



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Análisis de factores para la optimización de líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas.

English title:

Factor analysis for the optimization of manual or semi-automatic assembly lines.

Autor/es

Luis Palacios Larragay

Director/es

María José Oliveros Colay

Titulación del autor

Grado de Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

2022

D./D^a.

en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de Estudios de la titulación de



(Título del Trabajo)

Título del trabajo:

Análisis de factores para la optimización de líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas.

English title:

Factor analysis for the optimization of manual or semi-automatic assembly lines.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza,



Fdo:

Análisis de factores para la optimización de líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas.

Resumen.

Actualmente, las empresas industriales se enfrentan al desafío de buscar e implementar nuevas técnicas organizativas y productivas que les permitan competir en un mercado global y en continuo cambio, satisfaciendo el deseo de los clientes de adquirir productos más personalizados, los cuales proporcionan una mayor implicación e identificación. Esto repercute en las marcas de manera positiva al proporcionar una mayor intención de compra y lealtad frente a productos estándar, suponiendo una gran ventaja competitiva frente a la competencia.

En este aspecto, las líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas adquieren una gran importancia en las actuales empresas industriales frente a las líneas de producción tradicionales. Se tratan de líneas de producción más flexibles con procesos de fabricación similares y con una estructura común que permiten lograr una mayor cantidad y variedad de productos, y cuyas cantidades a fabricar viene determinada por la demanda del cliente.

Puesto que la implementación de estas líneas supone una gran inversión, las tasas de productividad, flexibilidad o calidad cobran una gran importancia. A pesar de poder ensamblar productos de diferentes familias, estas tasas son elevadas a causa de una estructura común que disminuye los tiempos de setup y esperas y el *Lead Time*, debido a que el proceso de trabajo entre una pieza de una familia y otra, no difiere en gran medida. Para su optimización se apoyan en la filosofía *Lean* que se focaliza en identificar y eliminar todo tipo de “desperdicios”.

En el presente trabajo se analiza la influencia de diversos indicadores de importancia (*KPI's*) como la productividad, la capacidad de línea o el *Lead Time*, en la eficacia de las líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas de una empresa referente del sector de los electrodomésticos, para el caso una demanda de diferentes productos (electrodomésticos o productos de características similares) en serie corta y variada, ante la variación de diversos factores tales como el número de operarios de trabajo por línea, la diversidad de productos o el tamaño de lote.

Para ello, se parte de un caso base, que representa la realidad de la empresa fabricante y se realizan modificaciones en los diversos factores proponiendo diferentes escenarios, que dan como resultado diferencias en los valores de los *KPI's* obtenidos. Como propósito, se extraen resultados y conclusiones claras y concisas, que sirven a la empresa como justificación para la toma de decisiones de inversión.

Índice

Resumen.....	3
1. Introducción.....	5
2. Objetivos y motivación.....	8
3. Alcance.....	9
4. Metodología y enfoque.....	10
4.1 Datos de entrada e indicadores clave de desempeño (KPI's).....	15
4.2 Caso base.....	17
4.3 Modificaciones a partir del caso base.....	20
4.3.1 Escenario 1: Tamaño de lote.....	21
Análisis escenario 1: Tamaño de lote.....	22
4.3.2 Escenario 2: Número de puestos.....	24
Análisis Escenario 2: Número de puestos.....	25
4.3.3 Escenario 3: Variabilidad del tiempo de ciclo.....	29
Análisis Escenario 3: Variabilidad del tiempo de ciclo (Tc).....	29
4.3.4 Escenario 4: Tiempo de setup.....	32
Análisis Escenario 4: Tiempo de setup.....	33
4.3.5 Escenario 5: Diversidad de productos.....	35
Análisis Escenario 5: Diversidad de productos.....	36
4.3.6 Escenario 6: Diferentes secuencias de modelos en combinación con diferentes tamaños de lote.....	38
Análisis Escenario 6: Secuencia de productos – tamaño de lote:.....	41
5. Conclusiones.....	44
6. Bibliografía.....	45
Anexos:.....	46
Anexo 1:.....	47
Anexo 2:.....	52

1. Introducción.

El modelo tradicional de fabricación está basado en estrategias de producción *push* o de empuje, que se caracterizan por altos niveles de stock operando en niveles máximos de capacidad. Los procesos se maximizan individualmente; el mantenimiento de los equipos y la maquinaria se realiza únicamente si es necesario; y los controles de calidad no se realizan durante el proceso y el producto se revisa al final de la línea.

Como consecuencia, este modelo de trabajo desemboca en altos niveles de stock que suponen un importante inmovilizado material y económico, debido a gastos adicionales en almacenamiento o mantenimiento. Además, las empresas disponen de poca variedad de productos, debido a que centran su capacidad de producción en grandes lotes de productos semejantes. Como resultado se originan desequilibrios en los flujos de materiales y tiempos de producción de lotes elevados. Por lo tanto, este modelo únicamente permite obtener altos porcentajes de productividad, con un coste por pieza relativamente bajo, para grandes demandas de productos [1] [2].

La rigidez de estas líneas de producción dedicadas a la fabricación de productos semejantes supone un gran inconveniente para el mercado actual basado en la variedad y personalización de los productos. Esta gran cantidad de productos proporcionan a los clientes una mayor implicación e identificación lo que repercute en las marcas de manera positiva proporcionando una mayor intención de compra y lealtad frente a productos estándar, lo cual supone una gran ventaja competitiva frente a la competencia [3].

Es por ello que hoy en día, las empresas industriales se enfrentan al reto de buscar e implantar nuevas técnicas organizativas y de producción que les permitan competir en un mercado global y en continuo cambio, logrando una mayor cantidad y variedad de productos, satisfaciendo así, el deseo de los clientes de adquirir productos más personalizados [3].

Esta búsqueda requiere de líneas de producción más flexibles con procesos de fabricación similares y con una estructura común frente a las actualmente obsoletas líneas de producción tradicionales. Estas últimas se enfrentan al problema de un elevado tiempo de preparación y de cambio a un nuevo modelo, ya que la diferencia de estructura entre unos productos y otros provoca que el operario tenga que adaptarse a las configuraciones de cada uno de estos.

En las líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas (ver Fig.1), objeto de este estudio, la cantidad a fabricar viene determinada por la demanda del cliente. Es por ello que estas adquieren una gran importancia en las actuales empresas industriales. Las tasas de productividad, flexibilidad o calidad, a pesar de ensamblar productos de diferentes familias, son elevadas debido a una estructura común que disminuye por ejemplo los tiempos de setup o el *Lead Time*, debido a que, para los operarios, el proceso de trabajo entre una pieza de una familia y otra, no difiere en consecuencia [3].

El análisis de las líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas antes de su implantación es exhaustivo, pues de su correcta implementación dependen unos correctos valores en términos de eficiencia, maximizando los beneficios de las empresas. Pese a ello, habitualmente, una vez implementadas surge la necesidad de hacer pequeñas modificaciones o correcciones debido a la habitual aparición de problemas en su puesta en marcha.

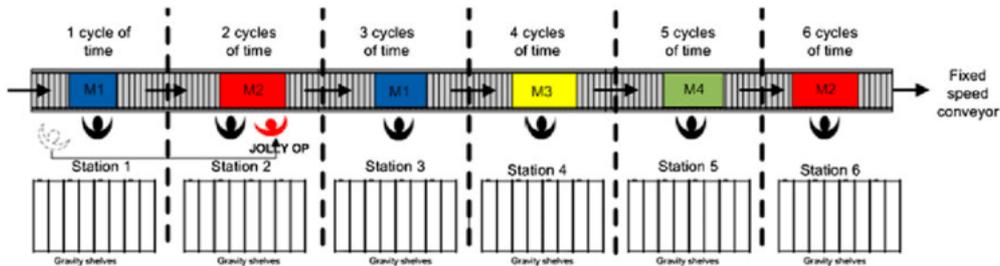


Figura 1 - Línea de ensamblaje manual o semi-automática [4]

Es por ello que la filosofía *Lean* o *Lean Manufacturing* adquiere una gran importancia. Basada en las personas, esta filosofía define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de “desperdicios”, definidos estos como aquellos procesos o actividades que usan más recursos de los estrictamente necesarios [5].

La metodología *Lean* utiliza habitualmente el denominado *Value Stream Map* o VSM como herramienta de análisis. VSM consiste en un mapa de flujo de valor para analizar los flujos de materiales e información para poner a disposición del cliente un producto o Servicio, tal y como se puede ver en la Fig. 2.

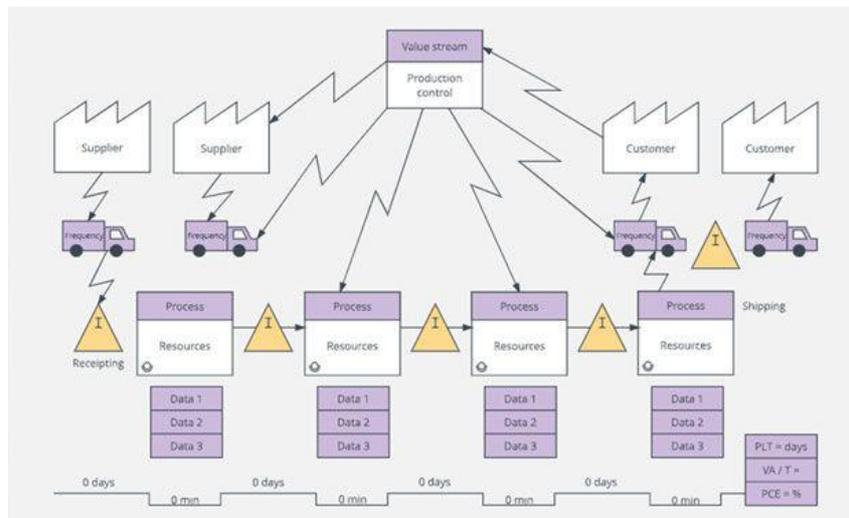


Figura 2 - Value Stream Map (VSM) [6]

Con el objetivo de impulsar su crecimiento, es importante que las empresas comprendan los principales principios del *Lean Manufacturing* (ver Fig. 3): identificar el beneficio para el cliente, identificar la cadena de valor, enlazar las etapas de creación de valor (flujo), aplicar el principio *pull* (basado en la demanda) y perseguir la perfección. Todo ello, con el fin de obtener la excelencia que consiga lograr el éxito en las organizaciones [7].

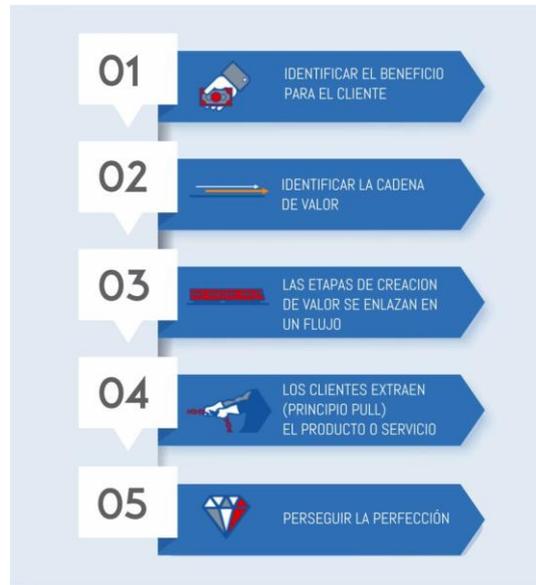


Figura 3 - Principios Lean Manufacturing [7]

Los desperdicios que esta filosofía trata de evitar son: la sobreproducción, el transporte, los tiempos de espera, el exceso de procesos, el inventario, los movimientos, los defectos en el producto y la subutilización del personal. En el presente proyecto, los desperdicios abordados han sido la sobreproducción y los tiempos de espera [7].

“En los últimos años ha aparecido un nuevo paradigma que aborda el objetivo de la excelencia operacional desde el punto de vista de la transformación digital”: la *Industria 4.0*. Mejorar la productividad y eficiencia de la industria es posible utilizando las nuevas tecnologías. Desde el punto de vista de eliminación de defectos, es importante no incurrir en un sobreprocesamiento que surgiera incluir nuevas tecnologías que no sean necesarias y que no aporten valor. Así, en este proyecto, se ha centrado la atención en la disminución de los tiempos de espera y de los tiempos de proceso, lo cual trae consigo una mejora de la calidad y los costes de producción [8].

2. Objetivos y motivación

El objetivo del presente trabajo es el estudio de diversos factores de importancia en la eficacia y eficiencia de las líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas, presentes en las organizaciones industriales más importantes, para una demanda de diferentes productos en serie corta y variada. Algunos de dichos factores son el número de operarios de trabajo por línea, la diversidad de productos o la tasa de defectos. Para ello, se utilizarán diferentes indicadores claves de desempeño (*KPI's*) como la productividad, la capacidad de línea o el *Lead Time*, que permiten establecer comparaciones y relaciones entre los distintos casos estudiados.

La finalidad es presentar resultados y conclusiones claras y concisas, a partir de los valores obtenidos de los indicadores claves de desempeño en el estudio de la línea, que sirvan a la empresa como justificación para la toma de decisiones de inversión, es decir, aquellos factores más rentables en términos de eficiencia.

La investigación y evaluación de estas líneas para los distintos escenarios planteados permiten, a partir de la obtención de resultados, establecer conclusiones que hacen posible la comprensión de las mismas. Una vez obtenidos, se compara los resultados con las hipótesis de resultados esperados al comienzo de la investigación y se evalúa si responden a las preguntas planteadas.

Es de suma importancia justificar los resultados obtenidos mediante la metodología empleada, dando validez a los mismos. Para posteriormente, poder establecer relaciones que nos permitan predecir o intuir los resultados esperados para futuras investigaciones.

A partir de los resultados obtenidos, es de gran utilidad acotar los límites de mejora o los límites críticos (si es que existen), que permitan, por ejemplo, identificar cuando no es necesario invertir más recursos en mejorar un cierto parámetro o, por el contrario, detectar y avisar cuando un parámetro clave está próximo a un valor indeseable por parte de una empresa.

3. Alcance

Los datos, así como el esquema de línea utilizados para el propósito de este estudio han sido facilitados por una empresa referente del sector de los electrodomésticos en España. Estos elementos han permitido diseñar e implementar un modelo de simulación paramétrico, utilizando para ello el software *Witness* a partir del cual se obtienen los resultados que simulan el comportamiento de la línea de producción real frente a escenarios diversos.

Estas líneas de ensamblaje manuales o semiautomáticas, flexibles ante procesos de fabricación similares y con una estructura común, están divididas en puestos de trabajo y permiten el ensamblado de diferentes modelos. Los productos utilizados en este estudio son encimeras de cocina (diferentes modelos), aunque debido a las características de estas líneas, ya mencionadas anteriormente, permiten el ensamblaje de otros electrodomésticos de similares propiedades en cuanto a peso, dimensiones, complejidad, proceso de ensamblado etc.

El presente proyecto se apoya en el trabajo previo realizado por Adrián Miqueo quien está realizando una tesis doctoral titulada “*Industry 4.0 technologies for high product customisation and high assembly productivity in white goods low volume production*” en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Tanto los modelos utilizados en *Witness* como la estructura de los ficheros de salida que se obtienen de este software de elementos discretos, han sido facilitados para el estudio de este trabajo. El entendimiento del contenido y funcionamiento de los modelos de *Witness* utilizados, no ha sido necesario para el desarrollo de este proyecto, no obstante, sí ha sido necesaria la comprensión de los datos de salida de los ficheros, debido a que el archivo de *Excel* desarrollado requería del tratamiento de estos datos.

El software *Witness* utilizado no ha presentado limitaciones al estar diseñado paramétricamente para los escenarios aquí previstos. El esquema de funcionamiento es tal que la configuración de la línea se realiza por el usuario en un fichero *Excel* externo al programa de simulación, y que para éste son los datos de entrada. Conforme los modelos evolucionan en el tiempo, se van plasmando los diferentes resultados en 4 ficheros de texto. Estos ficheros son los que serán necesarios tratar posteriormente, para que, en función de los datos de entrada y los resultados, obtener unos indicadores de funcionamiento en forma de *KPI's*.

Para esta conversión se ha utilizado la herramienta ofimática *Excel*. Durante este proceso, ha sido necesario depurar un archivo de trabajo en el que se introducen los datos de entrada (diferentes para cada caso), y se convierten (por medio de, básicamente, operaciones matemáticas) rápidamente en datos de salida en forma de *KPI's* que permiten obtener comparaciones entre los distintos casos. La variación de los distintos escenarios estudiados ha supuesto a su vez ligeras variaciones en este archivo ya mencionado, para el tratamiento los datos de entrada.

4. Metodología y enfoque

De la elección de una correcta metodología y de su correcta ejecución, dependerá la autenticidad y validez de los resultados obtenidos. Es por ello, que debido a la complejidad de la metodología utilizada conviene introducir tanto el nombre como las características de los archivos o ficheros utilizados, así como el programa utilizado para ello, y exponer un esquema (ver Fig. 4) que será desarrollado posteriormente.

Como ya se ha explicado anteriormente, la finalidad del proyecto es presentar resultados y conclusiones claras y concisas, a partir de los valores obtenidos de los indicadores clave de desempeño en el estudio de la línea, que sirvan a la empresa como justificación para la toma de decisiones de inversión.

En primer lugar, es necesario reproducir la línea de ensamblaje y para ello se utiliza el software de elementos discretos *Witness* (como se ha comentado en el apartado *Alcance*, la reproducción de esta línea no es objeto de este estudio y se utiliza un modelo de *Witness* ya creado, que es proporcionado para el desarrollo de este proyecto y actúa en este caso como “caja negra”). La simulación de esta línea a través del modelo utilizado en *Witness* requiere de la introducción de unos datos de entrada en forma de un archivo *Datos.xls* y como resultado devuelve una serie de datos de salida en forma de cuatro ficheros de resultados con extensión *.txt*. El grueso del estudio ha sido la toma de los datos de salida provenientes del software *Witness* y su conversión en indicadores de desempeño (*KPI's*). Este último proceso, se ha llevado a cabo en el archivo *KPI's.xls*.

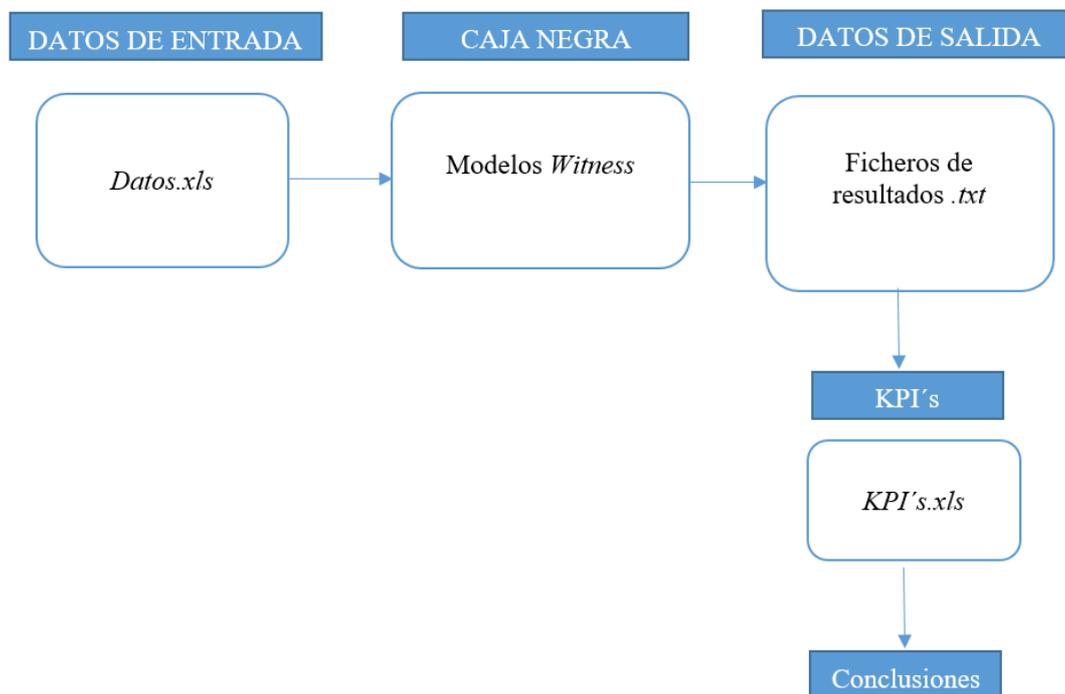


Figura 4 - Esquema de la metodología empleada.

