 9	Espera 8	Espera 7	Espera 6	Espera 5	Espera 4	Espera 3	Espera 2	Espera 1
Sim. 1	313	133	75	29	14	12	2	1	0	0
Sim. 2	293	136	76	34	23	11	5	1	0	0
Sim. 3	268	175	80	36	23	6	0	2	0	0
Sim. 4	286	144	95	36	23	9	5	1	0	0
Sim. 5	286	164	73	38	19	7	2	0	0	0
Sim. 6	287	169	64	28	18	7	2	2	0	0
Sim. 7	281	153	63	53	15	11	7	2	0	0
Sim. 8	267	147	79	39	23	8	3	0	2	0
Sim. 9	300	128	72	30	25	11	3	0	0	0
Sim. 10	294	122	86	34	19	11	4	0	0	0
<b>Promedio</b>	<b>50,03%</b>	<b>25,60%</b>	<b>13,28%</b>	<b>6,21%</b>	<b>3,52%</b>	<b>1,62%</b>	<b>0,57%</b>	<b>0,16%</b>	<b>0,03%</b>	<b>0,00%</b>

Tabla 11: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 12 Configuraciones

Como se puede apreciar, los tiempos de espera del cliente siguen estando generalmente comprendidos entre diez y siete semanas, teniendo que esperar la mayoría de clientes diez semanas. A continuación se muestra una gráfica, en la que se puede apreciar este comportamiento de manera más sencilla:

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

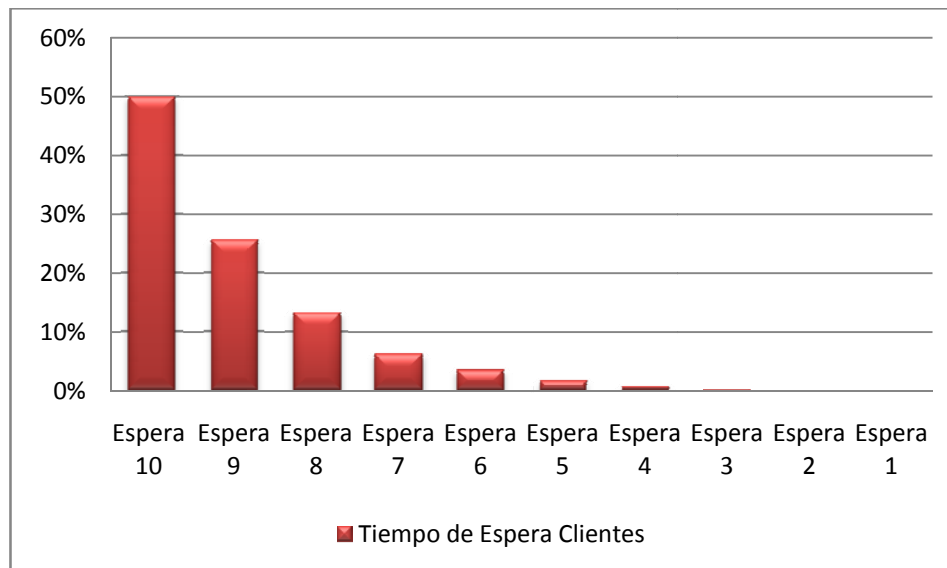


Ilustración 53: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 12 Configuraciones

#### 5.2.4 Modelo con 13 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Componente 1	1			
Componente 2	1			
Componente 3	1			
Componente 4	1			
Componente 5	1			
Componente 6	1			
Componente 7	1			
Componente 8	0,75	0,25		
Componente 9	0,9	0,1		
Componente 10	0,8	0,2		
Componente 11	0,5	0,5		
Componente 12	0,8	0,2		
Componente 13	0,8	0,2		
Componente 14	0,7	0,3		
Componente 15	0,7	0,3		
Componente 16	0,7	0,3		
Componente 17	0,6	0,2	0,2	
Componente 18	0,5	0,3	0,1	0,1
Componente 19	0,4	0,3	0,2	0,1
Componente 20	0,35	0,3	0,2	0,15

Tabla 12: Atributos del Modelo con 13 Configuraciones

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

$\lambda = 1,1458$	Clientes Satisfechos	Clientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	438	1080	583
Simulación 2	384	1074	637
Simulación 3	397	1079	624
Simulación 4	382	1151	639
Simulación 5	423	1035	598
Simulación 6	443	1038	578
Simulación 7	407	1029	614
Simulación 8	419	1033	602
Simulación 9	419	1079	602
Simulación 10	444	1074	577
<b>Promedio</b>	<b>415,6</b>	<b>1067,2</b>	<b>605,4</b>

Tabla 13: Resultados Modelo con 13 Configuraciones

Como se puede deducir de la tabla anterior, en este caso el número de productos huérfanos generados supera la cantidad de productos entregados. Además, el número de clientes insatisfechos supone un 72% del total. Estos dos inconvenientes son problemas que la empresa debe asumir si quiere ofrecer un servicio al cliente con la opción del modelo de trece configuraciones.

