



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

Autor:

Llorente Igea, Juan Patricio

Tutor:

De Benito Martín, Juan José

Departamento de Organización de Empresas y
Comercialización e Investigación de Mercados

Valladolid, Julio de 2019

Índice de contenidos

Introducción.....	1
Antecedentes.....	3
Objetivos.....	4
Alcance	5
Estructura	5
Capítulo 1: Focus Lean Kata y LKT	7
1.1 Focus Lean Kata	9
1.1.1 Carlos Martín.....	9
1.2 Gamificación y coaching	10
1.2.1 Gamificación	10
1.2.2 Coaching.....	10
1.3 LKT.....	11
1.4 NPLUS1	15
Capítulo 2: Lean Manufacturing.....	17
2.1 Introducción:.....	19
2.2 El ciclo de Deming:	21
2.3 Las 5S:	22
2.4 Teoría de las restricciones:	25
2.5 Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE):.....	26
2.6 Mantenimiento Productivo Total (TPM):	28
2.7 Kanban.....	32
Capítulo 3: Simulación	35
3.1 Introducción:.....	37
3.2 Softwares de simulación:	38
3.3 WITNESS.....	39
3.3.1 Parts.....	40

3.3.2 Machines.....	40
3.3.3 Buffers.....	42
3.3.4 Conveyors.....	42
3.3.5 Labour.....	43
3.3.6 Tracks y Vehicles.....	43
3.3.7 Modules.....	44
3.3.8 Elementos en sistemas continuos.....	44
3.3.9 Attributes.....	44
3.3.10 Variables.....	45
3.3.11 Distributtions.....	45
3.3.12 Elementos de entrada y salida.....	46
Capítulo 4: Modelado LKT.....	47
4.1 Componentes de la simulación.....	49
4.1.1 Parts.....	49
4.1.2 Buffers.....	49
4.1.3 Attributes.....	50
4.1.4 Variables.....	51
4.1.5 Machines.....	52
4.2 Parámetros iniciales y generales del funcionamiento.....	54
4.2.1 Inicialización de la simulación.....	54
4.2.2 Criterio de selección de piezas.....	56
4.2.3 Funcionamiento de la máquina Expedición.....	57
4.2.4 Funcionamiento de la máquina virtual.....	59
4.3 Creación del modelo inicial.....	61
4.3.1 Primera etapa.....	62
4.3.2 Segunda etapa.....	64
4.3.3 Tercera etapa.....	66
4.3.4 Calidad.....	68
Capítulo 5: Modelado NPLUS1 y Validación.....	71
5.1 Introducción.....	73
5.2 Recopilación de los datos.....	73

5.3 Nplus1 en paralelo	75
5.4 Cambios respecto a LKT	76
5.4.1 Primera etapa.....	76
5.4.2 Segunda etapa.....	78
5.4.3 Tercera etapa.....	78
5.4.4 Calidad	79
5.5 Validación del Modelo	80
5.5.1 Resultados escenario LKT 8 minutos	80
5.5.2 resultados escenario NPLUS1 8 minutos.....	81
5.5.3 Comparación 8 minutos	83
5.5.4 Resultados escenario LKT 2400 minutos	84
5.5.5 Resultados escenario Nplus1 2400 minutos	85
5.5.6 Comparación 2400 minutos	87
5.5.7 Conclusiones.....	88
Capítulo 6: Nuevos Escenarios NPLUS1	89
6.1 Introducción.....	91
6.2 123Serie.....	91
6.2.1 Primera etapa.....	93
6.2.2 Llenado inicial de los almacenes.....	95
6.3 12345Serie.....	96
6.3.1 Segunda etapa.....	98
6.3.2 Llenado inicial de los almacenes.....	100
6.4 1234567Serie	101
6.4.1 Tercera etapa.....	103
6.4.2 Llenado inicial de los almacenes.....	104
6.5 Kanban.....	105
6.5.1 Inicialización de la simulación	106
6.5.2 Criterio de selección de piezas	107
6.5.3 Primera etapa.....	108
6.5.4 Tercera etapa.....	109
Capítulo 7: Experimentos.....	113