Una vez introducidos los conceptos necesarios para la comprensión de la metodología empleada se procede al desarrollo de la misma. El primer paso es afrontar la acotación del escenario y la problemática, es decir, estudiar cuáles son los factores e indicadores disponibles para analizar en el caso de líneas de ensamblaje manuales o semiautomáticas,

y en concreto, identificar los más relevantes para el estudio de la línea objeto de este estudio. Por ejemplo, no se hará hincapié en las tasas de calidad, debido a que los valores obtenidos por la empresa son ya muy altas y se considera redundante, por el momento, invertir recursos en mejorarlas.

Tras ello, se definen los datos de entrada y los indicadores clave de desempeño útiles para este estudio. En este caso, se pueden diferenciar tres grupos de datos de entrada:

- Datos de diseño: el tamaño de lote, el número de puestos, la secuencia u orden de los modelos y la diversidad de productos (en términos de *Workcontent*, es decir, operaciones y tiempos de éstas).
- Datos fijos: las tasas de calidad.
- Perturbaciones: la variabilidad del tiempo de ciclo y la variabilidad del tiempo de setup.

En cuanto a los *KPI's*, se puede diferenciar entre aquellos que son objeto de estudio y aquellos que sirven para asegurar que los experimentos simulados y el posterior tratamiento de los resultados han sido correctos. Los *KPI's* objeto de estudio son: el *Lead Time*, la productividad, la capacidad de línea, la productividad de línea (en función del número de operarios) y el porcentaje de tiempo empleado en setup y esperas. Por otro lado, los *KPI's* que permiten asegurar la correcta ejecución del análisis son: el porcentaje de piezas buenas, defectuosas y retrabajadas.

A continuación, se establece un caso base, que se describe posteriormente en el apartado *Caso base*, para el cual se fijan los valores de los datos de entrada (tamaño de lote, número de puestos, secuencia de los modelos, *Workcontent* de los modelos, tasas de calidad, variabilidad del tiempo de ciclo y del tiempo de setup) y se genera su correspondiente fichero de *Excel* llamado *Datos.xls* en el que aparecen recogidos los valores de los datos de entrada para el caso base y que será utilizado como fuente de datos.

Posteriormente, se procede con el proceso de obtención de los *KPI's* a través de la utilización de la herramienta ofimática *Excel*. Se genera un nuevo archivo *Excel* con extensión *.xls* llamado *KPI's.xls* el cual se presenta en el Anexo 1. Es en este archivo donde se importan los datos de entrada del archivo *Datos.xls* y los datos de salida provenientes de los ficheros *.txt* de resultados. Para el proceso de obtención de los *KPI's* a partir de los datos anteriores, en un primer lugar, se utilizan los valores obtenidos del caso base. Para el proceso de automatización de obtención de los *KPI's*, básicamente, se recurre a la utilización de macros, tablas dinámicas y funciones propias de *Excel*, depurando el archivo hasta hacerlo lo más tratable posible teniendo en cuenta las variaciones de los diferentes casos a estudiar. Este archivo *KPI's.xls* posibilita introducir los valores de salida obtenidos del simulador y devuelve valores de los *KPI's*.

Una vez perfeccionado el archivo *KPI's.xls*, ahora, a partir del caso base establecido anteriormente, se establecen, en primer lugar, los datos de entrada que van a sufrir modificaciones con el objetivo de analizar cómo influyen estas variaciones en la línea; y, en segundo lugar, se acotan los valores mínimos, intermedios y máximos para cada uno de los datos de entrada que se van a modificar, generando los archivos de *Excel* con extensión *.xls* correspondientes (llamados *Datos.xls* de igual manera que para el caso base).

Los datos de entrada sobre los cuales se realizan modificaciones para el estudio de la línea son: el tamaño de lote, el número de puestos, la variabilidad del tiempo de ciclo, los tiempos de setup, la diversidad de productos y la secuencia de los modelos. Los valores mínimos, intermedios y máximos establecidos para el estudio de las líneas aparecen posteriormente en el apartado *Modificaciones a partir del caso base*.

A continuación, se procede a la simulación de los diferentes casos para la línea de ensamblaje. Este proceso se lleva a cabo gracias a al software *Witness*. Hay que destacar que para la simulación de los casos se utilizan dos modelos de *Witness*, uno llamado *Modelo_8_operarios* que se utiliza para los casos en los que se simulan 5 y 8 número de puestos, y otro llamado *Modelo_3_operarios* que se utiliza para el resto de casos.

En las Figs. 5 y 6 se muestra la apariencia del modelo con el software *Witness* de elementos discretos.

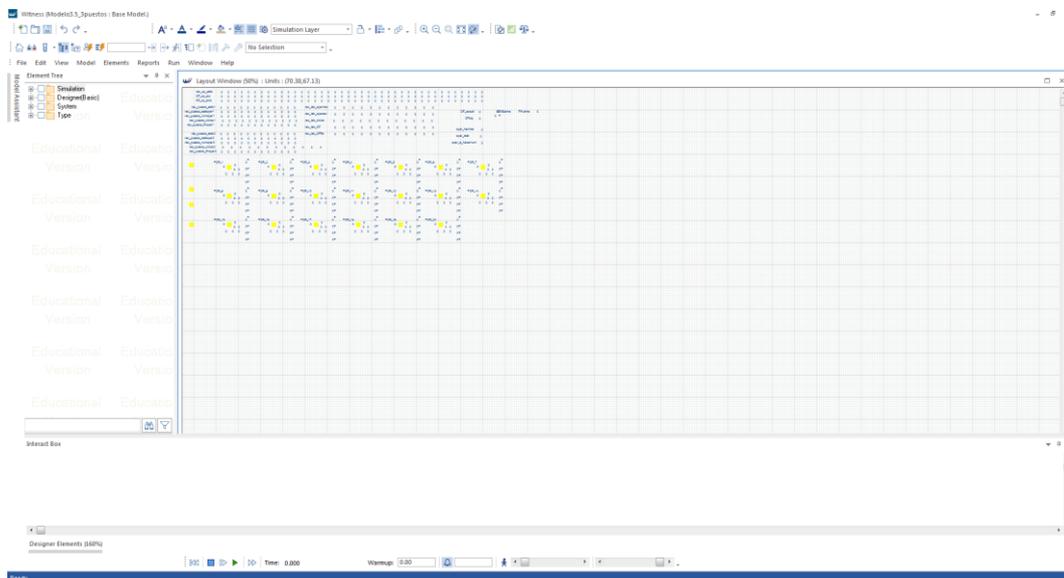


Figura 5 - Modelo_3_operarios en Witness

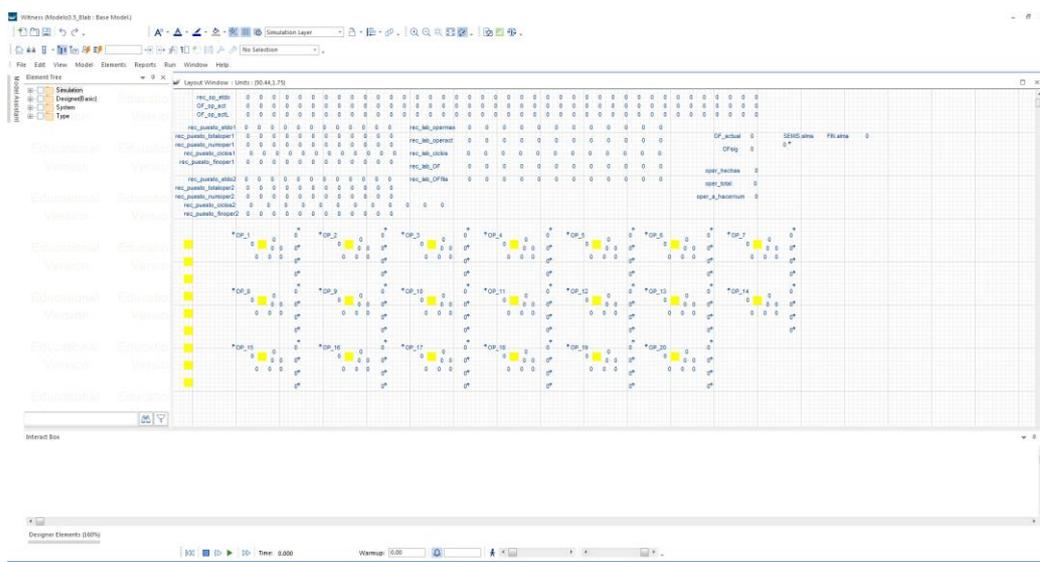


Figura 6 - Modelo_8_operarios en Witness

El programa toma los valores de los datos de entrada de *Datos.xls* y permite obtener datos de simulación semejantes a los que podrían ser obtenidos gracias a sensores situados en la línea de ensamblaje real en forma de datos de salida en cuatro ficheros de resultados *.txt*.

Estos cuatro ficheros de datos de salida reciben los nombres de: *Resultados_LB.txt*, *Resultados_Prod.txt*, *Resultados_PZ.txt*, *Resultados_TotalPZ.txt*. En ellos (ver Figs de 7 a 10), puede apreciarse los tiempos en los cuales se inicia o finaliza una orden de fabricación, la acción llevada a cabo por un operario, los controles de calidad o el número de piezas trabajadas correctamente entre otros.

Resultados_LB: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
TIME	Labor	Accion	OF_old	OF_new
10422.7094891	1	1	1	2
10592.0338663	2	1	1	2
10827.5088335	1	2	1	2
10831.4025347	3	1	1	2
11038.2799012	2	2	1	2
11326.2677729	3	2	1	2
24045.8535591	1	1	2	3
24339.1478992	2	1	2	3
24504.5785065	1	2	2	3
24550.9787221	3	1	2	3
24883.317507	2	2	2	3
25025.7397967	3	2	2	3
38139.944676	1	1	3	4
38335.7903348	2	1	3	4
38525.2528936	1	2	3	4
38586.1498921	3	1	3	4
38675.560606	2	2	3	4
38958.3080705	3	2	3	4
53382.2738691	1	1	4	5
53704.8022217	2	1	4	5
54012.7386172	1	2	4	5
54075.7601223	3	1	4	5
54300.2571016	2	2	4	5
54658.2273136	3	2	4	5
64553.4852623	1	1	5	6
64769.6377033	2	1	5	6
64840.0322973	1	2	5	6
64957.0963456	3	1	5	6
65091.4160074	2	2	5	6
65283.7610168	3	2	5	6
78332.3965071	1	1	6	7
78747.2329271	2	1	6	7
78765.5016326	1	2	6	7
78931.2099478	3	1	6	7
79217.9542423	2	2	6	7
79519.6004915	3	2	6	7
92424.3547856	1	1	7	8
92648.1954359	2	1	7	8
92823.2395842	3	1	7	8
92853.7468695	1	2	7	8
93149.4880831	2	2	7	8
93385.0455673	3	2	7	8
107345.805839	1	1	8	9

Figura 7 - Fichero *Resultados_LB*

Resultados_Prod: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
Modelos	Num pza	Tini	Tfin	qc
1	5	1	0.0	517.580267458 0
1	5	2	196.782058499	677.26309335 0
1	5	3	344.750469898	818.008476403 0
1	5	4	524.648352524	1019.47829661 0
1	5	5	692.991033189	1227.62625387 0
1	5	6	825.329303048	1376.10004695 0
1	5	7	1030.0009511	1547.17019712 0
1	5	8	1221.4957593	1760.14792301 0
1	5	9	1386.26952409	1907.49854097 0
1	5	10	1569.38728196	2080.7335617 0
1	5	11	1695.26301875	2209.52015566 0
1	5	12	1858.53854361	2377.92489603 0
1	5	13	2043.75419649	2538.50034372 0
1	5	14	2246.38836339	2781.45276833 0
1	5	15	2395.12917529	2909.58381497 0
1	5	16	2556.38756255	3110.5445086 0
1	5	17	2788.96849685	3279.77577634 0
1	5	18	2979.99099598	3526.64544817 0
1	5	19	3166.9106443	3719.77696517 0
1	5	20	3363.6279834	3879.26277577 0
1	5	21	3540.25106546	4133.72971196 0
1	5	22	3801.96299384	4336.12011735 0
1	5	23	4007.86253908	4495.21318471 0
1	5	24	4206.66333649	4728.37069414 0
1	5	25	4382.9815754	4906.9407111 0
1	5	26	4541.80904601	5069.68406951 0
1	5	27	4703.6496803	5196.15941428 0
1	5	28	4842.02036501	5370.90412559 0
1	5	29	4999.2312444	5504.38751857 0
1	5	30	5114.63824782	5670.98492427 0
1	5	31	5251.9894787	5837.36130299 0
1	5	32	5406.96559343	5974.0532868 0
1	5	33	5530.1468504	6264.38388266 0
1	5	34	5744.07146827	6417.44368031 0
1	5	35	5914.39594779	6558.97378134 0
1	5	36	6093.70650987	6736.38761563 0
1	5	37	6256.21788779	6888.98417816 0
1	5	38	6436.98712616	7044.17735615 0
1	5	39	6692.47599141	7181.64043652 0
1	5	40	6836.88705366	7382.08505021 0
1	5	41	7042.69597307	7545.34482525 0
1	5	42	7207.20697457	7741.86743575 0
1	5	43	7407.69132303	7964.93900626 0

Figura 8 - Fichero *Resultados_Prod*

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda					
TIME	OP	OF	Npieza	Accion	PIEZA	qc	Labor	Puesto	
0.0	1	1	1	1	C1	0	1	1	
196.78	1	1	1	2	S1	0	1	1	
196.78	1	1	1	3	S1	0	1	1	
196.78	2	1	1	1	S1	0	2	2	
196.78	1	1	2	1	C1	0	1	1	
344.75	1	1	2	2	S1	0	1	1	
344.75	1	1	2	3	S1	0	1	1	
344.75	1	1	3	1	C1	0	1	1	
345.89	2	1	1	2	S2	0	2	2	
345.89	2	1	1	3	S2	0	2	2	
345.89	3	1	1	1	S2	0	3	3	
345.89	2	1	2	1	S1	0	2	2	
491.55	2	1	2	2	S2	0	2	2	
491.55	2	1	2	3	S2	0	2	2	
517.58	3	1	1	2	F5	0	3	3	
517.58	3	1	1	3	F5	0	3	3	
517.58	3	1	2	1	S2	0	3	3	
524.65	1	1	3	2	S1	0	1	1	
524.65	1	1	3	3	S1	0	1	1	
524.65	2	1	3	1	S1	0	2	2	
524.65	1	1	4	1	C1	0	1	1	
677.26	3	1	2	2	F5	0	3	3	
677.26	3	1	2	3	F5	0	3	3	
688.95	2	1	3	2	S2	0	2	2	
688.95	2	1	3	3	S2	0	2	2	
688.95	3	1	3	1	S2	0	3	3	
692.99	1	1	4	2	S1	0	1	1	
692.99	1	1	4	3	S1	0	1	1	
692.99	2	1	4	1	S1	0	2	2	
692.99	1	1	5	1	C1	0	1	1	
818.01	3	1	3	2	F5	0	3	3	
818.01	3	1	3	3	F5	0	3	3	
825.33	1	1	5	2	S1	0	1	1	
825.33	1	1	5	3	S1	0	1	1	
825.33	1	1	6	1	C1	0	1	1	
850.03	2	1	4	2	S2	0	2	2	
850.03	2	1	4	3	S2	0	2	2	
850.03	3	1	4	1	S2	0	3	3	
850.03	2	1	5	1	S1	0	2	2	
1019.48	3	1	4	2	F5	0	3	3	
1019.48	3	1	4	3	F5	0	3	3	
1024.04	2	1	5	2	S2	0	2	2	
1024.04	2	1	5	3	S2	0	2	2	

Figura 9 - Fichero Resultados_PZ

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda					
DF	Tot	OK	Retr	Scr					
1	60	60	0	0					
2	60	60	0	0					
3	60	60	0	0					
4	60	60	0	0					
5	60	60	0	0					
6	60	59	0	1					
7	60	60	0	0					
8	60	60	0	0					
9	60	60	0	0					
10	60	60	0	0					
11	60	60	0	0					
12	60	60	0	0					
13	60	60	0	0					
14	60	60	0	0					
15	60	60	0	0					

Figura 10 - Fichero Resultados_TotalPZ

Por lo tanto, resumiendo lo explicado hasta ahora el esquema expuesto anteriormente puede rellenarse de la siguiente forma (ver Fig. 11):

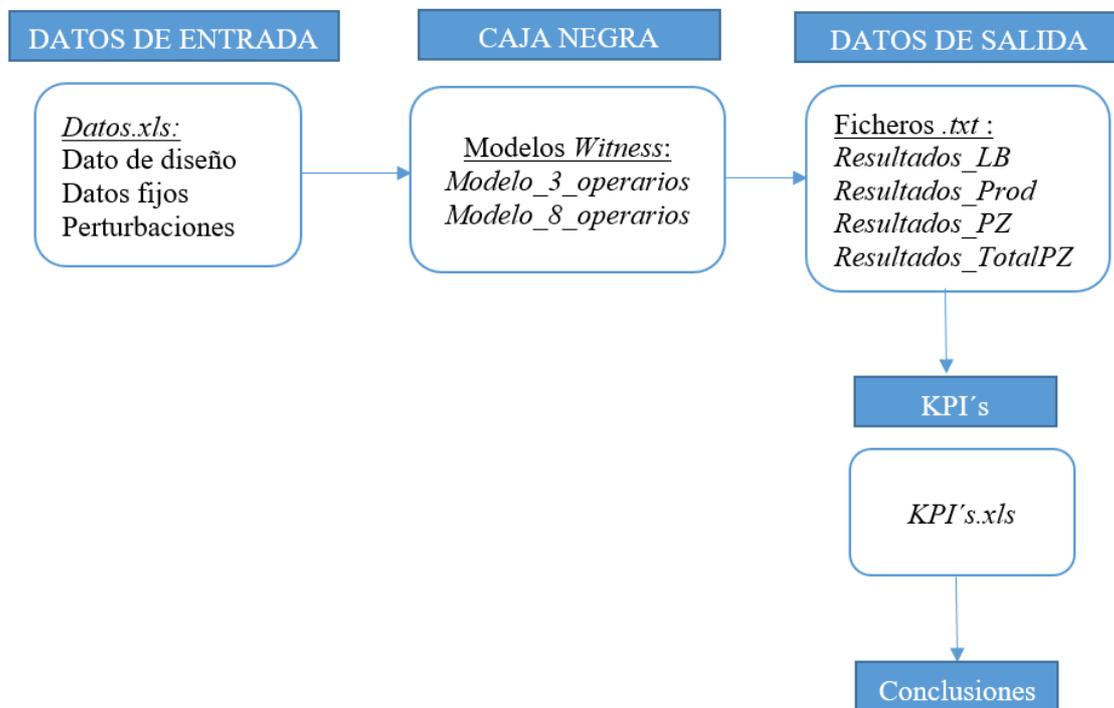


Figura 11 - Esquema metodología empleada

Por último, se procede al propósito final del proyecto, el análisis de los resultados obtenidos y la obtención de conclusiones por medio de la comparación entre los distintos valores de KPI's obtenidos, apartados que serán descritos posteriormente

4.1 Datos de entrada e indicadores clave de desempeño (KPI's).

A continuación, se presentan conceptos o definiciones (algunos se han introducido ya anteriormente) referentes a los datos de entrada y a los indicadores clave de desempeño que van a comentarse a lo largo del resto del trabajo, especialmente, en los apartados de *Análisis de resultados* y *Conclusiones*:

Datos de entrada

- Número de puestos: número de estaciones de trabajo ocupadas por operarios empleadas para la confección de un producto.
- Tamaño de lote: cantidad de unidades de un tipo de producto que se combinan en un solo lote y se fabrican de una vez sin interrupción. Ante una demanda fija, el tamaño de lote determina el número de órdenes de fabricación necesarias.
- *WIP*: unidades máximas de productos que pueden acumularse entre estaciones.
- Tiempo de ciclo: tiempo máximo necesario entre los tiempos de procesado de las estaciones de trabajo. Determina el tiempo de ritmo de producción.
- Variabilidad del tiempo de ciclo: dispersión de los valores de la variable tiempo de ciclo, determinada por diversos factores, como productividad de la mano de obra, tiempo de *change-over* etc.
- Tiempo de setup: tiempo empleado en el ajuste o preparación de una estación de trabajo para la realización de una unidad de un modelo distinto al modelo de la unidad anterior procesada.
- Tiempo de espera: tiempo transcurrido en el que en una estación no se realizan actividades que aporten valor al producto.
- Tiempo de *change-over*: tiempo compuesto por la suma del tiempo de setup y el tiempo de espera.
- *Workcontent (Wc)*: tiempo de procesado de una unidad.
- *Workcontent ratio*: rango de tiempos de procesado para una unidad. Su valor se obtiene dividiendo el mayor tiempo de procesado o *Workcontent* de un modelo entre el menor de ellos.