$\lambda = 1,1458$	Espera 10	Espera 9	Espera 8	Espera 7	Espera 6	Espera 5	Espera 4	Espera 3	Espera 2	Espera 1
Sim. 1	199	109	63	30	24	6	6	2	0	0
Sim. 2	189	111	41	25	9	8	4	0	0	0
Sim. 3	185	105	56	30	11	6	4	0	2	1
Sim. 4	165	99	56	35	18	8	2	2	1	0
Sim. 5	182	119	60	32	20	9	6	0	0	0
Sim. 6	225	109	55	30	18	6	1	0	0	0
Sim. 7	200	109	48	30	8	9	4	0	0	0
Sim. 8	168	131	65	30	12	11	2	2	1	0
Sim. 9	193	115	54	27	21	5	3	3	0	0
Sim. 10	201	115	63	37	17	9	3	2	0	0
<b>Promedio</b>	<b>45,89%</b>	<b>27,00%</b>	<b>13,50%</b>	<b>7,36%</b>	<b>3,80%</b>	<b>1,85%</b>	<b>0,84%</b>	<b>0,26%</b>	<b>0,10%</b>	<b>0,02%</b>

Tabla 14: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 13 Configuraciones

En este caso los tiempos de entrega del producto mejoran levemente, aumentado principalmente la cantidad de clientes que esperan nueve semanas y disminuyendo así los clientes que esperan diez. A continuación se muestra una gráfica, en la que se puede apreciar este comportamiento de manera más sencilla:



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

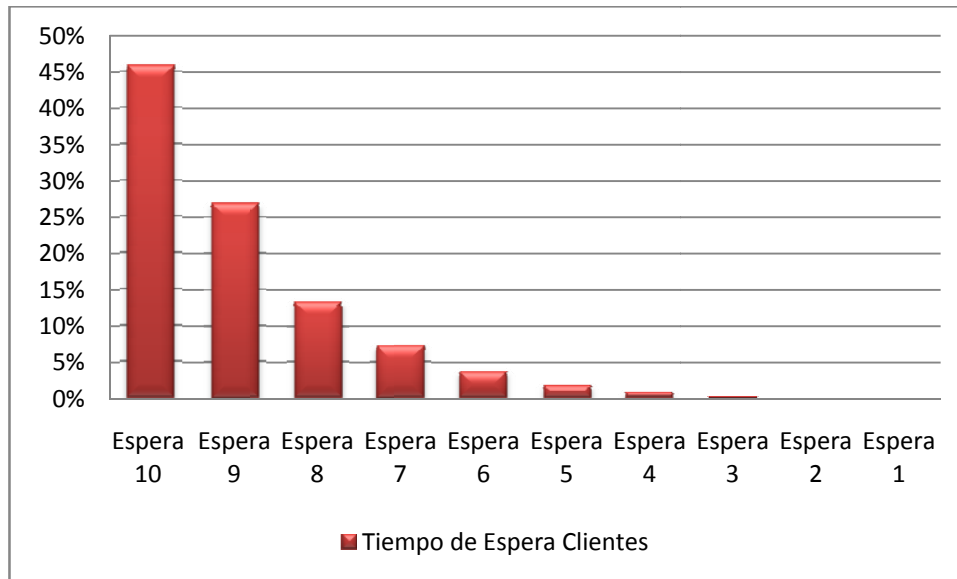


Ilustración 54: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 13 Configuraciones

5.2.5 Modelo con 14 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Componente 1	1			
Componente 2	1			
Componente 3	1			
Componente 4	1			
Componente 5	1			
Componente 6	1			
Componente 7	0,5	0,5		
Componente 8	0,75	0,25		
Componente 9	0,9	0,1		
Componente 10	0,8	0,2		
Componente 11	0,5	0,5		
Componente 12	0,8	0,2		
Componente 13	0,8	0,2		
Componente 14	0,7	0,3		
Componente 15	0,7	0,3		
Componente 16	0,7	0,3		
Componente 17	0,6	0,2	0,2	
Componente 18	0,5	0,3	0,1	0,1
Componente 19	0,4	0,3	0,2	0,1
Componente 20	0,35	0,3	0,2	0,15

Tabla 15: Atributos del Modelo con 14 Configuraciones

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

$\lambda = 1,1458$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	255	1224	766
Simulación 2	244	1221	777
Simulación 3	288	1221	773
Simulación 4	262	1219	759
Simulación 5	249	1176	772
Simulación 6	268	1236	753
Simulación 7	241	1249	780
Simulación 8	265	1169	756
Simulación 9	248	1241	773
Simulación 10	252	1262	769
<b>Promedio</b>	<b>257,2</b>	<b>1221,8</b>	<b>767,8</b>

Tabla 16: Resultados Modelo con 14 Configuraciones

Un modelo con catorce configuraciones supondría asumir más arriesgado, dado que existen números de clientes insatisfechos y productos huérfanos más críticos. El número de clientes rechazados es un 83% del total que llegan y el valor de productos huérfanos es el triple de los que se entregan.