7.1 Introducción.....	115
7.2 Tiempo de la formación.....	115
7.2.1 Escenario 123S.....	115
7.2.2 Escenario 12345S.....	117
7.2.3 Escenario 1234567S.....	119
7.2.4 Escenario Kanban.....	120
7.2.5 Conclusiones 8 minutos.....	122
7.3 Tiempo de una semana de trabajo	123
7.3.1 Escenario 123S.....	123
7.3.2 Escenario 12345S.....	125
7.3.3 Escenario 1234567S.....	127
7.3.4 Escenario Kanban.....	129
7.3.5 Conclusiones una semana	131
Capítulo 8: Resultados	133
8.1 Resultados Esperados	135
8.1.1 Sistema productivo en serie	135
8.1.2 Sistema productivo con Kanban	136
8.2 Resultados Obtenidos	136
8.2.1 Sistema productivo en serie	136
8.2.2 Sistema productivo con Kanban	137
8.3 Explicación de la diferencia entre objetivo y resultado	138
Conclusiones y líneas futuras	141
Conclusiones	143
Líneas futuras.....	144
Bibliografía	147

Índice de Imágenes

Imagen 1.1 Carlos Martín.....	9
Imagen 1.2 Distribución de la cadena inicial.....	12
Imagen 1.3 Puesto de montaje.....	13
Imagen 1.4 Puesto Reflow.....	14
Imagen 2.1 Herramientas Lean	20
Imagen 2.2 Ciclo de Deming	22
Imagen 2.3 Proceso Seiri	23
Imagen 2.4 Seiton	24
Imagen 2.5 Seiketsu	25
Imagen 2.6 TPM	29
Imagen 4.1 Piezas del modelo	49
Imagen 4.2 Almacenes del modelo.....	50
Imagen 4.3 Atributos del modelo	50
Imagen 4.4 Variables del modelo.....	52
Imagen 4.5 Máquinas del modelo.....	52
Imagen 4.6 Código de Iniciación.....	54
Imagen 4.7 Asignación de valores	55
Imagen 4.8 Tiempos en averías	56
Imagen 4.9 Selección de piezas	57
Imagen 4.10 Máquina expedición.....	58
Imagen 4.11 Piezas servidas de mala calidad	59
Imagen 4.12 Llenado de la máquina virtual.....	59
Imagen 4.13 Calidad de las piezas iniciales.....	60

Imagen 4.14 Llenado inicial de los almacenes.....	61
Imagen 4.15 Modelo LKT	62
Imagen 4.16 Ampliación de parte de la imagen 4.15.....	62
Imagen 4.17 Ampliación de parte de la imagen 4.15.....	64
Imagen 4.18 Ampliación de parte de la imagen 4.15.....	66
Imagen 4.19 Ampliación de parte de la imagen 4.15.....	68
Imagen 5.1 Preparación funcionamiento diferenciado	77
Imagen 6.1 Modelo 123Serie	93
Imagen 6.2 Ampliación de parte de la imagen 6.1.....	94
Imagen 6.3 Calidad piezas 123Serie.....	96
Imagen 6.4 Modelo 12345Serie	98
Imagen 6.5 Ampliación de parte de la imagen 6.4.....	99
Imagen 6.6 Calidad piezas 12345Serie.....	101
Imagen 6.7 Modelo 1234567Serie	103
Imagen 6.8 Ampliación de parte de la imagen 6.7.....	103
Imagen 6.9 Calidad piezas 1234567Serie.....	105
Imagen 6.10 Inicialización sistema.....	107
Imagen 6.11 Criterio selección de piezas	108
Imagen 6.12 Criterio de selección M1.....	109
Imagen 6.13 Criterio selección Test.....	110
Imagen 6.14 Piezas dentro de Test.....	111