Indicadores clave de desempeño (KPI's)

- *Lead Time*: tiempo transcurrido entre que se ejecuta la orden de producción de un producto hasta que este se recepciona procesado.
- *Lead Time normalizado*: cociente entre el *Lead Time* y el *Workcontent* promedio.
- Productividad: se define como el cociente entre el sumatorio del *Workcontent* y el tiempo total utilizado.
- Capacidad de línea: suficiencia de la línea de ensamblaje para producir su máximo nivel de productos. La capacidad de la línea se mide en unidades por hora (u/h).
- Equilibrado de línea: cociente entre el sumatorio de tiempos de procesado de las estaciones de trabajo y el total de tiempo disponible en cada estación de trabajo (obtenido como la multiplicación del máximo *Workcontent* por el número de puestos de la línea), multiplicado por 100, es decir, en porcentaje.

- *KPI (Key Performance Indicator)*: indicador clave de desempeño que es utilizado para obtener información referente al comportamiento de un sistema.

En el siguiente listado aparecen las fórmulas matemáticas de muchos de los conceptos mencionados anteriormente que han sido utilizadas en el archivo *KPI's.xls* para la obtención del valor de los mismos:

$$\text{Lead Time normalizado} = \frac{\text{Unitd Lead Time}}{\text{WorkContent promedio}} \quad (1)$$

Donde:
$$\text{Unit Lead Time} = \frac{\text{Promedio}(\sum((T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}))}{60}$$

$$\text{WorkContent promedio} = \frac{\sum(\text{Tamaño de lote} * \text{WorkContent})}{\sum(\text{Tamaño de lote}) * 60} \quad (2)$$

$$\text{Productividad} = \frac{\sum Wc}{\text{Tiempo total empleado}} \quad (3)$$

Donde:
$$\sum Wc = \sum(\text{PiezasOk} * Wc) + \sum(\text{PiezasRetrabajadas} * Wc)$$

$$\text{Tiempo total empleado} = T_{\text{max de finalizacion}} * N^{\circ} \text{ de operarios} \quad (4)$$

$$\text{Productividad de línea} = \frac{\text{Productividad}}{N^{\circ} \text{ de operarios}} \quad (5)$$

$$\text{Capacidad de línea} = \frac{\sum(\text{PiezasOk} * \text{PiezasRetrabajadas}) * 3600}{T_{\text{max de finalizacion}}} \quad (6)$$

$$\% \text{Tiempo de setup} = \frac{\text{Tiempo total de las ordenes de fabricación}}{\text{Tiempo total empleado}} \quad (7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo total de las ordenes de fabricacion} \\ = \sum(\text{Tiempos de las ordenes de fabricación}) \end{aligned}$$

$$\% \text{Tiempo de espera} = \frac{\text{Tiempo total de espera de las ordenes de fabricación}}{\text{Tiempo total empleado}} \quad (8)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo total de espera las ordenes de fabricación} \\ = \sum(\text{Tiempo de espera de las ordenes de fabricación}) \end{aligned}$$

$$\text{FTY} = \frac{\sum \text{PiezasOk}}{\sum \text{PiezasTotal}} \quad (9)$$

$$\text{Pass Rate} = \frac{\sum \text{PiezasOk} + \sum \text{PiezasRetrabajadas}}{\sum \text{PiezasTotal}} \quad (10)$$

$$Scrap = \frac{\sum PiezasRetrabajadas}{\sum PiezasTotal} \quad (11)$$

4.2 Caso base.

Con el objetivo de que el estudio pueda adecuarse a la realidad de la empresa que proporciona las características de la línea de ensamblaje, se establece un caso base próximo a la realidad de la misma.

Esta línea está formada por tres estaciones o puestos independientes entre sí (ver Fig. 12). Cada una de ellas está ocupada por un único operario y cada uno de éstos se ocupa exclusivamente de las operaciones en su puesto. En estas estaciones, los operarios llevan a cabo las tareas de ensamblado asociadas a ese puesto. También realizan los cambios de modelo (que se introducen posteriormente) necesarios, que tienen lugar cuando finaliza la serie de fabricación de un modelo y se procede a la fabricación de otro modelo distinto.

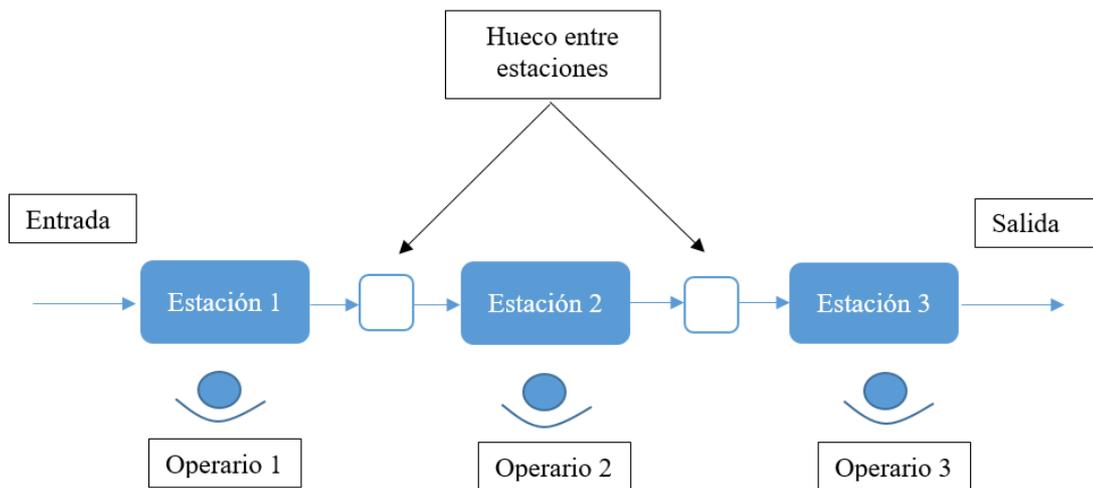


Figura 12 - Esquema línea de ensamblaje para caso base

Existe un *WIP* o número de unidades máximas de productos que pueden acumularse entre estaciones, que en esta línea es igual a una unidad. También existe la opción de realizar retrabajos intermedios y catalogar piezas como scrap lo que supone que no se realizará operación alguna en estaciones posteriores.

En cada estación, el operario realiza varias operaciones de ensamblado, que para este caso base se han agrupado (con el objetivo de simplificar el proceso) en una única operación con un tiempo total determinado por la suma de los tiempos de todas las operaciones realizadas en esa estación.

A lo largo de todos los casos de los diferentes escenarios se trabaja con 4 modelos de productos. En la Tabla 1 se presentan los tiempos (en segundos) de las tres estaciones de trabajo para cada uno de los modelos utilizados en el caso base.

	Modelo 1	Modelo 3	Modelo 5	Modelo 8
Estación 1	244,5	226,8	173,5	223,9
Estación 2	230,4	213,7	163,5	211,0
Estación 3	230,4	213,7	163,5	211,0
Workcontent	705,4	654,2	500,4	645,9

Tabla 1 – Tiempos de las estaciones para cada modelo

Cabe destacar que en el Escenario 2 (en el cual se aumenta el número de estaciones) se reagrupan las tareas de ensamblado manteniendo constante el *Workcontent* de cada modelo y se mantiene un operario por cada puesto.

Debido a las características de la línea se establece un tamaño de lote estándar para este tipo de producto en relación a la empresa: 60 unidades/lote. Además, a excepción del Escenario 6, en el cual se va a cambiar la secuencia de los modelos con el objetivo de analizar si esta tiene influencia en los valores de *KPI's*, en el resto de casos de los distintos escenarios se utiliza una secuencia ascendente en términos de *Workcontent* (5-8-3-1).

Por otro lado, para todos los casos se establece una demanda total igual o superior a 900 unidades de fabricación. De esta manera, se realizarán las 900 unidades en los casos que sean posibles (no excediendo este valor), y en las que no sea posible, se realizarán el mínimo posible de unidades de más sin romper un lote de fabricación en curso.

Al incurrir en esta política de fabricación, para el caso base, la última secuencia de productos queda interrumpida, no produciéndose el mismo número de piezas para cada modelo. A continuación, se expone la secuencia del caso base y el número de piezas fabricadas para cada modelo (ver Tabla. 2 y 3):

OF	MODELO	CANTIDAD
1	5	60
2	8	60
3	3	60
4	1	60
5	5	60
6	8	60
7	3	60
8	1	60
9	5	60
10	8	60
11	3	60
12	1	60
13	5	60
14	8	60
15	3	60
Demanda = 900 ud		

Tabla 2 – Secuencia de modelos del caso base

Cantidad total de piezas producidas	
Modelo 5	240 ud
Modelo 8	240 ud
Modelo 3	240 ud
Modelo 1	180 ud

Tabla 3 – Cantidad total de piezas producidas por modelo

En el análisis de resultados, habrá que tener en cuenta si este suceso puede ser el causante de resultados inesperados, debido a que el modelo del que se fabrican menos unidades es el de mayor *Workcontent*.

Como se ha comentado anteriormente son estaciones independientes y pueden producirse bloqueos o esperas entre las estaciones. Por ejemplo, puede darse el caso de que un operario finalice sus operaciones de ensamblado antes de que la estación posterior quede libre (provocando un bloqueo) o puede darse el caso contrario, que la estación posterior finalice sus tareas de ensamblado con anterioridad a que, en la estación de trabajo que le precede se hayan terminado las operaciones de ensamblado correspondientes (provocando una espera).

También puede producirse que al mismo tiempo que un operario este realizando operaciones de ensamblado de una pieza, en la estación posterior, el siguiente operario este realizando operaciones de cambio de modelo para esa pieza.

En la línea, se llevan a cabo dos controles de calidad: en el caso base los controles de calidad se sitúan al final de las estaciones 2 y 3, aunque como se explica posteriormente, en el escenario 2 (en el cual se modifica el número de puestos de la línea), al variar el número de estaciones, varía la posición de los controles de calidad. Estos controles de calidad permiten detectar defectos o irregularidades en las piezas y determinaran la cantidad de piezas fabricadas correctamente, cuales necesitan retrabajos y aquellas que forman parte de un pequeño porcentaje de piezas que van a scrap (desecho).

Los tiempos de cambio de modelo vienen proporcionados por la empresa y se muestran en la siguiente tabla (ver Tabla 4):

OP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	504	474	552	558	654	576	516	504
2	498	456	576	588	678	558	540	456
3	480	480	486	570	552	588	528	516
4	462	426	474	486	576	498	468	426
5	426	390	432	468	486	480	432	408
6	444	402	474	486	576	438	444	402
7	480	444	510	516	612	534	486	462
8	480	438	546	558	648	528	510	438

Tabla 4 - Tiempos de cambio de modelo caso base.

En la Tabla 4, se presentan los tiempos (en segundos) necesarios para realizar todas las combinaciones de cambios de modelo posibles. En color negro se presentan los tiempos correspondientes a los modelos utilizados en este estudio; en color gris, tiempos correspondientes a otros modelos irrelevantes para este estudio. En dicha tabla, las columnas representan el modelo de entrada y las filas, el modelo de salida. Así, por ejemplo, para el caso de un cambio de modelo en el que el modelo de entrada es el 1 y el modelo de salida es el 3, el tiempo de setup o ajuste es de 480 segundos.

Destacar que para la simulación del caso base, se establece una variabilidad del tiempo de ciclo que se asemeja a los datos obtenidos por la empresa: 15% de variabilidad.

La simulación de esta línea permite obtener unos *KPI's* (ver Tabla 5). Analizando los resultados obtenidos, se observa una elevada productividad con un valor del 92%, como consecuencia del tamaño de lote procesado, del número de estaciones de la línea y del orden de la secuencia de modelos. Los tiempos de setup proporcionados por la empresa representan un pequeño porcentaje respecto al tiempo total de procesado. Teniendo en cuenta la productividad obtenida y las características de los productos procesados y de la línea, se observa una alta capacidad de línea con aproximadamente 16 unidades a la hora. En relación a todo lo anterior, el valor del Lead Time muy aceptable relativamente próximo a la unidad.

KPI's Caso base	
Lead Time normalizado	1,14
Productividad (%)	92%
Capacidad de línea (u/h)	16,08
%Tiempo de setup	3,50%
% Timpo de change-over	3,66%

Tabla 5 – KPI's obtenidos para el caso base

Tras observar los resultados obtenidos se plantean una serie de factores que pueden influir en ellos. Los factores que se consideran más determinantes en estos *KPI's* son: el tamaño de lote, el número de puestos o estaciones, la variabilidad del tiempo de ciclo, el porcentaje del tiempo de setup, la diversidad de productos y la secuencia de ejecución de los modelos.

Se tratan de factores que pueden sufrir variaciones que simulen tanto alteraciones que puedan ocurrir en la realidad de la empresa (caso de la variabilidad), como tomas de decisiones que puedan darse en un momento dado por parte de la misma (tamaño de lote, número de puestos, orden de los modelos etc.).

Resumiendo los parámetros establecidos anteriormente, los valores del caso base quedan según la Tabla 6.

Modelo	Numero de puestos	Tamaño de lote	WorkContent (s)	Tiempo de setup (s)
5	3	60	500,4	Base
8	3	60	645,9	Base
3	3	60	654,2	Base
1	3	60	705,4	Base

Tabla 6 - Datos de entrada del caso base

4.3 Modificaciones a partir del caso base.

Con el objetivo analizar cómo afectan variaciones de estos factores determinantes en los valores de los *KPI's* obtenidos en la línea para el caso base, se realizan modificaciones de los datos de entrada con los que se espera obtener diferentes resultados en términos de *KPI's* y así, poder establecer conclusiones.

Se establecen seis escenarios en los cuales se escoge un factor a modificar y el resto permanecen constantes con respecto a los valores del caso base. A continuación, se presentan los escenarios y los datos de entrada que se modifican:

- Escenario 1: Tamaño de lote
- Escenario 2: Número de puestos
- Escenario 3: Variabilidad del tiempo de ciclo
- Escenario 4: Tiempos de setup
- Escenario 5: Diversidad de productos
- Escenario 6: Diferentes secuencias frente al tamaño de lote.

4.3.1 Escenario 1: Tamaño de lote.

A priori, lotes más pequeños de productos permiten a las empresas flexibilizar la producción, aumentar la calidad de los productos y disminuir los plazos de entrega, pero a su vez (ante una demanda fija) incurrir en mayores ordenes de fabricación que incrementan el porcentaje de tiempo dedicado al setup o ajuste de los puestos de trabajo, y por lo tanto disminuyen el valor de la productividad de la línea.

El propósito del estudio de la variable tamaño de lote es determinar si existe un lote óptimo de fabricación para este caso, qué inconvenientes generan los lotes grandes de fabricación, o si, de alguna manera, grandes variaciones en las cantidades de los tamaños de lotes no varían considerablemente los resultados obtenidos en términos de productividad y *Lead Time*, es decir, si el tiempo transcurrido entre que se ejecuta la orden de fabricación de un producto y se recepciona, viene determinado por el tamaño de los lotes de fabricación.

Para este estudio se escogen valores tanto inferiores como superiores al caso base y el resto de factores se mantienen constantes respecto al caso base. Los tamaños de lote escogidos se presentan en la Tabla 7.

Tamaño de lote
Lote 20
Lote 40
Lote 60
Lote 90
Lote 120

Tabla 7 - Modificaciones tamaño de lote

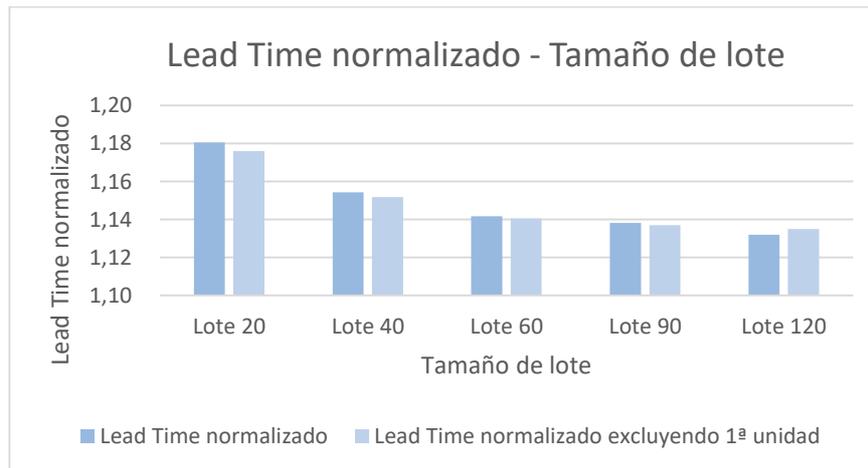
Debido a que la demanda debe ser igual o superior a 900 unidades, el número de unidades realizadas para cada modelo no es igual en todos los casos (varia ligeramente en función del lote escogido). Para los casos de Lote 20, Lote 60 y Lote 90 se fabrican un total de 900 unidades; para los casos de Lote 40 y Lote 120, se fabrican 920 y 960 unidades respectivamente (con el fin de producir lotes completos). Por lo tanto, el tamaño de lote determina el número de órdenes de fabricación. Estas órdenes de fabricación siguen la secuencia ascendente ya mencionada anteriormente en el caso base (5-8-3-1).

En conclusión, el tamaño de lote determina el número de órdenes de fabricación, y si esta cantidad no es múltiplo del número de modelos utilizados (4), la última secuencia se verá

interrumpida. Ahora, se trata de analizar cómo afectan las variaciones del tamaño de lote en los diferentes *KPI's* y si todo lo expuesto hasta el momento puede influir en los resultados obtenidos.