$\lambda = 1,1458$	Espera 10	Espera 9	Espera 8	Espera 7	Espera 6	Espera 5	Espera 4	Espera 3	Espera 2	Espera 1
Sim. 1	126	53	40	24	4	7	0	1	0	0
Sim. 2	102	74	33	18	10	7	1	1	0	0
Sim. 3	121	63	43	30	17	10	4	0	0	0
Sim. 4	118	60	37	17	17	10	3	2	0	0
Sim. 5	106	66	41	26	9	2	0	1	0	0
Sim. 6	125	65	42	21	10	3	2	3	0	0
Sim. 7	105	70	37	17	8	2	4	1	0	0
Sim. 8	107	72	48	19	10	11	10	1	0	0
Sim. 9	100	67	39	19	18		2	2	0	0
Sim. 10	109	67	32	17	17	7	3	2	0	0
<b>Promedio</b>	<b>43,51%</b>	<b>25,54%</b>	<b>15,24%</b>	<b>8,09%</b>	<b>4,67%</b>	<b>2,55%</b>	<b>1,13%</b>	<b>0,54%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>

Tabla 17: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 14 Configuraciones

En la tabla anterior, se aprecia que sigue levemente disminuyendo el número de clientes que esperan diez semanas y aumentando de esta manera los que esperan entre nueve y ocho semanas. Además, se observa un aumento de porcentaje entre los que clientes que esperan siete semanas, pues en el modelo de diez configuraciones este valor suponía un 4.5 % de los clientes satisfechos y para este modelo crece al valor del 8%. A continuación se muestra una gráfica, en la que se puede apreciar este comportamiento de manera más sencilla:

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

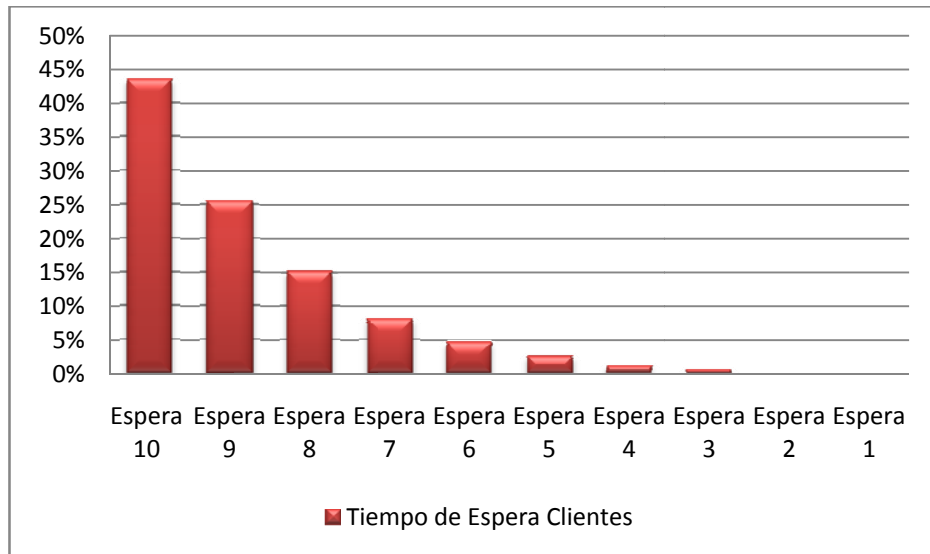


Ilustración 55: Tiempo de Entrega del Producto al Cliente Modelo con 14 Configuraciones

### 5.2.6 Discusión de los resultados

Con los resultados obtenidos para los distintos modelos, las posibles empresas que quisieran adoptar estos escenarios deberían tener en cuenta los datos conseguidos. Por una parte, en cuanto a los clientes satisfechos, el hecho de poder ofrecer a los clientes una mayor gama de productos, como era de esperar, genera tener que aceptar valores muchos más arriesgados. Así pues, en la siguiente gráfica se puede ver un comportamiento lineal descendente, en el cual conforme aumentan las configuraciones son menores los clientes satisfechos. Además, de los cerca de 1500 clientes que llegan en el periodo simulado, una empresa debe asumir que si se quiere optar por un modelo de catorce configuraciones, tan sólo 300 clientes quedarán satisfechos frente a los 820 para el modelo de diez configuraciones.



Ilustración 56: Clientes Satisfechos para las distintas Configuraciones

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

Por otro lado, en cuanto a los productos huérfanos, a continuación se muestra una gráfica donde se puede observar un comportamiento lineal ascendente conforme se aumenta el número de configuraciones. En esta gráfica además, se aprecia el riesgo que una empresa debe asumir al elegir presentar al cliente una gama de catorce configuraciones frente a diez, ya que la empresa debe absorber 600 productos acabados más.