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Procedimiento de mantenimiento autónomo.....	30
Tabla 4.1 Parámetros LKT parte 1.....	61
Tabla 4.2 Parámetros LKT parte 2.....	61
Tabla 5.1 Correcciones en datos.....	74
Tabla 5.2 Correcciones en calidad QA	75
Tabla 5.3 Parámetros NPLUS1 en paralelo parte 1	75
Tabla 5.4 Parámetros NPLUS1 en paralelo parte 2	76
Tabla 5.5 Piezas escenario LKT	80
Tabla 5.6 Máquinas escenario LKT.....	81
Tabla 5.7 Piezas escenario NPLUS1.....	82
Tabla 5.8 Máquinas escenario NPLUS1	82
Tabla 5.9 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en piezas.....	83
Tabla 5.10 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en máquinas.....	84
Tabla 5.11 Piezas escenario LKT	85
Tabla 5.12 Máquinas escenario LKT.....	85
Tabla 5.13 Piezas escenario NPLUS1.....	86
Tabla 5.14 Máquinas escenario NPLUS1	86
Tabla 5.15 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en piezas.....	87
Tabla 5.16 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en máquinas.....	88
Tabla 6.1 Parámetros 123Serie parte 1.....	92
Tabla 6.2 Parámetros 123Serie parte 2.....	92
Tabla 6.3 Parámetros 12345Serie parte 1.....	97
Tabla 6.4 Parámetros 12345Serie parte 2.....	97

Tabla 6.5 Parámetros 1234567Serie parte 1	101
Tabla 6.6 Parámetros 1234567Serie parte 2	102
Tabla 6.7 Parámetros Kanban parte 1	106
Tabla 6.8 Parámetros Kanban parte 2	106
Tabla 7.1.Piezas escenario 123Serie.....	116
Tabla 7.2 Comparación piezas 123Serie contra NPLUS1	116
Tabla 7.3 Máquinas escenario 123Serie	117
Tabla 7.4 Piezas escenario 12345Serie.....	117
Tabla 7.5 Comparación piezas 12345Serie contra 123Serie.....	118
Tabla 7.6 Máquinas escenario 12345Serie	118
Tabla 7.7 Piezas escenario 1234567Serie.....	119
Tabla 7.8 Comparación piezas 1234567Serie contra 12345Serie.....	119
Tabla 7.9 Máquinas escenario 1234567Serie	120
Tabla 7.10 Piezas escenario Kanban.....	121
Tabla 7.11 Comparación piezas Kanban contra 1234567Serie	121
Tabla 7.12 Máquinas escenario Kanban	122
Tabla 7.13 Piezas escenario 123Serie.....	123
Tabla 7.14 Comparación piezas 123Serie frente a LKT	124
Tabla 7.15 Máquinas escenario 123Serie	124
Tabla 7.16 Piezas escenario 12345Serie.....	125
Tabla 7.17 Comparación piezas 12345Serie contra 123Serie.....	126
Tabla 7.18 Maquinas escenario 12345Serie	126
Tabla 7.19 Piezas escenario 1234567Serie.....	127
Tabla 7.20 Comparación piezas 1234567Serie contra 12345Serie.....	128
Tabla 7.21 Máquinas escenario 1234567Serie	128
Tabla 7.22 Piezas escenario Kanban.....	129

Tabla 7.23 Comparación piezas Kanban contra 1234567Serie	129
Tabla 7.24 Máquinas escenario Kanban.....	130

Introducción

Antecedentes

LKT es una aplicación didáctica creada por la empresa Focus Lean, que Carlos Martín Maroto utiliza en sus clases para transmitir a sus alumnos la necesidad de llevar a la empresa la metodología Lean Manufacturing aplicando: tanto las 5S, los tableros Kanban, el cambio de herramienta SMED, como el JIT o la reestructuración de la empresa.

Coincidió con Carlos en un curso reducido de sus clases que impartió en la asignatura de "Buenas Prácticas" del grado en "Ingeniería de Organización Industrial" de la Universidad de Valladolid (UVA), en la cual estaba yo inscrito. Tras la realización de dicho curso comentó a la clase que necesitaba un alumno que realizara un trabajo de cómo extender el número de herramientas que impartía en su curso y que diseñara nuevos escenarios para LKT que pudieran servir para ello.

Llamado por el desarrollo de la actividad y por la gran variabilidad que dicho trabajo ofrecía, decidí aceptar la propuesta de TFG que dio Carlos Martín. Tras analizar la propuesta y comentarse entre la empresa, el profesor encargado de la asignatura, el tutor y yo mismo, se decidió que el asunto a tratar en el TFG sería la validación de la versión LKT mediante los resultados obtenidos de las prácticas realizadas por la empresa para la creación de la versión NPLUS1 y la creación de nuevos escenarios en los que se transforma el sistema productivo gradualmente a formato en serie y posteriormente añadirle un Kanban para controlar la producción.

Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en la creación de un modelo robusto que aúne los sistemas desarrollados y en vías de desarrollo y que sirva de base para un mejor conocimiento de los de los casos implementados y el desarrollo de futuros escenarios para las formaciones impartidas por Focus Lean sobre las distintas herramientas englobadas en la filosofía Lean Manufacturing.

Como este objetivo es muy extenso, se ha considerado dividirlo en distintos objetivos intermedios e hitos a realizar:

- ❖ Preparar un documento Excel que aúna los datos de los trabajos realizados con los alumnos y genera los datos del escenario NPLUS1 que es el nombre de la nueva versión de LKT. Esta nueva versión de la herramienta utiliza como datos de entrada el histórico de dichos alumnos. Este Excel debe contener las plantillas de entrada para poder importar los datos de los distintos escenarios que se van a generar.
- ❖ Recrear el actual sistema LKT en la aplicación Witness creando de esta manera el modelo de partida con el que poder trabajar y hacer mejoras.
- ❖ Implementar los cambios necesarios sobre LKT para generar el escenario NPLUS1 con el cual se realiza la validación del sistema.
- ❖ Crear un escenario en el que se ponen en serie las máquinas de la primera etapa modificando los tiempos y calidades de NPLUS1 y los almacenes existentes.
- ❖ Crear un nuevo escenario, a partir del anterior, en el que las máquinas de la segunda etapa también están en serie con las modificaciones en sus tiempos y calidades, además de los nuevos almacenes correspondientes.

- ❖ Crear un tercer escenario en el que todo el sistema productivo de la fábrica virtual se encuentra en serie, con los tiempos correspondientes, las calidades actualizadas y los almacenes necesarios para dar el servicio.
- ❖ Generar un último modelo a partir del anterior cuya producción esté limitada por el Kanban de producción.
- ❖ Analizar la mejora que supone el cambio en NPLUS1 al pasar de un sistema por talleres con funcionamiento PUSH a uno en serie controlado por Kanban en Sistema PULL.

Alcance

El alcance de este proyecto se acota por el trabajo necesario para la transformación de un sistema de producción por talleres en PUSH a un sistema en línea PULL controlado por Kanban recreando los escenarios designados y ordenados por la empresa solicitante de este TFG.

Estructura

A continuación, se muestra la estructura del trabajo fin de grado que está desarrollado en los siguientes apartados:

En el capítulo 1, titulado Focus Lean Kata y LKT, se da a conocer la empresa que ha pedido el desarrollo del trabajo y su aplicación didáctica cuya mejora se trata en el mismo.

A continuación, en el capítulo 2, cuyo título es Lean Manufacturing, se desarrolla la teoría del Lean y algunas de sus herramientas que son utilizadas o pueden ser utilizadas por Focus Lean.

Después, en capítulo 3, Simulación, se introduce el tema de la simulación, se nombran algunas de las herramientas de simulación más conocidas y utilizadas,

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

y se desarrolla la aplicación Witness que es la utilizada para la realización del trabajo.

A continuación, en el capítulo 4, Modelado LKT, se detallan todos los componentes y parámetros del sistema, y se explica la creación con Witness del modelo inicial LKT.

En el capítulo 5, titulado Modelado Nplus1 y Validación, se procede a introducir los datos de las sesiones de los alumnos de la empresa en las simulaciones de Witness y se valida la nueva versión comparándola con LKT.

En el capítulo 6, titulado Nuevos escenarios NPLUS1, se desarrolla el modelado de los tres escenarios en los que se cambia de un sistema productivo en paralelo a uno en línea, y del escenario que introduce los kanban de producción.

El capítulo 7, cuyo título es Experimentos, recoge los valores aportados por las simulaciones con 20 semillas de 8 y 2400 minutos, para poder analizar y comparar la evolución a lo largo de la transformación.

El capítulo 8, titulado Resultados, sirve de resumen de los objetivos y los resultados obtenidos al hacer la transformación del sistema productivo.

Para terminar, en Conclusiones y Líneas futuras, se aportan como su propio nombre indica las conclusiones y se habla de que herramientas Lean se pueden introducir en las prácticas con la aplicación y la manera en la que se pueden introducir.