Análisis escenario 1: Tamaño de lote

En la Gráfica 1 se presentan los valores de *Lead Time* normalizado (*LTN*) y *Lead Time* normalizado excluyendo la 1ª unidad (*LTNI*) para los diferentes tamaños de lote. En ella se ven los dos indicadores a medida que se aumenta el tamaño de lote utilizado, para una demanda constante.

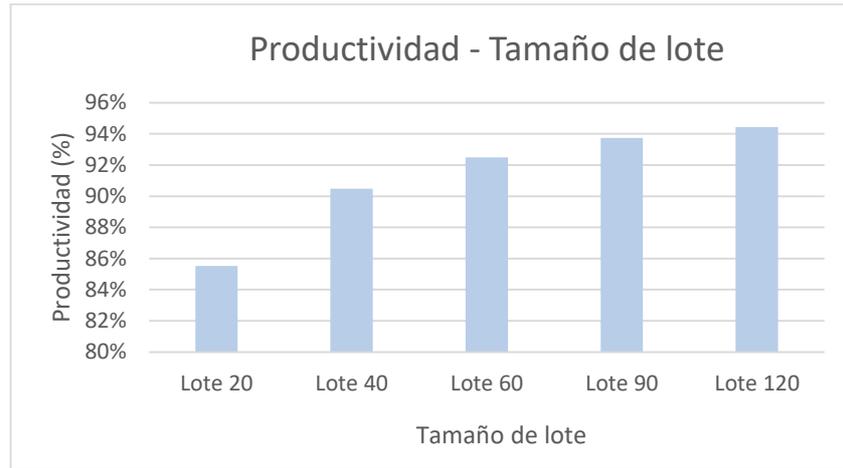


Gráfica 1: LTN y LTNI vs tamaño de lote

También se observa que conforme aumenta el tamaño de lote, esta disminución es cada vez menor. Por su parte, *LTNI* disminuye de manera similar *LTN* y no se observa una diferencia significativa entre el comportamiento de ambas situaciones ante el cambio del tamaño de lote. Esto se debe a que la suma del porcentaje de tiempo de la primera unidad y del tiempo de setup es irrelevante respecto al tiempo total de producción.

En cuanto a si existe un lote óptimo de fabricación para esta línea de ensamblaje, si se omiten las ventajas que presenta fabricar en lotes pequeños y se atiende únicamente a los valores obtenidos para estos indicadores, ante una demanda igual o mayor a 900 piezas, para fabricar al menos una vez cada modelo, el lote óptimo es de 120 unidades.

La *productividad* de la línea de ensamblaje aumenta conforme aumenta el tamaño de lote utilizado para una demanda constante (ver Gráfica 2). Este aumento de la productividad se debe a que, al aumentar las unidades del lote, se realizan menos cambios de modelo, lo que supone una disminución de los tiempos dedicados al ajuste o preparación de estos y de los tiempos de espera.

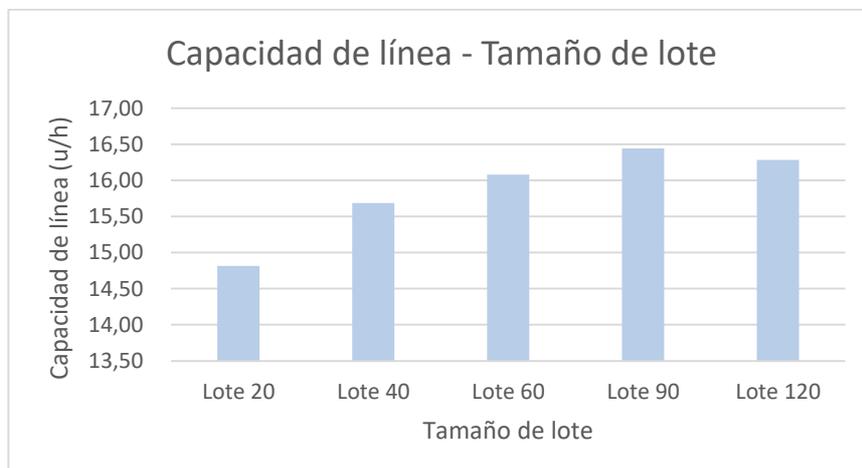


Gráfica 2: Productividad vs tamaño de lote

A medida que aumentamos el tamaño de lote, la productividad crece en menor medida, es decir, la diferencia en el aumento de productividad es mayor para tamaños de lote más pequeños. Si se comparan, por ejemplo, los valores obtenidos para los casos de tamaño de lote 20 y tamaño de lote 40, observamos una diferencia de alrededor del 5% de productividad; si comparamos los valores obtenidos para los casos de tamaño de lote 90 y tamaño de lote 120, esta diferencia es inferior al 1%. Por lo tanto, aumentar el lote por encima de 120 unidades no va a suponer mejoras significativas en términos de productividad.

La relevancia de la dimensión de un lote es mayor para lotes más pequeños donde un menor aumento de la agrupación de unidades a fabricar supone un mayor incremento de la productividad, debido a que al aumentar el tamaño de lote existe una menor repetitividad de los procesos de cambio de modelo, que son los causantes de la disminución de la productividad.

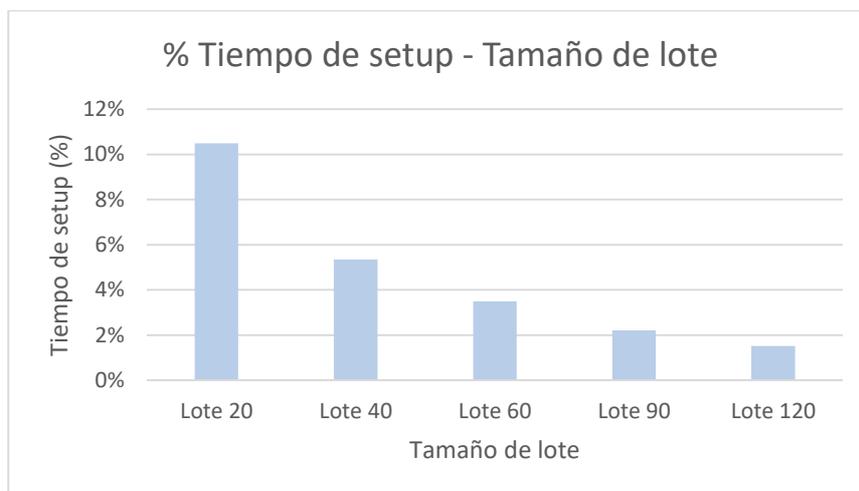
La *capacidad de la línea* aumenta a medida que aumenta el tamaño de lote (Gráfica 3). Eso es debido a que al disminuir el *Lead Time*, la línea de ensamblaje produce más unidades a la hora, al ser menor el tiempo transcurrido entre que se ejecuta la orden hasta que se procesa. Para el caso de lote 120, se aprecia una disminución con respecto al caso de lote 90, a pesar de que se produce un aumento de la productividad. Su principal causa se debe a que existe una mayor proporción de controles de calidad, que se traduce en un incremento de los tiempos de espera.



Gráfica 3: Capacidad de línea vs tamaño de lote

Según se muestra en la Gráfica 4, el *porcentaje de tiempo de setup* disminuye a medida que se aumenta el tamaño de lote utilizado para una demanda constante. Este resultado se debe a que conforme este tamaño de lote aumenta, disminuye la cantidad de cambios de modelo que se realizan y por lo tanto disminuye el porcentaje de tiempo de setup.

Para lotes muy pequeños en relación a la demanda, este porcentaje de tiempo es considerablemente alto (entorno al 10% respecto al tiempo total para el caso de lote 20), debido a la gran repetitividad del proceso de ajuste para las estaciones de trabajo. Por otro lado, es más pequeño en tamaños grandes de lote (inferior al 2% respecto al tiempo total para el caso de lote 120), donde estos cambios de modelo ocurren cada más tiempo.



Gráfica 4: %Tiempo de setup vs tamaño de lote

Por lo tanto, se puede afirmar que aumentar el tamaño de lote de producción disminuye el porcentaje de tiempo dedicado a la preparación de los puestos de trabajo con respecto al tiempo total de producción, aunque las mejoras en términos de porcentaje se van haciendo cada vez más pequeñas al aumentar el tamaño de lote.

Finalmente, se puede concluir que, ante el aumento del tamaño de lote, se consigue un aumento de la productividad y de la capacidad de la línea, y una disminución del *Lead Time* y del porcentaje de tiempo dedicado al setup.

4.3.2 Escenario 2: Número de puestos.

Debido a que el mínimo de estaciones necesarias para el ensamblaje de los productos es de 3 estaciones (con 1 operario por estación), el objetivo de estudiar el número de puestos de la línea es conocer si el valor extraído de la realidad de la empresa es el que maximiza el valor de productividad de la línea y minimiza el valor de *Lead Time* por unidad, o por el contrario puede aumentarse el valor de la productividad y disminuirse el valor del *Lead Time* aumentando el número de estaciones (y por tanto el número de operarios que trabajan en la línea), dividiendo el trabajo necesario para ensamblar el producto entre más operarios. Así, se propone analizar la influencia de estos indicadores clave de desempeño para los siguientes casos, tal y como se observa en la Tabla 7:

Número de puestos
3 operarios
5 operarios
8 operarios

Tabla 7 - Modificaciones Número de puestos

Anteriormente, en el caso base se han definido los tiempos de ejecución de las operaciones de ensamblado agrupados en un tiempo total para cada estación. En este escenario, al modificar el número de puestos (5 operarios y 8 operarios) se mantiene constante el *Workcontent* de cada modelo y los tiempos de cada una de las estaciones se obtienen al dividir el *Workcontent* de cada modelo entre el número de estaciones dependiendo del caso analizado y aplicando a este valor una variación aleatoria (utilizando la función Aleatorio de *Excel* con un valor del 2%).

De esta manera, el tiempo de procesado de cada estación para los casos de 5 y 8 operarios puede observarse en las siguientes tablas (Tabla 8 y 9) con los tiempos expresados en segundos:

	Modelo 1	Modelo 3	Modelo 5	Modelo 8
Estacion 1	144,2	136,4	103,7	132,5
Estacion 2	140,6	129,6	99,3	127,2
Estacion 3	139,5	128,6	99,8	128,8
Estacion 4	140,7	129,3	99,4	128,4
Estacion 5	140,3	130,3	98,1	129,0
Wotkcontent	705,4	654,2	500,4	645,9

Tabla 8 – Tiempos de proceso de las estaciones para cada modelo (caso 5 operarios)

	Modelo 1	Modelo 3	Modelo 5	Modelo 8
Estacion 1	88,2	81,8	62,5	81,2
Estacion 2	88,5	80,3	62,3	80,7
Estacion 3	88,1	83,9	61,5	80,1
Estacion 4	87,9	79,3	61,2	80,6
Estacion 5	88,2	81,9	63,4	80,8
Estacion 6	87,5	82,3	64,1	80,7
Estacion 7	88,3	82,5	62,2	81,2
Estacion 8	88,7	82,2	63,2	80,6
Workcontent	705,4	654,2	500,4	645,9

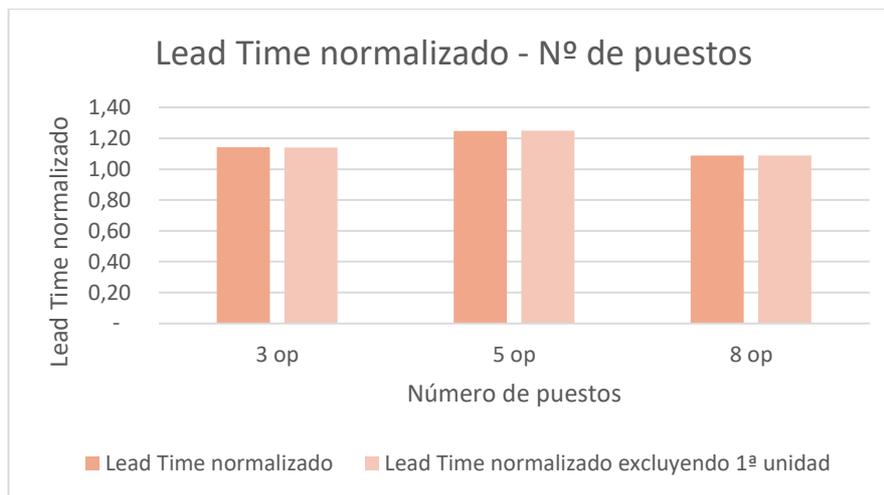
Tabla 9 – Tiempos de proceso de las estaciones para cada modelo (caso 8 operarios)

Análisis Escenario 2: Número de puestos

Los resultados de *LTN* y *LTNI* aumentando el número de puestos (ver Gráfica 5) se mantienen prácticamente constantes. Se aprecian pequeñas variaciones respecto al número de puestos que pueden considerarse despreciables. Por ello, el aumento del número de puestos de trabajo y del número de operarios, no disminuye significativamente el tiempo entre que se inicia la orden de fabricación de un producto y éste se recibe como procesado. Este aumento de número de puestos conlleva que los tiempos de procesado de cada estación bajen, pero el tiempo global se mantiene prácticamente

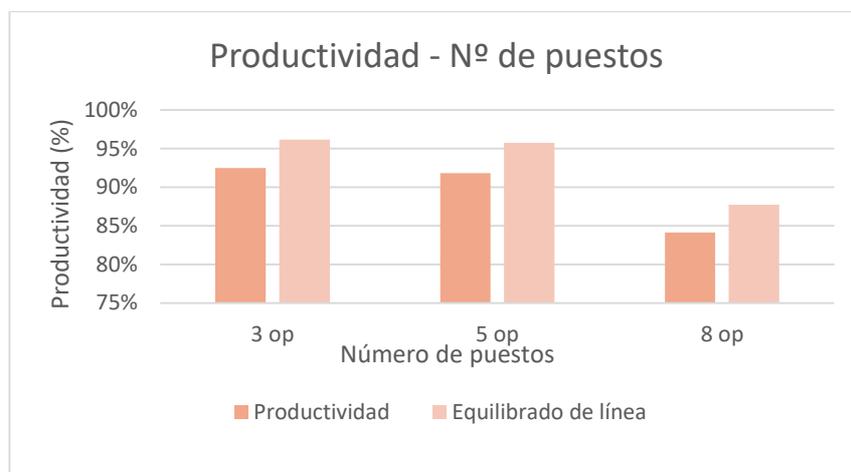
constante y no se produce un aumento de los tiempos de esperas. La disminución para el caso de 8 operarios puede deberse a la variabilidad del proceso.

La diferencia entre los valores de *LTN* y *LTNI* es nula para cada caso donde varía el número de puestos. La eliminación del tiempo de ajuste de las estaciones de trabajo y de la primera unidad no tienen influencia debido en los resultados obtenidos debido a que el porcentaje de tiempo de la primera unidad y el tiempo dedicado al setup son despreciable respecto al tiempo total de fabricación.



Gráfica 5: *LTN* y *LTNI* vs Número de puestos

Respecto a la influencia del n° de puestos en la *productividad* que aparece en la Gráfica 6, destacan dos aspectos. En primer lugar, esta productividad alcanza valores inferiores al equilibrado en todos los casos; en segundo lugar, la productividad y el equilibrado siguen la misma tendencia. Esto es lo que cabría esperar y demuestra la coherencia de los resultados obtenidos: la productividad nunca puede ser mayor que el equilibrado de la línea debido a que depende de las pérdidas por esperas y setup y de la variabilidad del tiempo de ciclo del equilibrado y, por lo tanto, si el equilibrado disminuye, la productividad debe hacerlo.



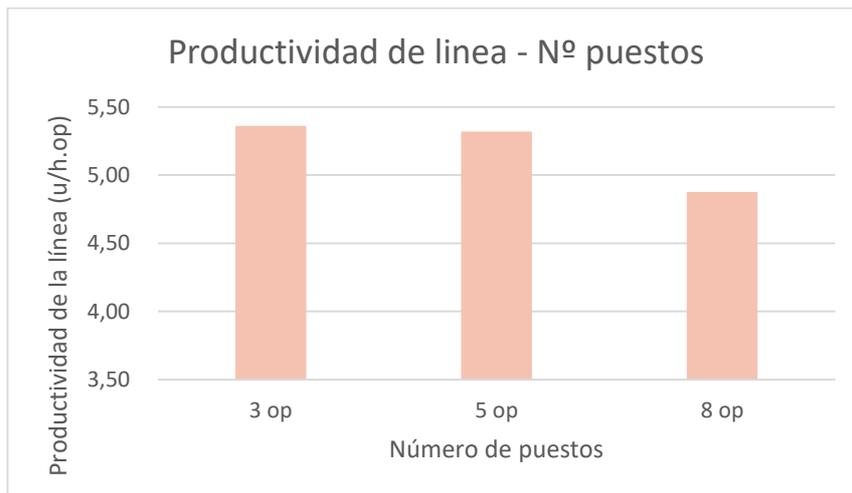
Gráfica 6: Productividad vs Número de puestos

El pasar de 3 a 5 puestos no supone una pérdida significativa de productividad; por el contrario, al pasar a 8 puestos de trabajo, el valor de la productividad decrece considerablemente y el motivo podría deberse a la disminución del equilibrado. Este efecto es debido al aumento de la desincronización de la carga de trabajo de los puestos, hay más huecos entre estaciones y surgen más esperas.

Como se ha explicado con anterioridad, siendo tres el mínimo de puestos necesarios para ensamblar los productos, el caso de 3 operarios es el que mejores valores de productividad otorga. Por lo tanto, no se puede aumentar la productividad de la línea por encima de valores del 92% añadiendo puestos.

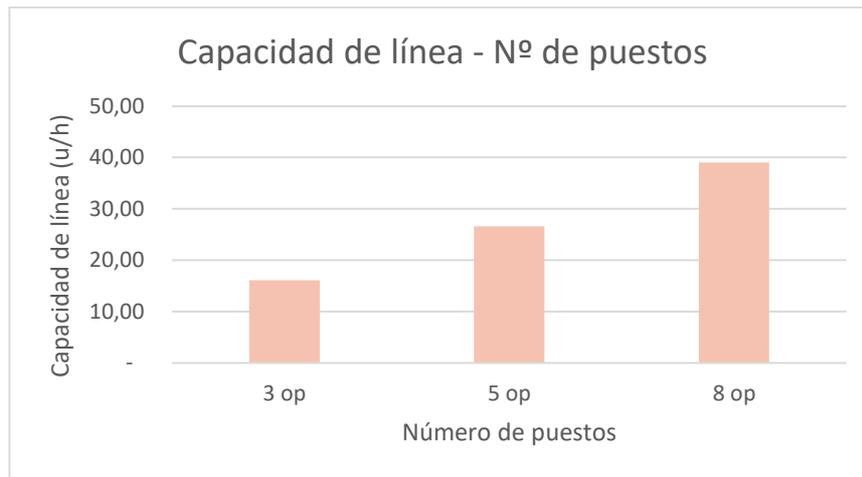
En el Gráfico 7 se representa la *productividad* obtenida en el gráfico 6 dividida entre el número de operarios de cada caso (se denomina productividad de línea) respecto al nº de puestos. Esta grafica aporta información más relevante que la gráfica anterior, ya que se tienen en cuenta el número de operarios y da un valor del coste monetario por empleado.

De manera similar a lo sucedido en el Gráfico 6 (productividad) ésta se mantiene prácticamente constante al pasar de 3 a 5 operarios y disminuye al pasar a 8 operarios debido a la disminución del equilibrado.