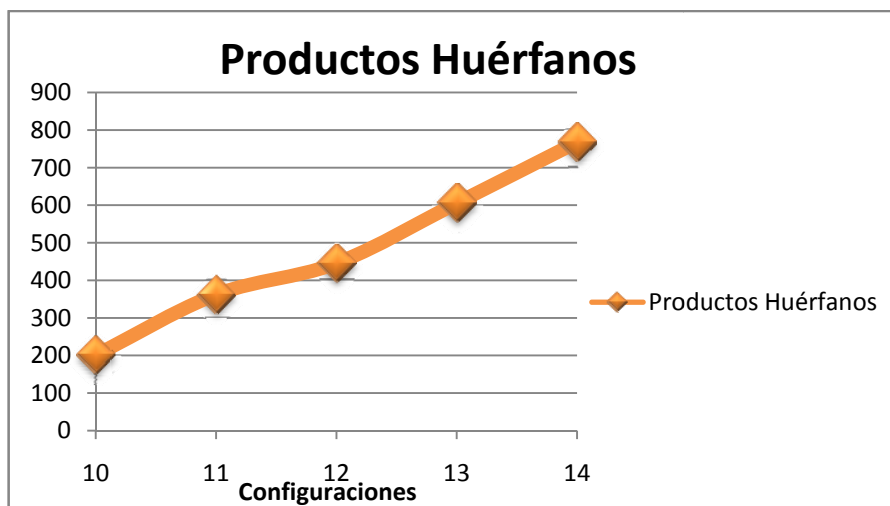


Ilustración 57: Productos Huérfanos para las distintas Configuraciones

Por último, en cuanto a los tiempos de espera, se muestra que la mayoría de clientes tendrán que esperar en torno a diez semanas para recibir su pedido y que además, es prácticamente imposible poder entregar el producto en menos de dos semanas. En la siguiente gráfica, se ha realizado una comparativa entre los distintos modelos y los principales tiempos de espera. Se puede apreciar una mejoría en el modelo de catorce configuraciones, pues con respecto a los demás modelos, el número de clientes que esperan diez semanas decrece y en cambio crece levemente los clientes que esperan entre nueve y siete semanas.

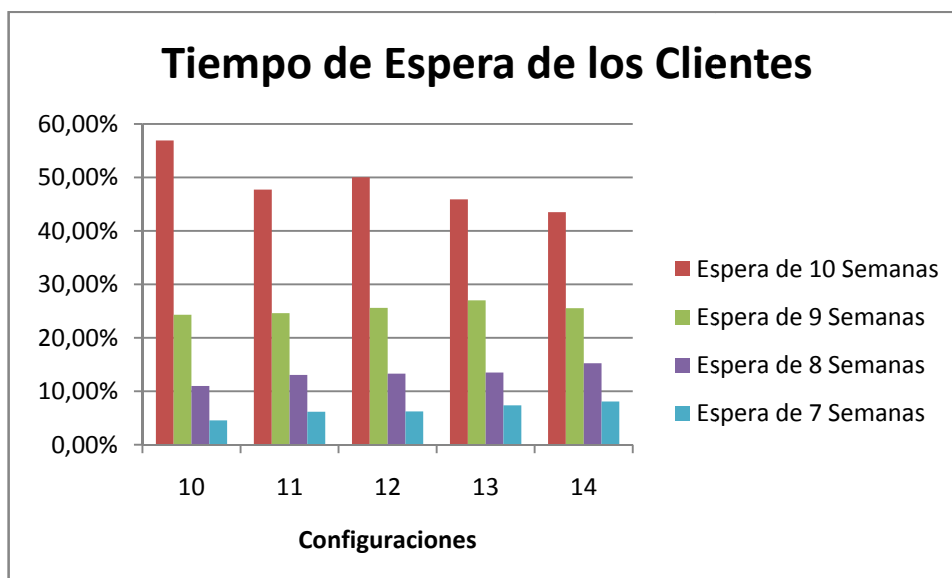


Ilustración 58: Tiempos de Espera de los Clientes para las distintas Configuraciones

## 5.3 Estudio del comportamiento de $\lambda$

### 5.3.1 Introducción

El modelo anterior simulado se ha desarrollado siguiendo una distribución de Poisson para la llegada de clientes con el valor  $\lambda$  propuesto en el artículo de Meredith y Akinc (2007). En este apartado, se estudia si existe un rango de valores de  $\lambda$  que resulte aceptable, es decir si el modelo propuesto en este trabajo podría llevarse a cabo en más escenarios donde las órdenes de los clientes tuviesen otro valor de  $\lambda$ . Para ello, se utiliza el primer modelo simulado con diez componentes con configuraciones y se va variando el valor de  $\lambda$ .

Se entiende que un valor de  $\lambda$  podría ser aceptable, si se consigue un número de clientes satisfechos mayor al número de clientes rechazados, pero intentando que el número de clientes rechazados sea el menor posible. Además, se valora número de productos huérfanos, buscando que sea el mínimo.

La idea es comprobar si otro tipo de empresa con un  $\lambda$  determinado, podría adaptarse al sistema productivo MTF con resultados positivos.