Capítulo 1: Focus Lean

Kata y LKT

1.1 Focus Lean Kata

Focus Lean Kata es una empresa fundada en 2016 y dirigida por Carlos Martín Maroto, que se dedica a la formación de estudiantes y trabajadores en la metodología Lean Manufacturing mediante el uso de la gamificación y el coaching.

El trabajo de esta empresa se apoya fuertemente en el libro “Toyota Kata” de Mike Rother para la realización de su formación. En él se explican las Katas que desarrolló la empresa de la familia Toyoda en sus fábricas de coches.

1.1.1 Carlos Martín

Carlos Martín Maroto es un Ingeniero Industrial licenciado por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y con un PDD otorgado por el IESE Business School.



Imagen 1.1 Carlos Martín

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

Actualmente, es el director general de Focus Lean Kata y el principal responsable de todas las clases que imparte este grupo en los distintos másteres y empresas con las que trabaja.

Antes de dedicarse al mundo de la docencia, Carlos trabajó en puestos como Director de fabricación para Philips desde 1987 hasta 1989, Director de Operaciones para Lucent Technologies entre 1990 y 2002, un año como consultor para la consultora Alteridem y Director de Operaciones de Abengoa Solar durante 8 años.

1.2 Gamificación y coaching

1.2.1 Gamificación

Se puede decir que la gamificación es la acción de convertir algo en un juego. Esta técnica se utiliza en los ámbitos educativo y profesional con el fin de agilizar el aprendizaje y conseguir mejores resultados para la formación.

Existen dos dinámicas de juego en la gamificación: la dinámica de "la recompensa", si lo que se quiere es despertar interés por el juego, y la dinámica de "la competición" que busca atraer el interés sobre la actividad que se realiza. Esta segunda puede realizarse tanto de manera individual como por equipos.

El objetivo de la gamificación es servir como herramienta motivacional para potenciar el aprendizaje del alumno en la optimización de sus habilidades o conocimientos y fidelizarlo con la materia o la metodología que se le está enseñando.

1.2.2 Coaching

El coaching viene de la palabra inglesa "coach", cuya traducción viene a ser "entrenador". Es una disciplina que busca fomentar la capacidad del alumno o coachee para resolver problemas y conseguir objetivos, ya sean personales o profesionales.

El coach trata de ayudar al coachee a que piense y trabaje de una forma alternativa, para que sea capaz de resolver él los problemas de la misma manera que el coach lo haría sin necesidad de que este le diga qué hacer o cómo actuar. Un ejemplo sería hacer uso de la mayéutica, que consiste en preguntar y cuestionar al aprendiz hasta que llega a la solución por él mismo.

Ana Vico en su blog aporta su propia definición: “El Coaching es el método (o el arte) de encontrar y gestionar los cambios necesarios para poder alcanzar tus objetivos, hacer realidad tus sueños o conseguir tus metas”.

1.3 LKT

LKT es la aplicación didáctica utilizada por Focus Lean para demostrar a sus alumnos las ventajas que supone para las empresas aplicar las herramientas Lean explicadas en los cursos que imparte.

Esta herramienta digital consiste en un juego que utiliza 13 tabletas interconectadas mediante una intranet que simulan los puestos de trabajo de la empresa. Estas tabletas se corresponden con los 10 puestos de producción, el puesto de calidad, el cliente y la tableta que controla la simulación que mantiene el profesor.

En la imagen 1.2 se pueden ver las 10 máquinas de producción y el puesto de calidad QA y su funcionamiento actual distribuidas como 3 máquinas iguales haciendo el mismo puesto, Reflow haciendo el siguiente, 2 máquinas haciendo el siguiente trabajo, pasan las piezas a OLA, 2 máquinas más en paralelo y termina la producción en TEST antes de pasar a QA que dará el visto bueno para que la pieza se pueda vender o se devuelva a la cadena para que se arreglen sus fallos.