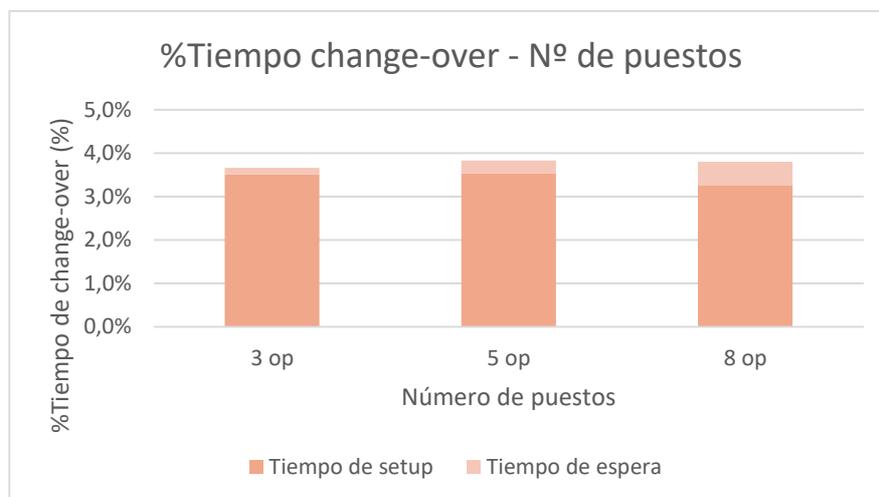
Gráfica 7: Productividad de línea vs Número de puestos

Como era de esperar, la *capacidad de la línea* incrementa al aumentar el número de operarios (Gráfica 8). Un mayor número de operarios es capaz de producir más unidades por hora ya que, ante un lead time constante, aumentar el número de operarios provoca un aumento de las unidades fabricadas por hora. Este aumento no se produce de forma lineal, debido a que como se ha visto en Gráfica 6, para el caso de 8 operarios la productividad decae.



Gráfica 8: Capacidad de línea vs Número de puestos

A la hora del tiempo de cambio, el *tiempo total de cambio* de modelo se mantiene constante independiente del número de operarios ya que se considera que las operaciones de reconfiguración de los equipos son las mismas. Cuando hay más operarios, las operaciones se reparten entre ellos, lo que supone que cada uno realiza menores labores de ajuste. Con todo eso, cabe esperar un porcentaje de tiempo de setup constante. Según se ve en el Gráfico 9, este porcentaje no es el mismo, aunque la variación es pequeña; la caída de este porcentaje para el caso de 8 operarios podría deberse a que el reparto de estos tiempos no es completamente equilibrado.



Gráfica 9: %Tiempo change-over vs Número de puestos

Además, se observa como el tiempo de espera aumenta conforme se aumenta el número de puestos en la línea: el equilibrado disminuye, se produce mayor desincronización entre puestos, hay más huecos entre estaciones y esto se traduce en más esperas,

En conclusión, el *Lead Time* se mantiene constante al aumentar el número de puestos de la línea. La productividad se mantiene prácticamente constante para los casos de 3 y 5 operarios y disminuye para el caso de 8 operarios debido a la disminución del equilibrado. Y ante el aumento del número de puestos, el tiempo de setup se mantiene constante y el tiempo de espera aumenta ligeramente.

4.3.3 Escenario 3: Variabilidad del tiempo de ciclo.

El porcentaje de variabilidad de los procesos de un operario determina los problemas de fiabilidad del proceso total, en cuanto a preparación del puesto, tiempos de ajuste o espera, suministro de materias primas, defectos de calidad y, en general, cualquier condicionante tanto interno como externo que forme parte del proceso [9]. Por lo tanto, es relevante conocer cómo se comportan los diferentes *KPI's* en función de este porcentaje de variabilidad, que en este estudio se manifiesta en el tiempo de ciclo. Es decir, es importante preguntarse si la variación del tiempo de ejecución de los procesos de cada estación (tiempos de ciclo) determina el *Lead Time*, la cantidad producida (capacidad de línea) o si, por ejemplo, es determinante en términos de productividad.

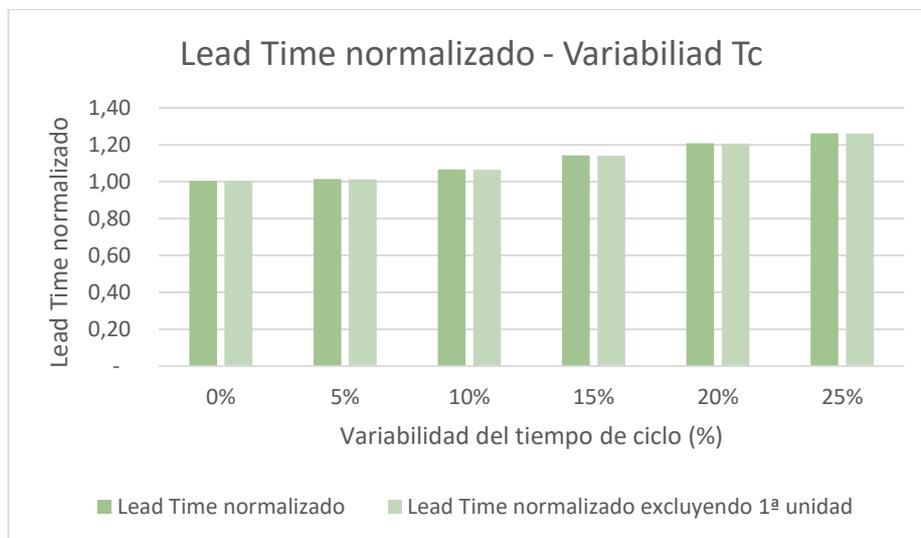
Así, se establecen los siguientes valores de porcentaje de variabilidad del tiempo de ciclo que pueden ajustarse a la realidad de la empresa, considerando como poco probables valores superiores al 25% de variabilidad (ver Tabla 10):

Variabilidad del Tiempo de ciclo (%)
0
5
10
15
20
25

Tabla 10 - Modificaciones Variabilidad del Tiempo de ciclo

Análisis Escenario 3: Variabilidad del tiempo de ciclo (T_c)

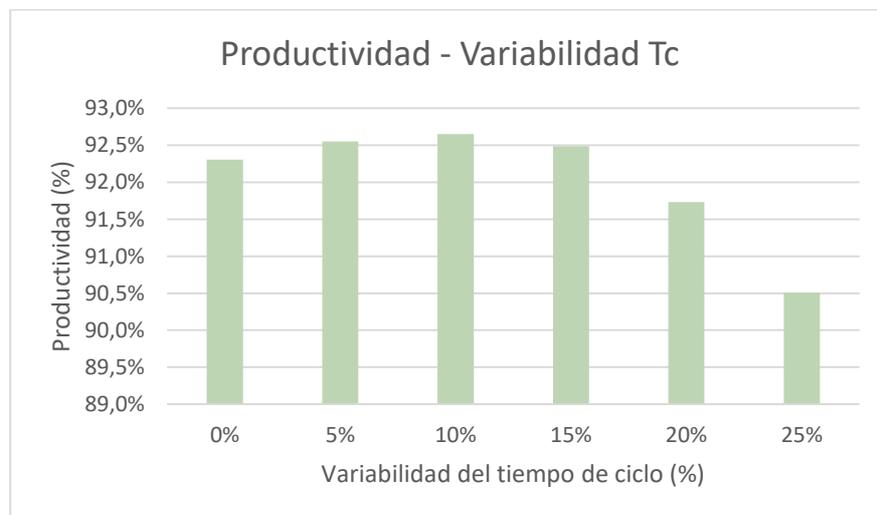
Tal y como se puede ver en el Gráfico 10, tanto el *LTN* como el *LTNI* aumentan a medida que la variabilidad del tiempo de ciclo incrementa, aumentando considerablemente desde el caso ideal de 0% de variabilidad hasta el caso límite estudiado de 25% de variabilidad. Por lo tanto, esta variación en los tiempos de ejecución del proceso es determinante en el tiempo necesario transcurrido entre que se ejecuta la orden de fabricación del producto y este se procesa.



Gráfica 10: LTN y LTNI vs Variabilidad del tiempo de ciclo

Comparando escenarios para un mismo porcentaje de variabilidad, obtenemos similares resultados en ambos indicadores, por lo que se puede afirmar que excluir la 1ª unidad del lote no afecta al *Lead Time* para diferentes escenarios de variabilidad a causa de que el porcentaje de tiempo que esta unidad representa respecto al tiempo total de fabricación es despreciable.

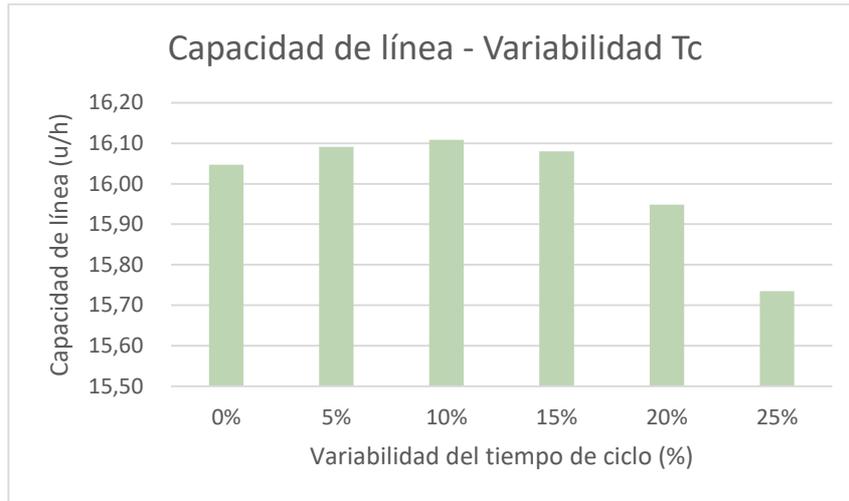
En el caso de la *productividad* (Gráfico 11), ésta aumenta muy ligeramente hasta valores cercanos entorno al 10% de variabilidad del tiempo de ciclo y, por lo tanto, no influye de manera negativa. A partir de estos valores, la productividad disminuye más rápidamente. Hay que destacar, que los valores de la productividad obtenidos varían entre el 92.5% y el 90.5% siendo las variaciones muy reducidas.



Gráfica 11: Productividad vs Variabilidad del tiempo de ciclo

El motivo por el cual los valores obtenidos en productividad no empiezan a decaer hasta valores superiores al 10% de variabilidad se debe a una menor proporción de los controles de calidad que originan un descenso del porcentaje de tiempo de esperas y por lo tanto un ligero aumento de la productividad. A partir de dicho valor de variabilidad, la línea mantiene porcentajes estándar de controles de calidad y se obtienen los resultados esperados.

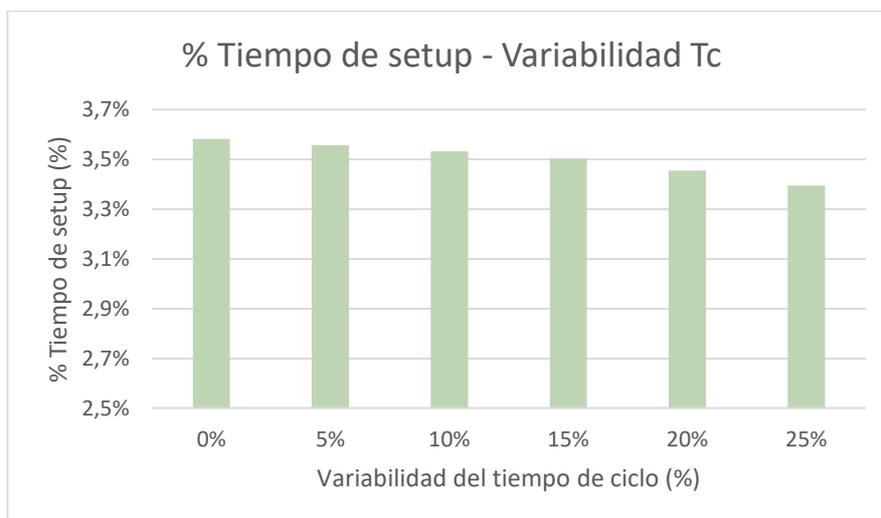
Algo similar sucede con la *capacidad de línea* (Gráfico 12). Esta, aumenta ligeramente hasta valores entorno al 10% de variabilidad del tiempo de ciclo y, a partir de este valor, la capacidad de línea disminuye más rápidamente para valores superiores de variabilidad.



Gráfica 12: Capacidad de línea vs Variabilidad del tiempo de ciclo

Destacar que las variaciones obtenidas en el peor de los casos representan aproximadamente media pieza menos por hora; de nuevo se trata de variaciones muy escasas. Aun así, se puede afirmar que el aumento de la capacidad de línea está determinado por la productividad obtenida, que, como se ha explicado en el gráfico 12, depende del porcentaje de controles de calidad que originan esperas.

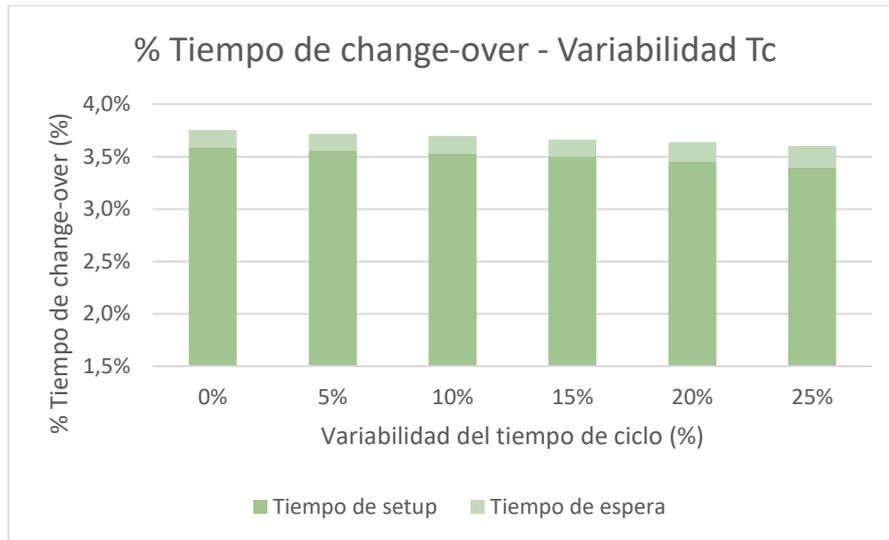
El *% de tiempo de setup* disminuye muy ligeramente ante significativos cambios de variabilidad del tiempo de ciclo. Como se ha introducido en el Gráfico 13 correspondiente a *LTN*, la variabilidad del tiempo de ciclo no representa una influencia importante en el proceso de ajuste o preparación de los puestos de trabajo. Además, el aumento del porcentaje de variabilidad, provoca que exista menos tiempo porcentualmente para realizar setup, es decir, se dedica más tiempo a otras acciones y esto explica la tendencia negativa ante el aumento de la variabilidad.



Gráfica 13: %Tiempo de setup vs Variabilidad del tiempo de ciclo

Por último, en la Gráfica 14 se representa el *tiempo de change-over* (compuesto por la suma del tiempo de setup y el tiempo de espera) y puede observarse como, el tiempo de espera es prácticamente constante ante el aumento de la variabilidad. Esto se debe a que los porcentajes de los tiempos de espera son tan pequeños en comparación con el tiempo

total de producción que, ligeras variaciones de estos, no son significativamente apreciables.



Gráfica 14: %Tiempo de change-over vs Variabilidad del tiempo de ciclo

En conclusión, el aumento del porcentaje de la variabilidad del tiempo de ciclo no hace variar de manera relevante los *KPI's* obtenidos. Solamente el *LTN* sufre un cambio significativo ante un considerable aumento del valor de variabilidad.

4.3.4 Escenario 4: Tiempo de setup.

El tiempo de setup es aquel dedicado al ajuste o preparación de las diferentes estaciones de trabajo de la línea para el ensamblado de un nuevo modelo, sin incurrir en pérdida de calidad o costos de ningún tipo. Es por ello que cobra una gran importancia en las actuales organizaciones industriales. El propósito del estudio de este caso es determinar si es razonable invertir recursos para disminuir los tiempos de cambio de modelos proporcionados por la empresa, debido a que estos logran disminuir significativamente el tiempo de procesado de productos, rentabilizando la inversión, o si, por el contrario, valores considerablemente superiores de tiempos de cambio de modelo no afectan a este parámetro de manera determinante.

Para ello, se modifican los valores iniciales de tiempos de cambio de modelo del caso base multiplicándolos por la siguiente serie de factores que se consideran de interés(ver Tabla 11):

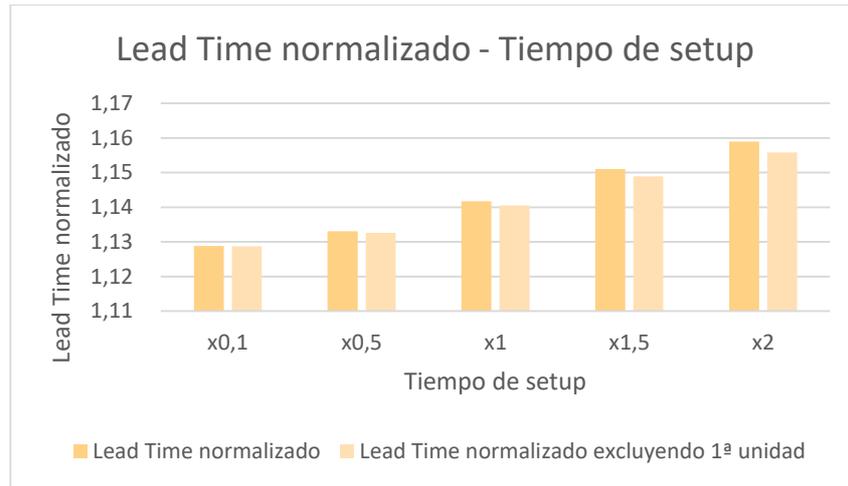
Tiempos de setup
Base x 0.1
Base x 0.5
Base
Base x 1.5
Base x 2

Tabla 11 - Modificaciones Tiempos de setup

Los valores de tiempos de cambio de modelo para los casos mencionados anteriormente se recogen en el Anexo 2.

Análisis Escenario 4: Tiempo de setup

Al aumentar los tiempos dedicados a la preparación de los modelos (**TS**), tanto el valor del *LTN* como *LTNI* aumentan, ya que estos tiempos de setup forman parte del proceso completo y, por lo tanto, al aumentar los tiempos de setup aumenta el tiempo total (ver Gráfica 15):

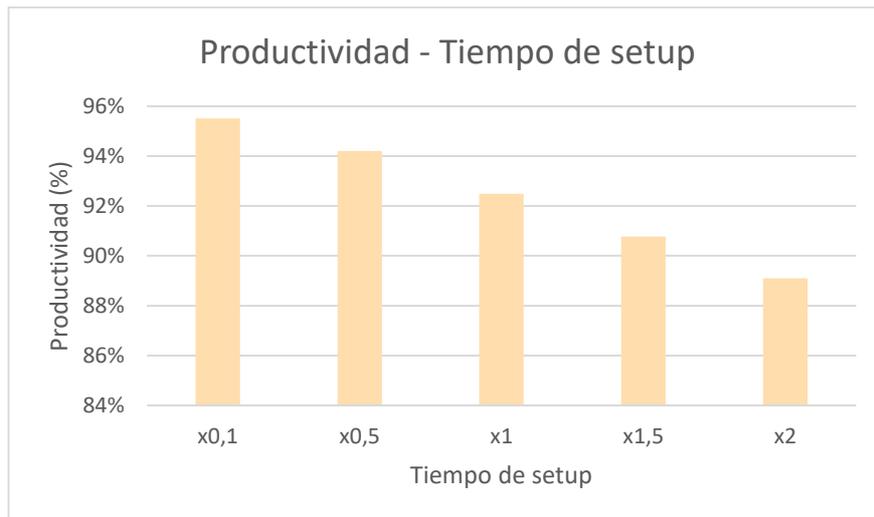


Gráfica 15: *LTN* y *LTNI* vs Tiempo de setup

Comparando los valores de *LTN* y *LTNI* ante los mismos tiempos de setup, se observan diferencias, las cuales se deben a que precisamente al eliminar esa primera unidad se elimina a su vez el tiempo dedicado al setup o ajuste de los puestos de trabajo y, por lo tanto, hace que el tiempo transcurrido varíe de un caso a otro, siendo menor.