### 5.3.2 Estudio para $\lambda = 1.13$

$\lambda = 1,13$	Clientes Satisfechos	Clientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	806	694	215
Simulación 2	813	650	208
Simulación 3	788	738	233
Simulación 4	824	626	197
Simulación 5	824	672	197
Simulación 6	816	628	205
Simulación 7	804	649	217
Simulación 8	819	664	202
Simulación 9	828	653	193
Simulación 10	811	668	210
<b>Promedio</b>	<b>813,3</b>	<b>664,2</b>	<b>207,7</b>

Tabla 18: Resultados para  $\lambda = 1.13$

### 5.3.3 Estudio para $\lambda = 1.16$

$\lambda = 1,16$	Clientes Satisfechos	Clientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	823	677	198
Simulación 2	818	700	203
Simulación 3	826	731	195
Simulación 4	827	649	194
Simulación 5	825	646	196
Simulación 6	824	656	197
Simulación 7	815	698	206
Simulación 8	812	637	209
Simulación 9	834	647	187
Simulación 10	810	693	211
<b>Promedio</b>	<b>821,4</b>	<b>673,4</b>	<b>199,6</b>

Tabla 19: Resultados para  $\lambda = 1.16$

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

**5.3.4 Estudio para  $\lambda = 1.175$**

$\lambda = 1,175$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	818	658	203
Simulación 2	796	693	225
Simulación 3	819	716	202
Simulación 4	833	662	188
Simulación 5	829	670	192
Simulación 6	826	655	195
Simulación 7	815	698	206
Simulación 8	810	696	211
Simulación 9	836	663	185
Simulación 10	832	703	189
<b>Promedio</b>	<b>821,4</b>	<b>681,4</b>	<b>199,6</b>

Tabla 20: Resultados para  $\lambda = 1.175$

**5.3.5 Estudio para  $\lambda = 1.2$**

$\lambda = 1,2$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	822	678	199
Simulación 2	802	687	219
Simulación 3	825	710	196
Simulación 4	839	681	182
Simulación 5	832	718	189
Simulación 6	832	730	189
Simulación 7	830	709	191
Simulación 8	806	688	215
Simulación 9	831	695	190
Simulación 10	837	698	184
<b>Promedio</b>	<b>825,6</b>	<b>699,4</b>	<b>195,4</b>

Tabla 21: Resultados para  $\lambda = 1.2$

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

**5.3.6 Estudio para  $\lambda = 1.25$**

$\lambda = 1,25$	Cientes Satisfechos	Cientes rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	842	749	179
Simulación 2	819	727	202
Simulación 3	858	770	163
Simulación 4	832	706	189
Simulación 5	844	728	177
Simulación 6	841	774	180
Simulación 7	837	702	184
Simulación 8	826	720	195
Simulación 9	832	725	189
Simulación 10	849	715	172
<b>Promedio</b>	<b>838</b>	<b>731,6</b>	<b>183</b>

Tabla 22: Resultados para  $\lambda = 1.25$

**5.3.7 Estudio para  $\lambda = 1.3$**

$\lambda = 1,3$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos
Simulación 1	841	766	180
Simulación 2	836	735	185
Simulación 3	833	779	188
Simulación 4	835	764	186
Simulación 5	855	724	166
Simulación 6	845	772	176
Simulación 7	839	728	182
Simulación 8	830	744	191
Simulación 9	854	783	167
Simulación 10	856	710	165
<b>Promedio</b>	<b>842,4</b>	<b>750,5</b>	<b>178,6</b>

Tabla 23: Resultados para  $\lambda = 1.3$

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

**5.3.8 Discusión de los resultados**

Claramente se observa que a medida que  $\lambda$  es mayor se consigue un número más elevado de clientes satisfechos y por tanto un número menor de huérfanos, pero esto era de esperar pues si  $\lambda$  es mayor llegarán más clientes y será más fácil combinar un producto en la línea de producción con la orden de pedido. Sin embargo, este no es el objetivo marcado, pues un crecimiento de  $\lambda$  trae consigo un incremento muy grande de clientes rechazados.

En las siguientes gráficas se muestra una comparativa que permite, teniendo todo lo anteriormente comentando, encontrar el  $\lambda$  más favorable. Así pues, el valor aportado por Meredith y Akinc (2007) en su artículo, es el que resulta más favorable, ya que consigue un mayor grado de satisfacción de los clientes, siendo muy pequeña la variación de huérfanos frente otros  $\lambda$ .

$\lambda$	Cientes Satisfechos	Cientes Rechazados	Productos Huérfanos	Grado de Satisfacción	Promedio de Huérfanos
1,13	813,3	664,2	207,7	55,046	20,343
<b>1,1458</b>	<b>820,1</b>	<b>667,9</b>	<b>200,9</b>	<b>55,114</b>	<b>19,677</b>
1,16	821,4	673,4	199,6	54,950	19,549
1,175	821,4	681,4	199,6	54,658	19,549
1,2	825,6	699,4	195,4	54,138	19,138
1,25	838	731,6	183	53,389	17,924
1,3	842,4	750,5	178,6	52,885	17,493