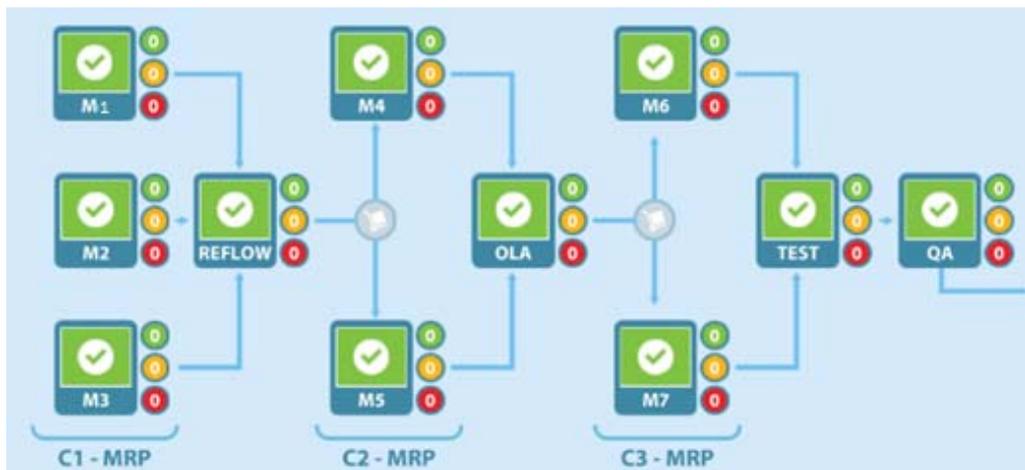


Imagen 1.2 Distribución de la cadena inicial

La imagen 1.3 muestra lo que se ve en pantalla de una de las tabletas de puesto M. Todas las máquinas M1-M7 funcionan de una manera similar, ya que cada una representa el funcionamiento de un puesto en el que un trabajador escoge desde el almacén anterior—representándose en la imagen a la izquierda como cuatro almacenes infinitos donde de cada uno viene un color de pieza y uno gris para las de reflujo—, la pieza que quiere trabajar y la procesa añadiendo en diferentes posiciones los distintos componentes que se ponen en su puesto. Dichos componentes aparecen en la parte baja del puesto: círculos, triángulos, etc. El puesto dispone de una plantilla para cada tipo de pieza (verde amarilla y roja) que se ven en la imagen en la esquina inferior izquierda de la pantalla. Los botones de cambio de modelo están representados en la esquina superior derecha de la pantalla y se usan para cambiar de color de trabajo, dicho cambio supone un tiempo de espera para puesta a punto. También se incluyen: el botón de llamada al mecánico para los casos de avería del puesto, el botón *andon* para llamar a la tableta del jefe (profesor) y pedir alguna cosa o realizar comentarios de su funcionamiento, y también la Zona de Chatarra donde se desechan los componentes que se quiten de los puestos.