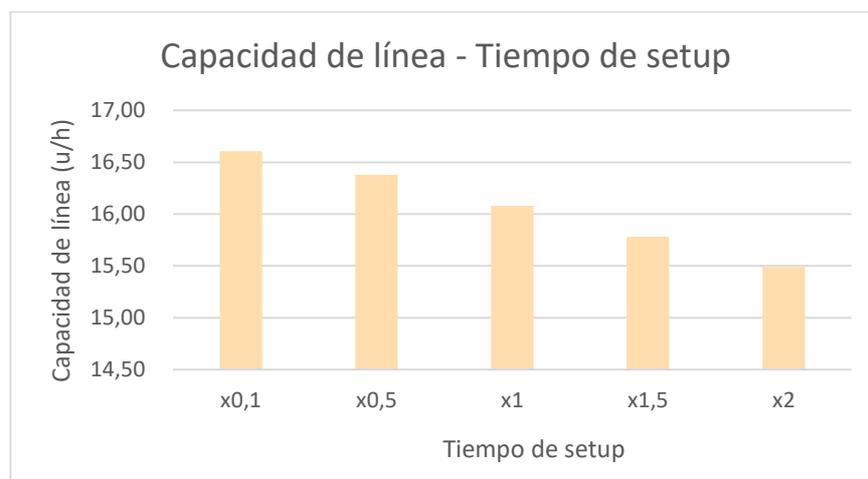
Si se analiza lo que ocurre al disminuir o aumentar los tiempos de cambio de modelo respecto al caso base, disminuir 10 veces el tiempo de setup disminuye el *LT* (pasando de un valor de 1.14 a 1.13), pero no de manera demasiado significativa. Sin embargo, aumentar los tiempos de setup al doble del caso base ya supone una mayor diferencia respecto al caso anterior (pasando de 1.14 a 1.16). Por lo tanto, partiendo del caso base, invertir esfuerzos en disminuir los tiempos de setup no va a ayudar a disminuir significativamente el tiempo de procesado de los productos.

Como era esperado, al aumentar el tiempo de setup, la *productividad* decae (Gráfico 16): el incremento de TS disminuye la productividad de la mano de obra. El gran esfuerzo que podría suponer disminuir en 10 veces menos el tiempo de setup, supone un ligero aumento de la productividad de la línea. Sin embargo, el aumento del doble de tiempo supondría esa misma diferencia. Por ello, no conviene invertir esfuerzos en disminuir tiempos, pero tampoco se debe permitir que éstos aumenten significativamente.



Gráfica 16: Productividad vs Tiempo de setup

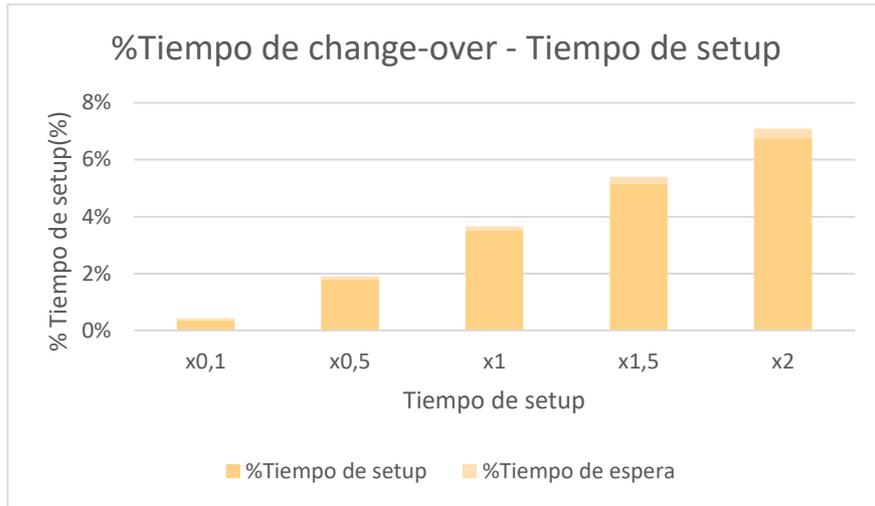
De manera similar al caso de la producción, la *capacidad de línea* disminuye a medida que **TS** aumenta (Gráfico 17). Aumentar estos tiempos (ajuste y/o preparación de los cambios modelos) disminuye la productividad de la línea de ensamblaje, debido a que se dedica menos tiempo en realizar actividades de ensamblaje y, por lo tanto, se producen menos unidades por hora.



Gráfica 17: Capacidad de línea vs Tiempo de setup

Aumentar por dos el tiempo empleado en setup respecto al caso base, repercute en producir aproximadamente 0,6 piezas menos a la hora. En general, la capacidad de línea no se ve afectada en gran medida al variar los tiempos de ajuste de los puestos.

Al aumentar el tiempo de setup, aumenta el *% de tiempo de setup* (Gráfico 18), resultados evidentes pero que confirman la fiabilidad de los experimentos. Además, como cabría esperar al aumentar los tiempos de cambio de modelo, también lo hace el tiempo de espera, debido a que durante el tiempo en el que se procede al setup de los puestos, no se produce, y un aumento de estos implica un incremento de las esperas.



Gráfica 18: %Tiempo de change-over vs Tiempo de setup

En conclusión, invertir grandes esfuerzos en disminuir el tiempo de setup no va a suponer cambios relevantes en los *KPI's*, pero por el contrario aumentos menores de estos tiempos pueden suponer diferencias considerablemente negativas en la productividad y capacidad de línea.

4.3.5 Escenario 5: Diversidad de productos.

Mezclar productos con tiempo de procesado por unidad significativamente distintos es, a priori, una mala decisión. El fin de este escenario es analizar si la fabricación de productos que poseen una dispersión alta de los valores de estos tiempos (debido al aumento del *Workcontent* de uno de los modelos) es un inconveniente para la empresa. Por ejemplo, si se introduce en una serie de fabricación un modelo con un tiempo considerablemente superior al tiempo del caso inicial, se espera una disminución de la velocidad de producción, así como de la productividad y de la capacidad de la línea, y no sólo por la diferencia de tiempos.

El estudio de la diversidad de productos se lleva a cabo a partir de los valores de *Workcontent ratio*, calculados como el cociente entre el mayor y el menor valor de *Workcontent* de los modelos montados en la línea. Para ello, se decide modificar los tiempos del modelo con mayor *Workcontent* del caso base (modelo 1; $Wc=705,4s$) de manera que el *Workcontent* resultante (y con él, el tiempo de las diferentes operaciones) sea el resultado de establecer las siguientes ratios de *Workcontent*: $Wc_ratio=1; 1,8; 2; 2,5; 3$.

De esta forma, debido a que la ratio de *Workcontent* es 1,4 ($705,4/500,4$) se establecen valores tanto por encima como por debajo del caso base. Esto permite el estudio en términos de *KPI's* cuando se fabrican modelos con poca o mucha dispersión en términos de valores de *Workcontent*.

Para aumentar el *Workcontent* de uno de los modelos se deben aumentar los tiempos de procesado de cada estación. Estos valores de procesado se determinan dividiendo el *Workcontent* del modelo entre el número de estaciones (en este caso 3) y aplicando un factor aleatorio del 2% sobre cada tiempo obtenido. Para el caso de ratio de *Workcontent* igual a la unidad se establece el mismo tiempo de *Workcontent* para los cuatro modelos.

Así, como se puede apreciar en la Tabla 7, los valores de *Workcontent* para los tres primeros modelos (5-8-3) permanecen constantes para los distintos casos a estudiar, y es el valor del modelo 1 el que varía dependiendo de cada caso:

Diversidad de productos						
Modelo	Wc ratio = 1	Wc ratio = 1,4	Wc ratio = 1,8	Wc ratio = 2	Wc ratio = 2,5	Wc ratio = 3
5	500,4 s	500,4 s	500,4 s	500,4 s	500,4 s	500,4 s
8	500,4 s	645,9 s	645,9 s	645,9 s	645,9 s	645,9 s
3	500,4 s	654,2 s	654,2 s	654,2 s	654,2 s	654,2 s
1	500,4 s	705,4 s	900 s	1000 s	1500 s	2000 s

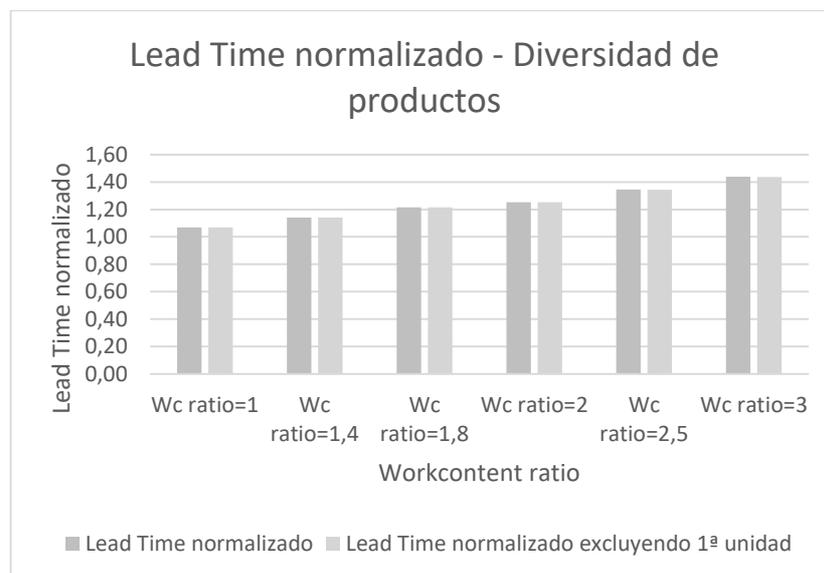
Tabla 12 - Modificaciones diversidad de productos

Análisis Escenario 5: Diversidad de productos.

Para los siguientes escenarios cabe destacar que el *Workcontent ratio* es de 1,4 (705,4/500). Por lo tanto, el proceso llevado a cabo para la obtención de resultados en estos experimentos es el de sustituir el modelo con mayor *Workcontent* (WC=705,4) por el modelo con menor *Workcontent* (WC=500) multiplicado por los factores que se ven en las gráficas que permiten precisamente obtener esos *Workcontent ratio*.

Ante el aumento de la diversidad del *Workcontent* de los productos se produce un incremento del *Lead Time* de manera similar para el caso del *LTN* y el *LTNI* y esto es debido a que, al introducir un modelo con un tiempo de procesamiento por unidad considerablemente superior respecto al resto, aumenta en el valor del *Workcontent medio*, lo que se refleja en un aumento del tiempo entre que se ejecuta la orden de fabricación hasta que se procesa completamente.

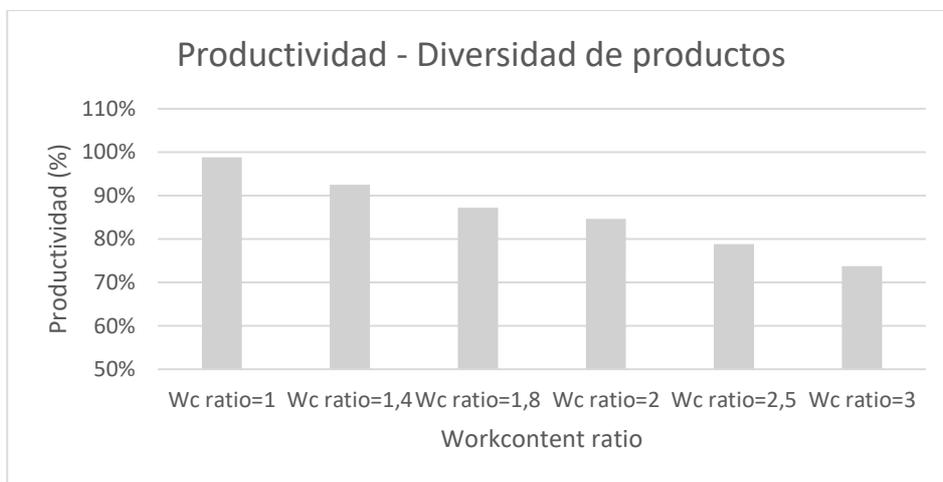
En cuanto al valor del *Lead Time* dependiendo de si se incluye o no la 1ª unidad de fabricación, para un mismo valor de *Workcontent ratio*, la diferencia es mínima debido a que la suma de los tiempos de ensamblado de la primera unidad junto con los tiempos dedicados al setup son irrelevantes respecto al tiempo total de producción (ver Gráfico 19):



Gráfica 19: LTN y LTNI vs Diversidad de productos

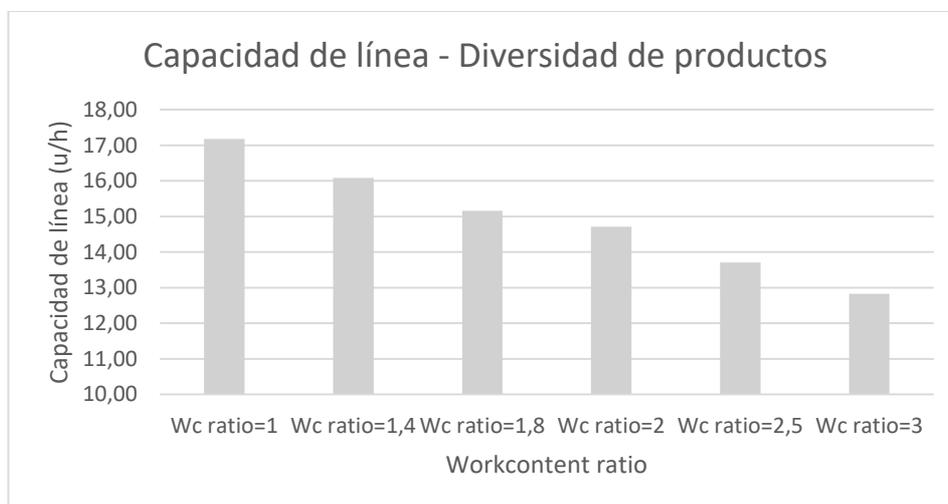
Se observa como la *productividad* (ver Gráfico 20) decrece a medida que aumenta la diversidad de Workcontent. Se trata de un resultado predecible ya que una mayor dispersión en los valores de Workcontent da como resultado un peor equilibrado de la línea y, por lo tanto, una peor *productividad*. Se produce un aumento de la desincronización entre la carga de trabajo de los diferentes puestos que da lugar al aumento de los tiempos de espera.

Para el caso de Wc ratio=1, como era de esperar la productividad es muy próxima al 100% (caso ideal en el que existe una gran sincronización entre estaciones con prácticamente inexistentes tiempos de espera) Introducir un producto con un tiempo de procesado por unidad muy diferente al tiempo mínimo provoca una disminución de la *productividad* muy importante.



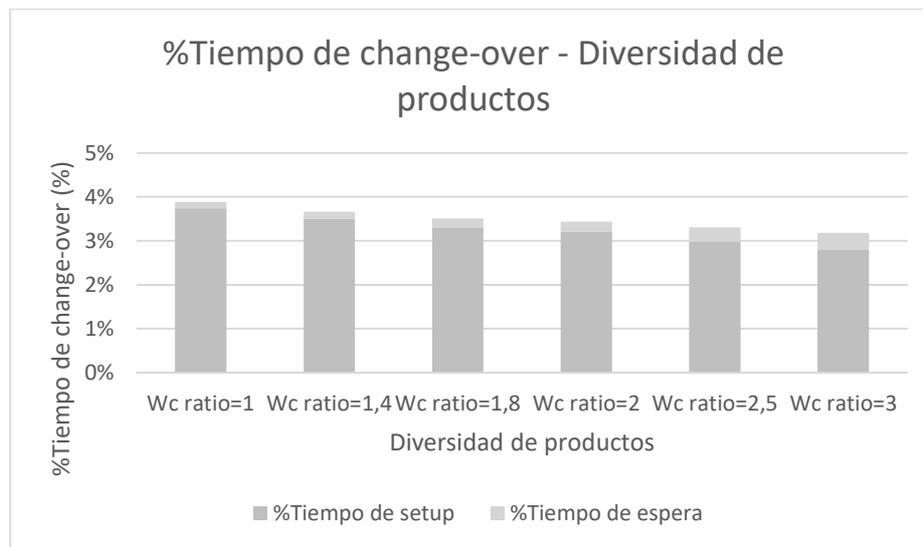
Gráfica 20: Productividad vs Diversidad de productos

Para la capacidad de línea ocurre lo mismo que en el caso anterior (productividad). Esta decrece conforme el Workcontent ratio aumenta, debido a la disminución de la productividad como consecuencia de la disminución del equilibrado. Si para el caso de Wc ratio = 1 la productividad era próxima al 100% quiere decir que el máximo de unidades que se pueden fabricar por hora son 17 unidades. La *capacidad de la línea* (ver Gráfico 21) se ve mermada de gran manera al introducir un producto con un tiempo de procesado por unidad muy superior debido a que esto afecta al equilibrado de la línea.



Gráfica 21: Capacidad de línea vs Diversidad de productos

El *porcentaje de tiempo de setup* (ver Gráfico 22) disminuye a medida que la diversidad del *Workcontent* de los productos aumentan, aunque no sufre variaciones muy significativas. Este porcentaje disminuye debido a que al aumentar el *Workcontent* de uno de los productos que forman la secuencia, el *Workcontent* medio también aumenta mientras que el tiempo de setup aumenta. Los tiempos de espera aumentan a consecuencia de la disminución del equilibrado que provocan una desincronización entre los puestos, que suponen un aumento de los tiempos de espera.



Gráfica 22: %Tiempo change-over vs Diversidad de productos

En conclusión, aumentar la ratio de *Wokcontent* aumentando el *Workcontent* de uno de los modelos puede conllevar variaciones significativas para los *KPI's* estudiados. El *Lead Time* aumenta considerablemente, y la productividad y la capacidad de línea se ven disminuidas en gran medida. Por otro lado, los tiempos de setup y esperas no se ven modificados significativamente.

4.3.6 Escenario 6: Diferentes secuencias de modelos en combinación con diferentes tamaños de lote.

Hasta ahora se han estudiado diferentes escenarios con la misma secuencia de orden de modelos (5-8-3-1), en orden ascendente en función de su *Workcontent* (ver Tabla 13). En este escenario se cambia el orden de la secuencia de fabricación de los modelos para determinar si influye en los resultados obtenidos de los *KPI's*.

Además, como se ha podido concluir en el Escenario 4 al disminuir el tamaño de lote la influencia de los tiempos de setup se ve amplificada. Es por ello que en este escenario se combinan ambos casos y se estudia a la vez la influencia de la secuencia de los modelos frente al tamaño de lote utilizado.