Tabla 24: Comportamiento  $\lambda$

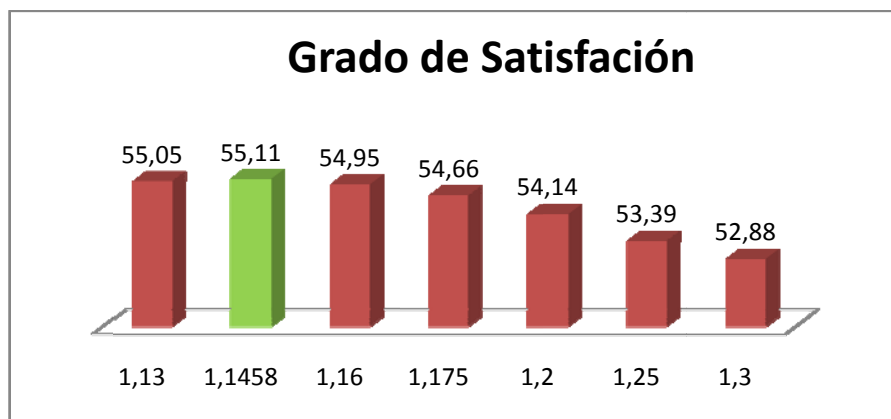


Ilustración 59: Comportamiento  $\lambda$  frente al Grado de Satisfacción

En la gráfica anterior, se puede observar que un rango de valores  $\lambda$  aceptable sería entre  $\lambda = 1.13$  y  $1.175$ , pues a partir del valor  $\lambda = 1.2$  decrece más rápido.



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

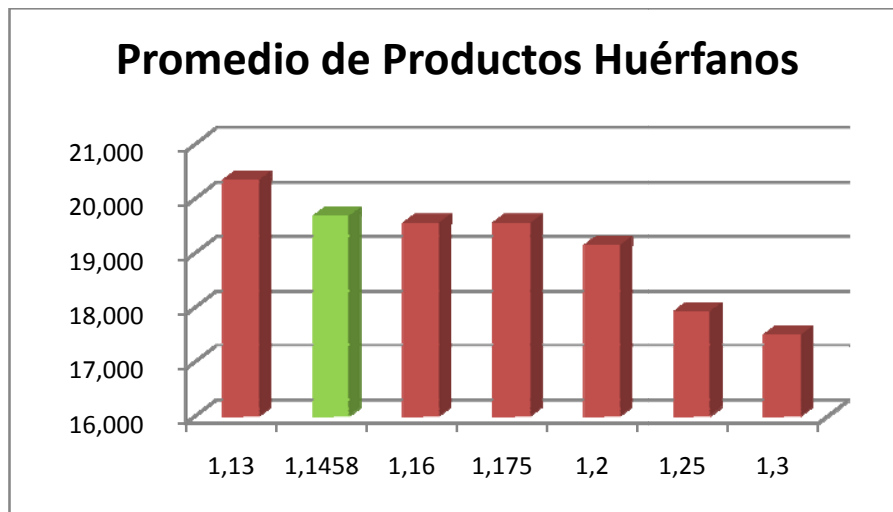


Ilustración 60: Comportamiento  $\lambda$  frente al número de Productos Huérfanos

Esta gráfica permite ajustar el rango de valores anteriormente indicado. En este caso, para  $\lambda = 1.13$  existe un mayor número de productos huérfanos frente al resto de escenarios. Con lo cual, se podría concluir, que de los valores de  $\lambda$  simulados, un rango aceptable sería entre  $\lambda = 1.1458$  y  $\lambda = 1.175$ .

## 5.4 Comparaciones entre Modelos

### 5.4.1 Introducción

En este apartado, se va a mostrar una comparación entre los modelos del primer apartado, cambiando la probabilidad de la primera estación de trabajo que presenta la posibilidad de varias configuraciones. El valor de  $\lambda$  será siempre el mismo.

Así, para el modelo con once componentes con configuraciones se simulará un nuevo modelo, para el cual el componente diez en vez de tener una probabilidad 0.8/0.2 pasará a tener para este componente 0.6/0.4.

### 5.4.2 Modelo con 11 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2
Componente 10	0,6	0,4

Tabla 25: Atributo del Componente 10

Probabilidad	Cientes Satisfechos	Productos Huérfanos
0,80/0,2	657	362
0,60/0,4	585,4	435,6

Tabla 26: Resultados con distintas probabilidades Componente10

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

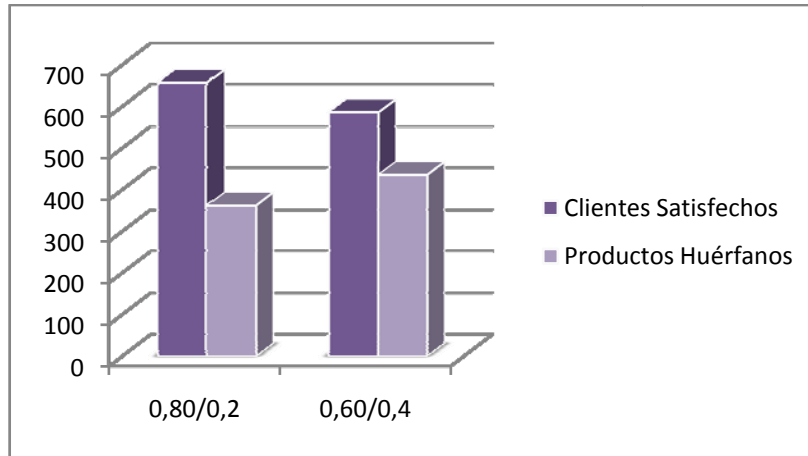


Ilustración 61: Resultados con distintas probabilidades Componente 10

5.4.3 Modelo con 12 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2
Componente 9	0,75	0,25

Tabla 27: Tabla 28: Atributo del Componente 9

Probabilidad	Clientes Satisfechos	Productos Huérfanos
0,90/0,1	574,6	445,4
0,75/0,25	488,9	532,1