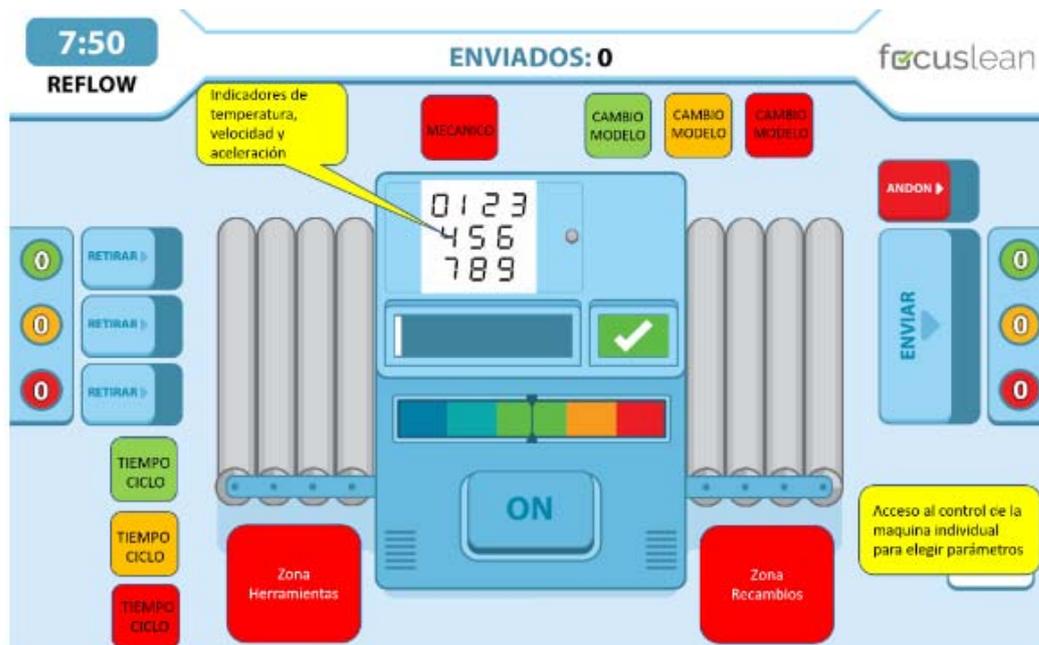


Imagen 1.4 Puesto Reflow

La diferencia que presenta la máquina TEST respecto a REFLOW y OLA es que ésta es la única que trabaja con 4 piezas a la vez, las cuales no tienen por qué ser del mismo color.

La tableta que representa al puesto QA tiene los almacenes de entrada igual que las anteriores y lo que hace es comprobar que en las tres fases de producción se haya trabajado correctamente. Si detecta que hay fallos en la pieza, la envía al puesto más lejano del final de cadena que pueda corregirlo para que sea reparada, y vuelva a pasar el proceso. Si no detecta fallo alguno, la envía a los almacenes finales donde el cliente podrá recogerla.

La tablet del cliente funciona cada cierto tiempo lanzando un dado que elige al azar entre los tres tipos de productos que hace la planta, con unas probabilidades de: 70% verde, 20% amarillo y 10% rojo. Después, da un tiempo de reacción para poder ser abastecido y, cumplido ese tiempo, se lleva la primera pieza disponible de ese tipo del almacén final. Si la mencionada pieza no está, se va sin pieza alguna.

La decimotercera tableta, la que mantiene el profesor, es la que marca el arranque y la finalización del juego, marca los parámetros que siguen cada una de las otras

tabletas y hace la función de mecánico que arregla las averías que sufren a lo largo del juego.

En el transcurso de la clase se "juega" tres veces con LKT:

- ❖ La primera partida se juega sin apenas información, no se conoce cómo es el sistema productivo. Los puestos se encuentran sucios, con chatarra desperdigada y con cosas innecesarias para la realización del puesto.
- ❖ La segunda partida se realiza después de implantar las primeras 3s de la herramienta 5s y de explicar cómo es el sistema productivo de la empresa, por lo que los puestos se encuentran ya limpios, con las herramientas necesarias y sin restos de chatarra en el puesto.
- ❖ La tercera partida se juega añadiendo las últimas 2s y, gracias a lo visto en la anterior partida, se hacen mejoras de reducir las averías y así impedir que los puestos vuelvan a ensuciarse.

1.4 NPLUS1

Para pasar de la versión LKT a la NPLUS1 se quieren tener en cuenta los resultados de los anteriores experimentos o clases en el funcionamiento de la aplicación durante el transcurso de esta nueva clase, para ellos los parámetros de entrada se irán modificando después de cada clase.

Además, en la siguiente versión de la aplicación se quiere modificar el sistema, pasando así del actual sistema productivo a uno que funcione en línea. Por ese motivo, se realiza este trabajo de simulación con Witness en el cual se van a crear y evaluar los escenarios en los que se hace una transformación progresiva de los puestos.

En el primero, las máquinas M1, M2 y M3 van a pasar de funcionar en paralelo a hacerlo en serie.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

En el segundo, se añade al primer cambio: las máquinas M4 y M5 pasan también a funcionar en serie.

En el tercero se terminan de poner todas las máquinas o puestos del sistema en paralelo.

En el cuarto escenario se añaden los Kanban de producción para limitar y controlar lo que se produce en cada puesto y así tener un control del WIP y el Lead time.

Capítulo 2: Lean Manufacturing

2.1 Introducción:

Siguiendo lo aprendido de Mike Rother (2017) y la información de CPMformación (2018) puedo decir que:

Lean Manufacturing es una forma de trabajo que se está implantando en Europa y América debido al gran éxito que tiene la compañía japonesa Toyota. Esta metodología consiste en eliminar todo desperdicio, entendiendo por desperdicio: basura, chatarra, almacenes intermedios y finales (excesivos), desplazamientos de operario, actividades que no generan valor añadido al producto, etc.