	<i>Workcontent (s)</i>
Modelo 1	705,4
Modelo 3	654,2
Modelo 5	500,4
Modelo 8	645,9

Tabla 13 - Workcontent de los modelos procesados

Así, la secuencia ascendente (5-8-3-1) es la misma del caso base. Para la secuencia descendente y mixta, se mantienen los mismos cuatro modelos, con la diferencia que en la descendente se invierte el orden de procesado (1-3-8-5) y para la mixta se elige la secuencia (5-3-1-8). Por lo tanto, el total de casos estudiados es nueve, resultante de la combinación de los 6 casos planteados (ver Tabla 14):

Combinación de Casos
Ascendente - Lote 120
Descendente - Lote 120
Mixta - Lote 120
Ascendente - Lote 60
Descendente - Lote 60
Mixta - Lote 60
Ascendente - Lote 20
Descendente - Lote 20
Mixta - Lote 20

Tabla 14- Combinación de los diferentes casos

Cabe destacar, que las secuencias se repiten una detrás de la otra, es decir, al finalizar, por ejemplo, la secuencia ascendente (5-8-3-1), la secuencia que le sigue vuelve a ser de nuevo la misma, comenzando de nuevo el modelo 5 (5-8-3-1-5).

En la secuencia ascendente se producen tres pequeños saltos de *Workcontent* hasta que la secuencia finaliza con el modelo de mayor *Workcontent* (1) y vuelve a empezar la siguiente secuencia con el modelo de menor *Workcontent* (5). En este último salto, la diferencia es mucho mayor que en los tres casos anteriores.

Para la secuencia descendente ocurre el proceso descrito anteriormente, pero en orden inverso y con la diferencia de que al disminuir el *Workcontent* a medida que avanza la secuencia, provoca que el tiempo de espera entre estaciones se propague de una secuencia a otra. Para la secuencia mixta, ocurren saltos de *Workcontent* más moderados, pero con una mayor frecuencia.

El objetivo de este escenario es estudiar los diferentes casos y establecer si existe una secuencia de procesado de modelos preferible en combinación con el tamaño de lote utilizado.

Para tratar de explicar que sucede en una línea de ensamblaje en la que se procesan modelos en diferentes secuencias en función de su *Wokcontent*, se utilizan figuras proporcionadas por Adrián Miqueo (ver Fig. 13 y 14) desarrolladas para otro proyecto.

Estas figuras representan otra línea de ensamblaje que posee cuatro estaciones y que procesa modelos con *Workcontents* distintos pero que sirven para extraer conclusiones de que sucede con los tiempos de espera y los tiempos de bloque en los casos estudiados en el Escenario 6.

Como se puede observar en la Figura 13, se presentan cuatro estaciones. En verde hay un modelo saliente correspondiente al proceso anterior. En gris aparece el tiempo de setup y los diferentes modelos se representan en tonos de color azul. Entre medio de ellos, en color rojo se representa los tiempos de bloqueo. Para este caso los tiempos de modelos son iguales, lo cual no sucede en los casos del Escenario 6. Si existiera diferencia entre estos tiempos, además de tiempos de bloque aparecerían tiempos de espera.

Ante una secuencia ascendente de productos, en la primera estación, el setup se hace en cuanto es posible, es decir, en cuanto finaliza el modelo anterior. Aparecen tres bloqueos como resultado de esperar a la finalización de los modelos siguientes que se realizan en las estaciones posteriores de manera sucesiva. Por lo tanto, se produce un amortiguado de la ineficiencia. En este caso la línea no puede procesar los modelos más rápidamente y el ritmo de fabricación se ve marcado por la última estación tal y como se muestra en la Figura 13.

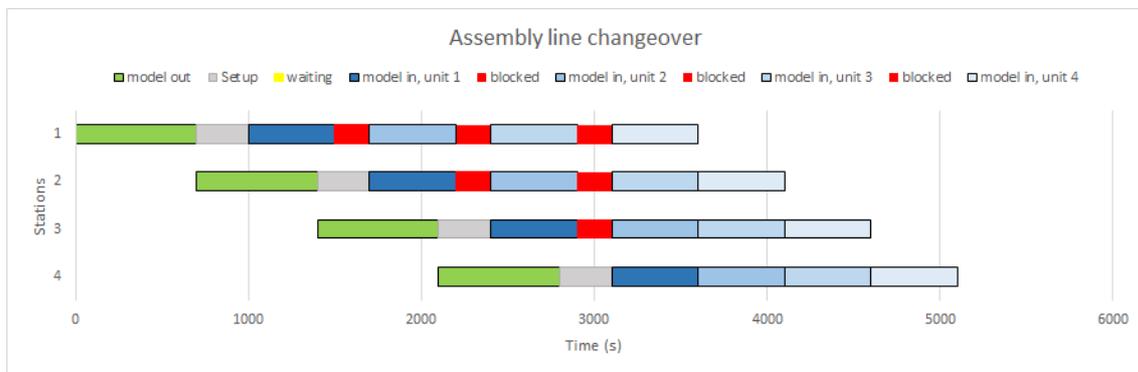


Figura 13 – Estaciones vs Tiempo de procesado para secuencia ascendente
Fuente: Adrián Miqueo

Por otra parte, ante una secuencia descendente de productos, desaparecen los tiempos de bloqueo y aparecen tiempos de espera. Estas esperas están originadas a causa de que en las estaciones se finaliza el proceso de setup antes de que en sus respectivas estaciones anteriores haya finalizado el proceso de ensamblado, por ejemplo, tal y como muestra la Figura 14 en la estación 2 se produce una espera hasta que el modelo de la estación 1 se ha procesa. Este motivo, origina una amplificación de los tiempos de espera a medida que se avanza a lo largo de la línea. En este caso la línea no procesa los modelos todo lo rápido que podría y se pierde casi un ciclo de producción.

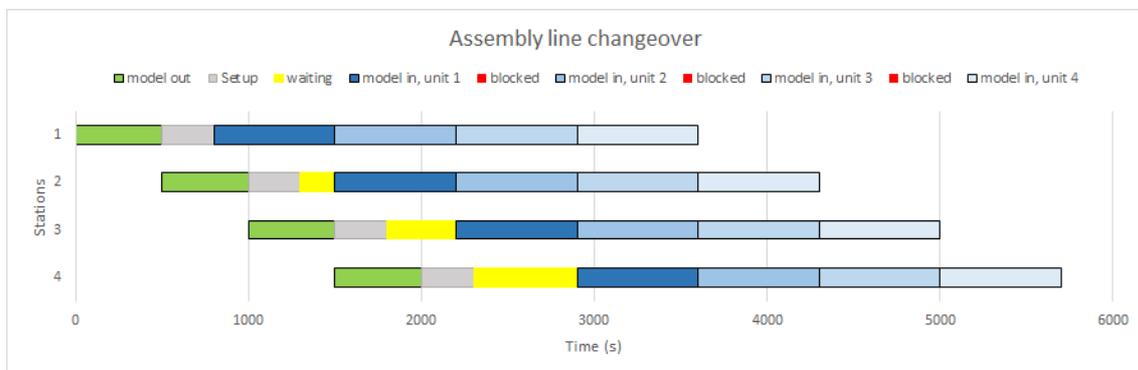


Figura 14 – Estaciones vs Tiempo de procesado para secuencia descendente
Fuente: Adrián Miqueo

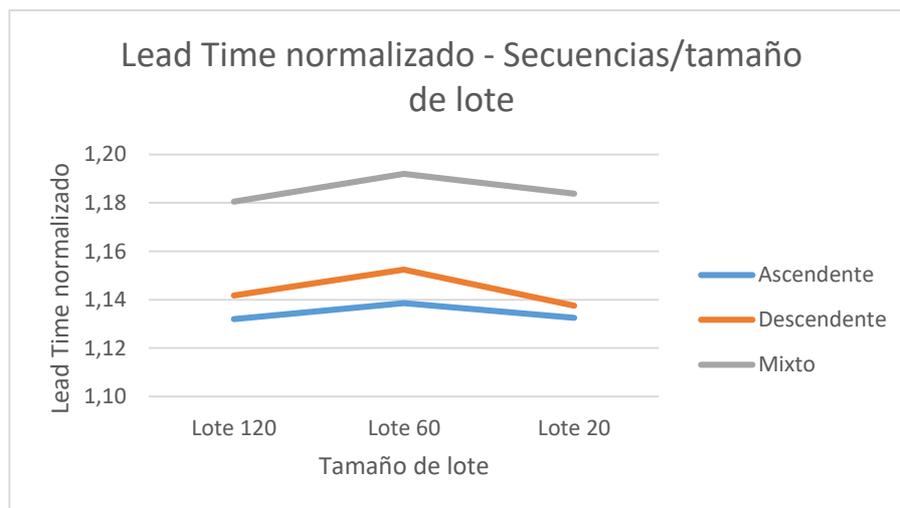
Esta amortiguación de las ineficiencias en la secuencia ascendente y la amplificación de las esperas en la secuencia descendente justifican los resultados expuestos a continuación en combinación con el tamaño de lote, donde se observa claramente la diferencia de resultados entre una y otra. La secuencia mixta es una combinación de los casos anteriores y como resultado se obtienen tanto tiempos de espera como de bloqueos que dan como resultado valores deficientes de KPI's respecto a los casos estudiados anteriormente:

Análisis Escenario 6: Secuencia de productos – tamaño de lote:

Así, la secuencia ascendente (ver Fig. 23) resulta favorable respecto a las secuencias descendente y mixta, al obtener menor valor de *LTN* y menor porcentaje de tiempos de setup. Como consecuencia, se obtienen los valores más altos en productividad y capacidad de línea. A continuación, ligeramente por detrás, se sitúa la secuencia descendente de productos que presenta valores ligeramente inferiores en productividad y capacidad de línea respecto al caso anterior, a causa de la obtención de un superior valor de *Lead Time* y porcentaje de tiempos de espera. La diferencia desfavorable entre la secuencia mixta y la secuencia descendente es superior a la diferencia anterior debido a similares motivos.

Por otro lado, en el análisis del tamaño de lote se obtienen resultados inesperados. Como se ha explicado en análisis anteriores se espera mayores valores de productividad y capacidad de línea para tamaños de lotes más grandes. En este caso, los valores obtenidos para los lotes de 120 y 90 unidades son los esperados. Sin embargo, el análisis del lote de 20 unidades presenta valores inesperados, puesto que se obtienen, en general, valores similares a los obtenidos en el análisis del lote de 120 unidades. El porcentaje de controles de calidad para el tamaño de lote de 20 unidades vuelve a ser el motivo de la imprevisibilidad de los resultados.

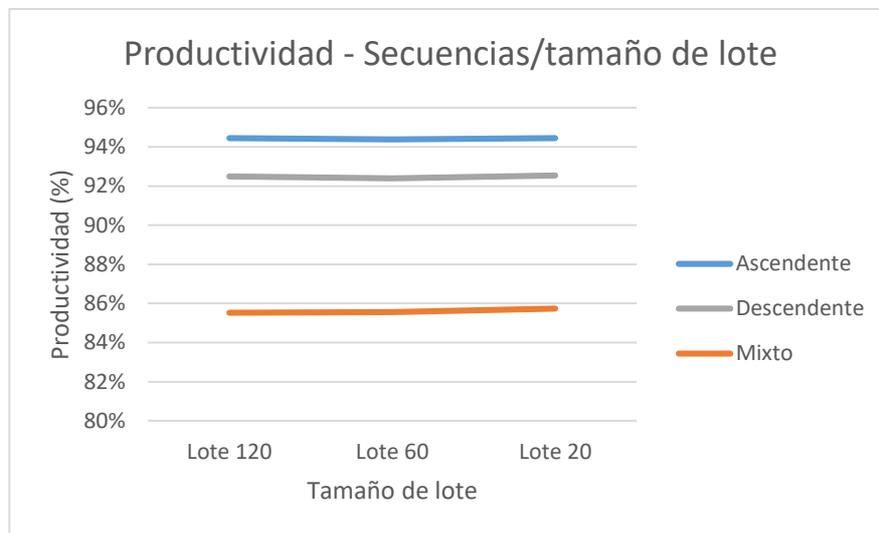
A continuación, se muestran las gráficas que representan los valores obtenidos para esta configuración cruzada de los factores secuencia de modelos y tamaño de lote. En ellas se reúnen las conclusiones descritas anteriormente:.



Gráfica 23: LTN vs Secuencias/Tamaño de lote

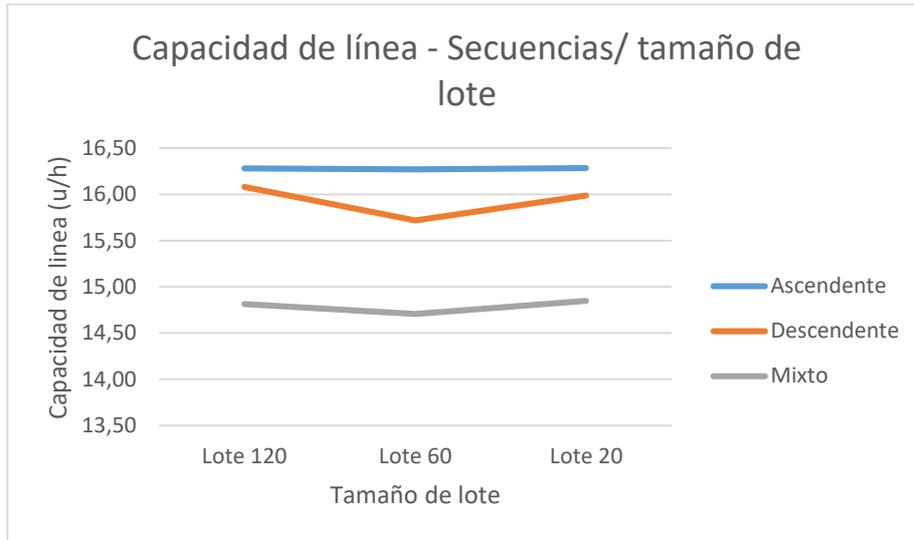
Se aprecian mejores valores de *Lead Time* en orden: ascendente, descendente y mixto. Los valores obtenidos para los lotes de 120 y 60 unidades son los esperados. Por otro lado, se obtiene un valor inesperado (próximo a valores de lote 120) para el lote de 20 unidades. La diferencia de tiempo transcurrido entre que se ejecuta la orden y se procesa, entre la secuencia mixta y ascendente es considerable en mayor medida que el aumento del tamaño de lote.

Se observan mejores valores de productividad (ver Gráfico 24) en orden: ascendente, descendente y mixto. Los valores para los lotes de 120 y 60 unidades son los esperados. Sin embargo, aparece un valor inesperado (próximo a valores de lote 120) para el lote 20 unidades. Se aprecia una diferencia considerable entre los valores de productividad obtenidos para la secuencia ascendente (entorno al 94%) frente a la mixta (entorno al 86%). Las variaciones del tamaño de lote no presentan diferencias significativas en términos de productividad.



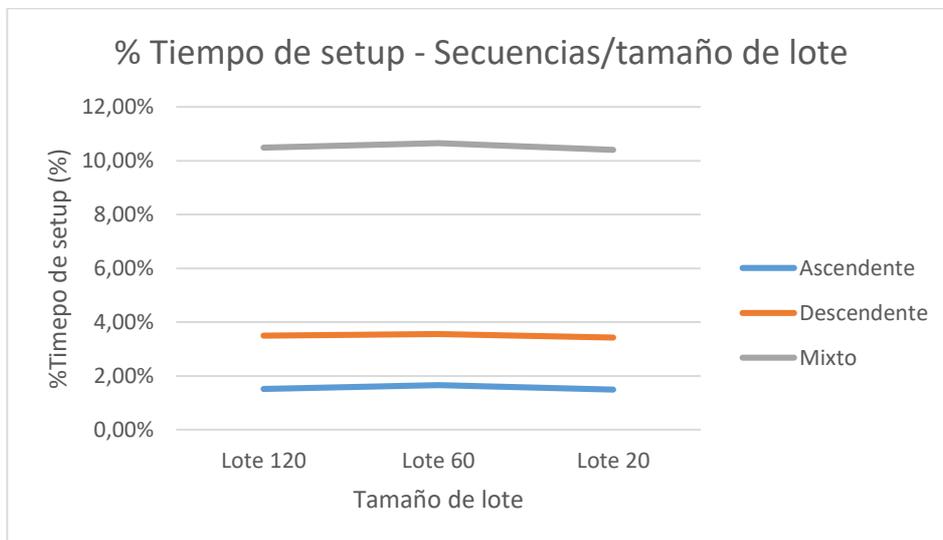
Gráfica 24: Productividad vs Secuencias/Tamaño de lote

Se obtienen mejores valores de capacidad de línea (ver Gráfico 25) en orden: ascendente, descendente y mixto. Valores esperados para lote 120 y lote 60. Se parecía un valor inesperado (próximo a valores de lote 120) para lote 20 unidades. En este caso, la capacidad de línea se ve disminuida en un valor ligeramente superior a una pieza por hora. Por otro lado, la secuencia descendente es la que peor ve disminuida su capacidad ante la disminución del tamaño de lote. Así, el orden escogido para realizar la secuencia tiene más influencia que el tamaño de lote escogido en la capacidad de la línea.



Gráfica 25: Capacidad de línea vs Secuencias/Tamaño de lote

Se obtienen mejores valores de porcentaje de tiempo de setup en orden (ver Gráfico 26): ascendente, descendente y mixto. Valores esperados para lote 120 y lote 60. Valor inesperado (próximo a valores de lote 120) para lote 20 unidades. La diferencia dependiendo de la secuencia utilizada es considerable llegando a valores superiores al 10% de tiempo de setup para el caso de secuencia mixta. Por otro lado, las variaciones en el tamaño de lote no tienen una relevancia significativa en el porcentaje del tiempo de setup.



Gráfica 26: %Tiempo de setup vs Secuencias/Tamaño de lote

5. Conclusiones

La obtención de conclusiones certeras, a partir de los valores obtenidos de los indicadores claves de desempeño en el estudio de la línea de ensamblaje, ha sido posible a través de la investigación y evaluación de la misma, comparando los resultados obtenidos con las hipótesis esperadas al comiendo de la investigación y respondiendo a las preguntas planteadas.

Se ha alcanzado el propósito final del proyecto: la justificación de los resultados mediante la metodología empleada, que ha permitido establecer relaciones para predecir o intuir los resultados esperados en futuras investigaciones, así como acotar los límites de mejora o los límites críticos.

Es por ello que tras el desarrollo del presente trabajo se puede afirmar que: incrementar la productividad y la capacidad de la línea objeto de este proyecto es posible aumentando el tamaño de lote utilizado, disminuyendo el tiempo empleado en el setup o disminuyendo la ratio de *Workcontent* de los productos. Este aumento de los indicadores clave surge como consecuencia de disminuir el porcentaje de tiempo dedicado al setup y el *Lead Time*. Aunque habrá que medir las consecuencias de disminuir el tiempo de setup, debido a que puede suponer esfuerzos que no representen de forma relevante mejoras en los indicadores a mejorar.

Además, en términos generales, el aumento de la variabilidad del tiempo de ciclo no ocasiona variaciones notables en los indicadores clave de desempeño. Por otro lado, las tasas de calidad no han sufrido variaciones destacadas ante las modificaciones de los parámetros de entrada.

Para la obtención de estas conclusiones, se ha requerido de la asimilación de los conceptos básicos de las líneas de producción, y del aprendizaje tanto del funcionamiento como de las posibilidades de las herramientas utilizadas que han permitido el desarrollo del mismo. Se han producido especiales dificultades durante el proceso de obtención y automatización de *KPI's* y es por ello que se ha requerido del dominio de la herramienta *Excel*, en unos niveles que no se habían conseguido hasta el momento.

El alcance del proyecto ha estado limitado por los plazos establecidos para el mismo y por el desconocimiento de los términos empleados. Se espera que pueda servir de base para la elaboración de futuros proyectos personales o ajenos, en los que mejorar o desarrollar los conocimientos adquiridos y plasmados hasta el momento. Así como, haber contribuido a la consecución de las competencias para el ejercicio de la profesión.