Tabla 29: Resultados con distintas probabilidades Componente 9

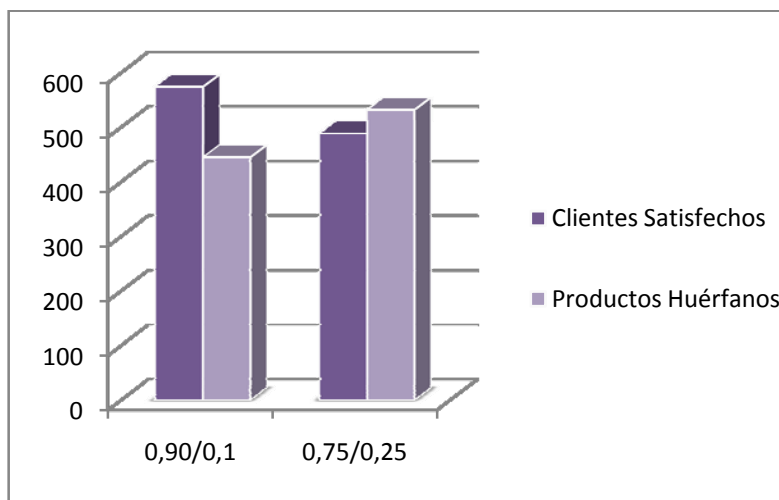


Ilustración 62: Resultados con distintas probabilidades Componente 9

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

5.4.4 Modelo con 13 Configuraciones

$\lambda = 1,1458$	Configuración 1	Configuración 2
Componente 8	0,85	0,15

Tabla 30: Tabla 31: Atributo Componente 8

Probabilidad	Clientes Satisfechos	Productos Huérfanos
0,75/0,25	415,6	605,4
0,85/0,15	456,7	564,3

Tabla 32: Resultados con distintas probabilidades Componente 8

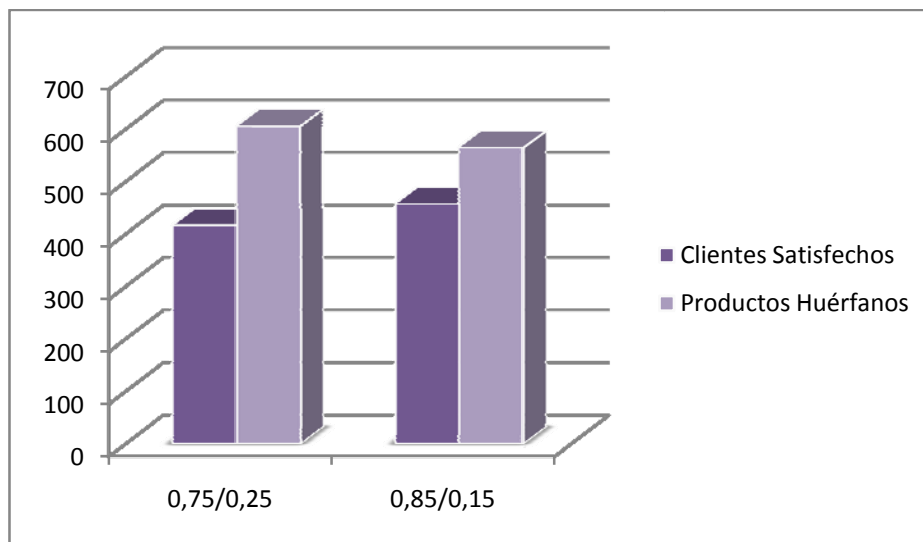


Ilustración 63: Resultados con distintas probabilidades Componente 8

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO MAKE TO FORECAST

### 5.4.5 Discusión de los resultados

A continuación se muestra una gráfica, en la cual se comparan todas las simulaciones realizadas, para ello se pueden agrupar en dos casos:

- Caso 1. Modelos simulados con una gama de productos en la cual la mayor parte de la demanda se concentra en un conjunto de productos reducido, y por lo tanto una gran parte de la gama de productos aglutina una pequeña parte de la demanda de los clientes.
- Caso 2. Modelos simulados con una gama de productos en la cual la demanda está muy distribuida sobre una gran cantidad de productos, así la demanda de los productos es a grandes rasgos más homogénea.

Con los datos obtenidos, se aprecia que los modelos simulados que pertenecen al primer caso presentan resultados más favorables, pues consiguen mayor número de clientes satisfechos y menor número de productos huérfanos. Así pues, en la siguiente gráfica se aprecia que para el primer caso se consiguen atender entre 50 y 100 clientes más.