6. Bibliografía

- [1] M. Logística, «Modelo tradicional de producción,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.masterlogistica.es/modelo-tradicional-produccion/>.
- [2] C. magazine, «Ceupe magazine,» [En línea]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/conceptos-generales-del-lean-manufacturing.html>. [Último acceso: 10 Enero 2022].
- [3] M. M. Alcubierre, «Study of the factors for the optimization of flexible mixed-model manufacturing systems,» Zaragoza, 2021.
- [4] M. Gamberi, «ResearchGate,» Junio 2015. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-paced-mixed-model-synchronous-assembly-line-with-a-jolly-operator_fig1_281336326. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [5] J. C. H. Matías y A. Vizán Idoipe, «Lean Manufacturing. Concepto, técnicas e implementación,» Escuela de organización industrial , Escuela Politécnica de Madrid, 2013.
- [6] Geinfor, «Geinfor ERP,» [En línea]. Available: <https://geinfor.com/business/value-stream-mapping/>. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [7] I. Antonucci, «Atlas consultora,» 21 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.atlasconsultora.com/lean-manufacturing-y-los-principios-del-pensamiento-que-cambio-el-mundo/#los-5-principios-del-lean-manufacturing>. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [8] Gradiant, «Gradiant,» 23 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.gradiant.org/blog/gradiant-lean-industria4-0/>. [Último acceso: 22 Enero 2022].
- [9] E. consulting, «Exis consulting,» [En línea]. Available: <http://exisconsulting.es/productividad-y-variabilidad/>.

Anexos:

Anexo 1:

Tal y como se ha presentado en el apartado de *Metodología y enfoque*, el proceso de obtención de los *KPI's* se lleva a cabo a través de la utilización de la herramienta ofimática *Excel*. Se genera un nuevo archivo *Excel* con extensión *.xls* llamado *KPI's.xls* en el cual se importan los datos de entrada del archivo *Datos.xls* y los datos de salida provenientes de los ficheros *.txt* de resultados, obtenidos del simulador *Witness* (todos ellos reunidos en misma carpeta denominada *Datos*). Este archivo *KPI's.xls* posibilita a partir de la introducción de los valores de salida obtenidos del simulador, devolver los valores de los *KPI's*. A continuación, se presenta el archivo *KPI's.xls* utilizando el ejemplo del caso base:

En la Figura 15 se puede observar la ventana de datos de entrada. Se utiliza la macro *ImportarDatos* que posibilita reproducir los datos provenientes del archivo *Datos.xls*, previamente creado, en la ventana Datos input del archivo *KPI's.xls*. Así, con un solo “click” es posible introducir los valores de número de puestos, tamaño de lote, variabilidad y tiempos de setup.

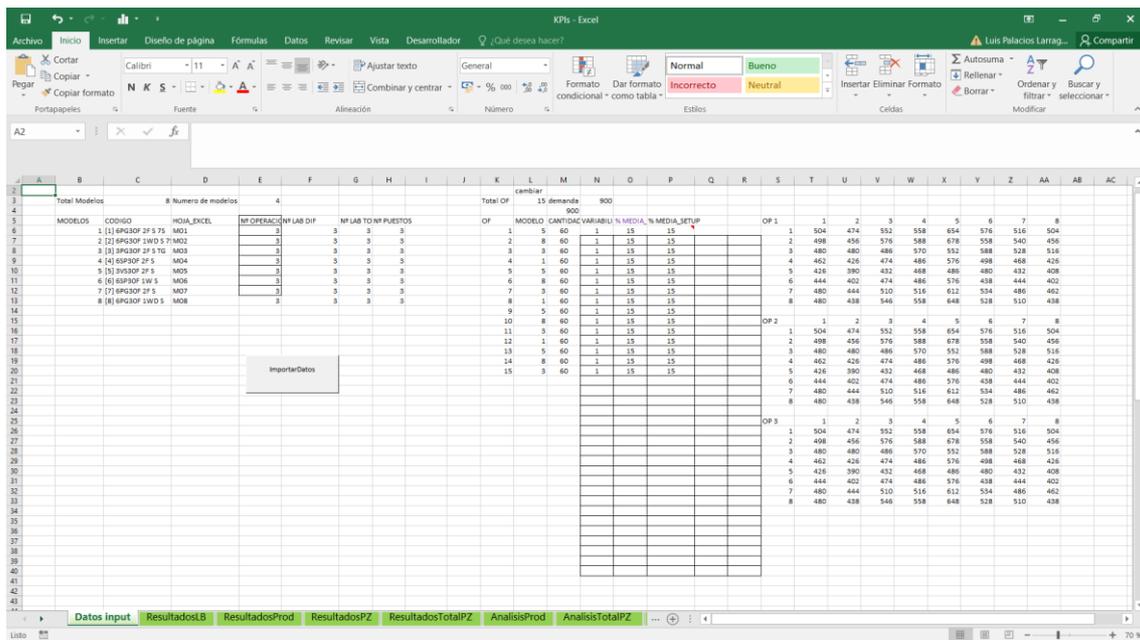


Figura 15 – Ventana Datos Input del archivo *KPI's.xls*

Los datos de salida del simulador en formato *.txt* se introducen en forma de tablas dinámicas. La primera vez que se realiza el proceso se ejecuta manualmente, el resto de veces basta con una vez importados los datos del nuevo archivo *Datos.xls*, actualizar las tablas dinámicas para obtener los nuevos valores correspondientes a los ficheros *.txt*. En la siguiente figura se muestra la apariencia de uno de las tablas dinámicas que contiene los valores del archivo *Resultados_Prod.txt*:

Modelos	Cuentas de Num pra	Min. de Tini	Máx. de Tfin	Promedio de Lead Time Unk
1	5	0	317,580276	0
2	1	5	196,7820585	677,2630934
3	1	5	344,7504699	818,0084764
4	1	5	524,6483325	1019,4782937
5	1	5	692,9910532	1277,626254
6	1	5	825,329303	1378,100047
7	1	5	1030,000951	1547,1701937
8	1	5	1221,495799	1766,147433
9	1	5	1388,269524	1907,498541
10	1	5	1569,387282	2080,733562
11	1	5	1695,389859	2209,520156
12	1	5	1858,538544	2377,924996
13	1	5	2043,754196	2538,500344
14	1	5	2246,388363	2781,452788
15	1	5	2395,129175	2999,538135
16	1	5	2556,387563	3110,544509
17	1	5	2788,968487	3279,725776
18	1	5	2979,990996	3328,454548
19	1	5	3166,910644	3715,776965
20	1	5	3363,627983	3879,262776
21	1	5	3540,251085	4133,729712
22	1	5	3801,962994	4336,129117
23	1	5	4007,862539	4495,233185
24	1	5	4206,863336	4728,376694
25	1	5	4382,981379	4906,940711
26	1	5	4541,809046	5069,68407
27	1	5	4703,649888	5196,159414
28	1	5	4842,020651	5378,904126
29	1	5	4999,231244	5504,387519
30	1	5	5114,638248	5670,948524
31	1	5	5251,909479	5837,381607
32	1	5	5406,965593	5974,051287
33	1	5	5530,14685	6264,383883
34	1	5	5744,071488	6417,44368
35	1	5	5914,895848	6538,97318
36	1	5	6093,70651	6736,387616
37	1	5	6258,217888	6888,984178
38	1	5	6736,217888	6888,984178

Figura 16– Ventana Resultados_Prod del archivo *KPI's.xls*

Una vez importados tanto los datos de entrada como los datos de salida provenientes del simulador, se procede al análisis. Para ello, se utilizan tablas dinámicas en las que se aplican tanto funciones propias de *Excel* (min, max, suma, promedio, cuenta etc.), como filtros (filtro para excluir la primera unidad, filtro para determinar el operario del que se quiere obtener valores etc.) que facilitan el tratamiento de los datos (ver Fig. de 17 a 21):

Modelos	Cuentas de Num pra	Min. de Tini	Máx. de Tfin	Promedio de Lead Time Unk	Lead Time exc 1 unit
1	5	0	317,580276	0	0
2	1	5	196,7820585	677,2630934	547,1888609
3	1	5	344,7504699	818,0084764	790,5921272
4	1	5	524,6483325	1019,4782937	1030,000951
5	1	5	692,9910532	1277,626254	1378,100047
6	1	5	825,329303	1378,100047	1547,1701937
7	1	5	1030,000951	1547,1701937	1766,147433
8	1	5	1221,495799	1766,147433	1907,498541
9	1	5	1388,269524	1907,498541	2080,733562
10	1	5	1569,387282	2080,733562	2209,520156
11	1	5	1695,389859	2209,520156	2377,924996
12	1	5	1858,538544	2377,924996	2538,500344
13	1	5	2043,754196	2538,500344	2781,452788
14	1	5	2246,388363	2781,452788	2999,538135
15	1	5	2395,129175	2999,538135	3110,544509
16	1	5	2556,387563	3110,544509	3279,725776
17	1	5	2788,968487	3279,725776	3328,454548
18	1	5	2979,990996	3328,454548	3715,776965
19	1	5	3166,910644	3715,776965	3879,262776
20	1	5	3363,627983	3879,262776	4133,729712
21	1	5	3540,251085	4133,729712	4336,129117
22	1	5	3801,962994	4336,129117	4495,233185
23	1	5	4007,862539	4495,233185	4728,376694
24	1	5	4206,863336	4728,376694	4906,940711
25	1	5	4382,981379	4906,940711	5069,68407
26	1	5	4541,809046	5069,68407	5196,159414
27	1	5	4703,649888	5196,159414	5378,904126
28	1	5	4842,020651	5378,904126	5504,387519
29	1	5	4999,231244	5504,387519	5670,948524
30	1	5	5114,638248	5670,948524	5837,381607
31	1	5	5251,909479	5837,381607	5974,051287
32	1	5	5406,965593	5974,051287	6264,383883
33	1	5	5530,14685	6264,383883	6417,44368
34	1	5	5744,071488	6417,44368	6538,97318
35	1	5	5914,895848	6538,97318	6736,387616
36	1	5	6093,70651	6736,387616	6888,984178
37	1	5	6258,217888	6888,984178	6888,984178
38	1	5	6736,217888	6888,984178	6888,984178

Figura 17– Ventana AnálisisProd del archivo *KPI's.xls*

Análisis de factores para la optimización de líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas.

MODELOS CODIGO	HOJA_EXCEL	Nº OPERACIONES	LAB DIF	Nº LAB TO	Nº PUESTOS	WC	OF	MODELO	CANTIDAD	VARIABLE	% MEDIA_C	% MEDIA_SETL	WC	Nlabors	OP
1 [1] 6PG30I M01		3	3	3	3	705,36		1	5	60	1	15	15	500,4	3
2 [2] 6PG30I M02		3	3	3	3	673,44		2	8	60	1	15	15	645,92	3
3 [3] 6PG30I M03		3	3	3	3	654,24		3	3	60	1	15	15	654,24	3
4 [4] 6SP30F M04		3	3	3	3	605,36		4	1	60	1	15	15	705,36	3
5 [5] 3VS30I M05		3	3	3	3	500,4		5	5	60	1	15	15	500,4	3
6 [6] 6SP30F M06		3	3	3	3	529,2		6	8	60	1	15	15	645,92	3
7 [7] 6PG30I M07		3	3	3	3	700,32		7	3	60	1	15	15	654,24	3
8 [8] 6PG30I M08		3	3	3	3	645,92		8	1	60	1	15	15	705,36	3

Figura 18 – Ventana AnálisisOF del archivo KPI's.xls

Suma de TIME	Labor	Accion
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9
10	10	10
11	11	11
12	12	12
13	13	13
14	14	14
15	15	15

Figura 19 – Ventana AnálisisCO del archivo KPI's.xls

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data points visible in the first few rows:

Row	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	
1																								
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								
10																								
11																								
12																								
13																								
14																								
15																								
16																								
17																								
18																								
19																								
20																								
21																								
22																								
23																								
24																								
25																								
26																								
27																								
28																								
29																								
30																								
31																								
32																								
33																								
34																								
35																								
36																								
37																								
38																								

Figura 20 – Ventana AnálisisCO del archivo *KPI's.xls*

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data points visible in the first few rows:

Row	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14																							
15																							
16																							
17																							
18																							
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							
24																							
25																							
26																							
27																							
28																							
29																							
30																							
31																							
32																							
33																							
34																							
35																							
36																							
37																							
38																							

Figura 21 – Ventana AnálisisCO del archivo *KPI's.xls*

Análisis de factores para la optimización de líneas de ensamblaje manuales o semi-automáticas.

Por último, en la ventana KPI's aparece un resumen de los indicadores clave de desempeño. En ella, se desarrollan las formulas introducidas anteriormente en el apartado *Indicadores claves de desempeño (KPI's)*, las cuales toman los valores obtenidos del tratamiento de los datos en las ventanas de análisis (ver Fig. 22):

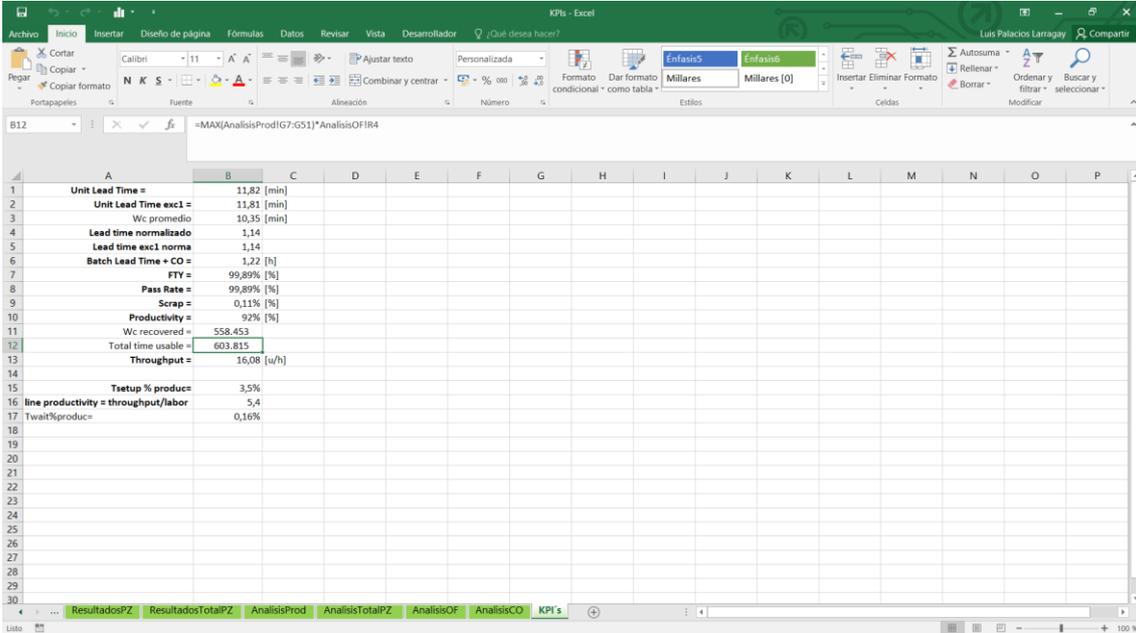


Figura 22 – Ventana KPI's del archivo *KPI's.xls*

Para poder representar las gráficas de análisis se genera un nuevo archivo denominado *ResumenKPI's* en el que se agrupan los datos obtenidos para los distintos escenarios (ver Fig. 23):

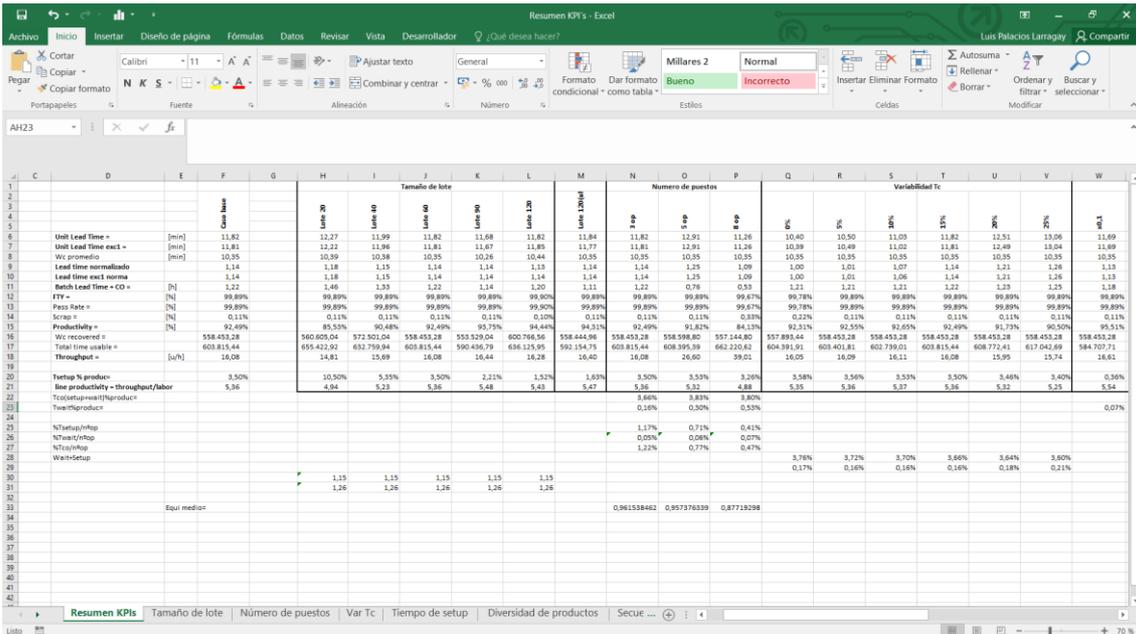


Figura 23 – Archivo *ResumenKPI's*

Anexo 2:

Caso base x 0.1:

OP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	50,4	47,4	55,2	55,8	65,4	57,6	51,6	50,4
2	49,8	45,6	57,6	58,8	67,8	55,8	54	45,6
3	48	48	48,6	57	55,2	58,8	52,8	51,6
4	46,2	42,6	47,4	48,6	57,6	49,8	46,8	42,6
5	42,6	39	43,2	46,8	48,6	48	43,2	40,8
6	44,4	40,2	47,4	48,6	57,6	43,8	44,4	40,2
7	48	44,4	51	51,6	61,2	53,4	48,6	46,2
8	48	43,8	54,6	55,8	64,8	52,8	51	43,8

Tabla 15 – Tiempos de setup Caso base x 0.1

Caso base x 0.5:

OP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	252	237	276	279	327	288	258	252
2	249	228	288	294	339	279	270	228
3	240	240	243	285	276	294	264	258
4	231	213	237	243	288	249	234	213
5	213	195	216	234	243	240	216	204
6	222	201	237	243	288	219	222	201
7	240	222	255	258	306	267	243	231
8	240	219	273	279	324	264	255	219

Tabla 16 – Tiempos de setup Caso base x 0.5

Caso base x 1.5:

OP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	756	711	828	837	981	864	774	756
2	747	684	864	882	1017	837	810	684
3	720	720	729	855	828	882	792	774
4	693	639	711	729	864	747	702	639
5	639	585	648	702	729	720	648	612
6	666	603	711	729	864	657	666	603
7	720	666	765	774	918	801	729	693
8	720	657	819	837	972	792	765	657

Tabla 17 – Tiempos de setup Caso base x 1.5

Caso base x 2:

OP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1008	948	1104	1116	1308	1152	1032	1008
2	996	912	1152	1176	1356	1116	1080	912
3	960	960	972	1140	1104	1176	1056	1032
4	924	852	948	972	1152	996	936	852
5	852	780	864	936	972	960	864	816
6	888	804	948	972	1152	876	888	804
7	960	888	1020	1032	1224	1068	972	924
8	960	876	1092	1116	1296	1056	1020	876

Tabla 18 – Tiempos de setup Caso base x 2