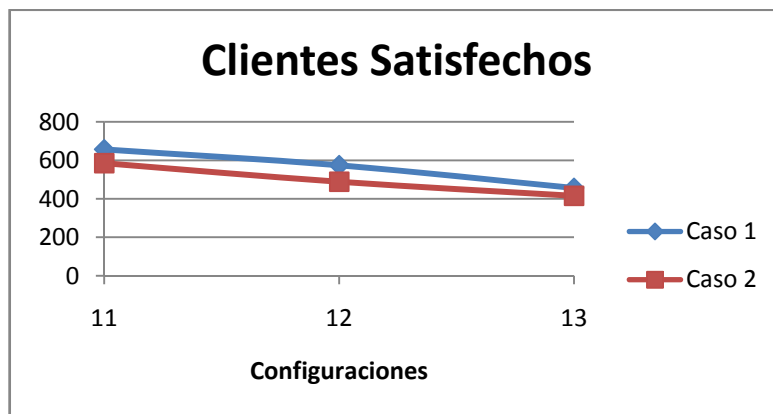


Ilustración 64: Clientes Satisfechos para Configuraciones con distintas Probabilidades

Finalmente, en la siguiente gráfica se representan también ambos casos y se permite deducir a simple vista el incremento de productos huérfanos que supone los modelos que se han simulado bajo el segundo caso.

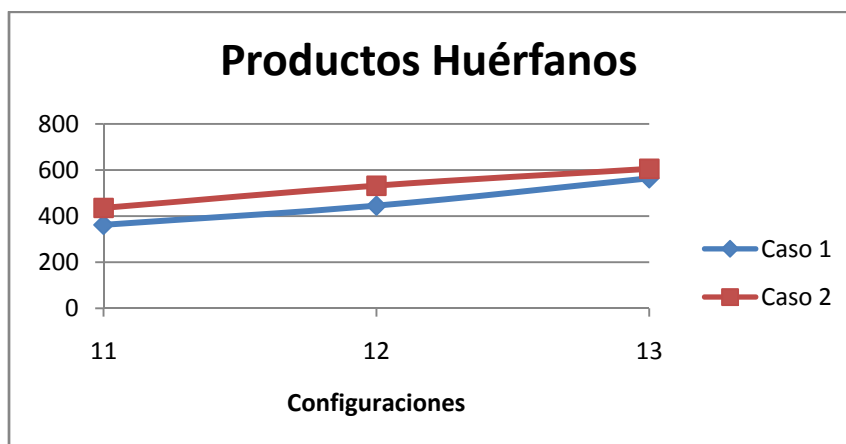


Ilustración 65: Productos Huérfanos para Configuraciones con distintas Probabilidades

## 5.5 Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Tras analizar los resultados conseguidos, se puede construir una primera idea de los posibles beneficios que el sistema de producción MTF puede aportar a las empresas.

Como ya se ha comentado, el fenómeno de customización en masa cada vez tiene más relevancia en el mercado, puesto que cada cliente desea un mayor grado de personalización de su producto con el menor tiempo de espera para su entrega. Con las ventajas de hoy día, todo esto se puede conseguir gracias a la ayuda de la automatización y de los nuevos sistemas de programación y control de la producción, alcanzando en un futuro próximo sistemas de producción muy avanzados.

El sistema MTF, tras el estudio realizado y acorde a los modelos estudiados, podría llegar a ser recomendable para casos de empresas en los cuales las primeras etapas de fabricación presentasen tan sólo una configuración y posteriormente, en las últimas fases pudiesen ensamblar componentes con distintas configuraciones. Este caso, se podría extrapolar a empresas aeronáuticas, como en el caso de la aeronave A400M, donde durante sus últimas fases de ensamblado se instalan equipos requeridos por el cliente. Por ejemplo, los clientes de Reino Unido requieren un sistema de contramedidas específico, mientras que Malasia, al estar fuera de la OTAN, presenta una configuración civil con equipos distintos.



Ilustración 66: Aplicación del sistema MTF a la aeronáutica Fuente: elconfidencialdigital

Como punto final de este proyecto, el sistema MTF deja abierto un amplio abanico de posibilidades y caminos de investigación que sería muy interesante estudiar para distintas ramas de la ingeniería. Entre los posibles estudios, se recomendaría realizar un análisis sobre el comportamiento del sistema MTF con otras políticas de secuenciación más complejas. El objetivo final, sería lograr definir los ámbitos de uso del sistema MTF con una mayor precisión.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] J. Meredith, U. Akinc, «Characterizing and structuring a new make to-forecast production strategy», *Journal of Operations Management* 25 (2007).
- [2] M. Calle, P. L. González-R, «Improved virtual build to order», *IEEE 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFAs)*, 17-21 Sept. 2012, Krakow, Poland.
- [3] P. Escobar, J.A. Giraldo, D.M. Cárdenas, «Programación de Sistemas de Producción Híbridos, Para inventario/Bajo pedido, mediante un Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO)», 2012.
- [4] M. Calle, P. L. González-R, H. Pierreval, «Impact of the Customer Demand on Conventional and Virtual Build to Order Systems: a simulation analysis».
- [5] J.A. Domínguez Machuca, «Dirección de Operaciones», 2010.
- [6] A. Fábregas, R. Wadnigar, C. Paternina, A. Mancilla, «Simulación de sistemas productivos con ARENA», 2003.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PRODUCTIVO HÍBRIDO  
MAKE TO FORECAST