Toyota es la empresa de referencia y a la que todos tratan de imitar cuando intentan aplicar el Lean Manufacturing, pero erróneamente se preguntan “¿Qué haría Toyota en esta circunstancia?”, cuando lo que hay que preguntarse es: “¿Cómo actúa Toyota ante cada circunstancia?”.

La gran diferencia entre Toyota y el resto de las empresas es que, en las demás empresas, ante cualquier problema, lo primero que se hace es buscar una solución rápida que lo solucione temporalmente, para seguir produciendo o lo retrase hasta que vuelva a surgir. En Toyota, por el contrario, todos los problemas son tratados con la intención de aprender de ellos e implementar soluciones definitivas, evitando el surgimiento de esos mismos problemas, y aplicando así lo aprendido en otros puntos de la factoría.

En Toyota tienen un sistema de alerta que se podría llamar “tirón de cuerda”. La tendencia es que haya mil tirones de cuerda por día, es decir, mil problemas por día que deben ser analizados y corregidos. En un momento se redujo el número de tirones por día a setecientos. Al ver esto, cualquier empresa se alegraría

pensando en la mejoría de la situación. Toyota, en cambio, reunió a la factoría en cuestión para cuestionarse el motivo de dicha bajada y animar a que los operarios tiraran de la cuerda, considerando que tenían capacidad para tratar los mil problemas día, y si no los había, habría que bajar el nivel de los stocks intermedios para provocar nuevos problemas y volver a llegar a los mil tirones día.

Esta diferencia de reacción es lo que hace que Toyota sea una verdadera empresa Lean, ya que su primera intención es la mejora continua, y no hay otra forma de mejorar que resolviendo los problemas que surgen en el día a día de la compañía.

“Si no tenemos problemas... tenemos un problema”

Libro Toyota Kata de Mike Rother (2017).

Como se puede ver en imagen 2.1 existe una gran variedad de herramientas Lean (y no aparecen todas las que hay), que pueden ayudar a avanzar a tu empresa hacia la filosofía de Toyota. El uso de estas herramientas no asegura que tu empresa siga la filosofía Lean, como tampoco es necesario utilizar todas ellas para conseguirlo. A continuación, se explican algunas de las más utilizadas.



Imagen 2.1 Herramientas Lean (CPMformación, 2018)

2.2 El ciclo de Deming:

Recogiendo el trabajo de Elisenda García (2016) y con los conocimientos adquiridos durante la carrera se puede decir que:

El ciclo de Deming es comúnmente conocido como ciclo PDCA por sus siglas en inglés Plan, Do, Check, Act que significan: planificar, hacer, verificar y actuar, respectivamente. Es una herramienta de mejora continua que se aplica tanto en el sector industrial como debería utilizarse en todos los ámbitos cotidianos de la vida. Este ciclo basa su actividad las cuatro actividades que forman su nombre:

- ❖ Plan: primera fase del ciclo. Primero analizamos los problemas o actividades que se podrían mejorar, de entre ellos, elegimos cuál es el siguiente que se va a abordar, qué paso se va a dar, cómo se va a llevar a cabo y cuál es el resultado deseado a la acción que acometeremos.
- ❖ Do: ahora toca llevar a cabo el trabajo planificado, controlando qué se realiza de acuerdo a lo planeado para asegurarnos que vamos en la dirección indicada.
- ❖ Check: una vez terminada la implantación de la medida se realiza la comprobación de los resultados obtenidos y se hace la comparación con los resultados objetivo que se habían planificado.
- ❖ Act: tras dicha comparación, si el resultado es el esperado o mejor que el planificado, habrá que añadir al estándar la acción tomada (el avance de la cuña en la imagen 2.2). Si no es así, deberemos tomar acciones correctivas y preventivas que mejoren el resultado obtenido o volver al estado inicial si el resultado es muy negativo.

Una vez terminado el paso Act, con todo lo aprendido en ese ciclo, volveríamos a empezar un nuevo ciclo en el que abordaríamos el mismo problema o uno nuevo que ahora se considere más importante.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

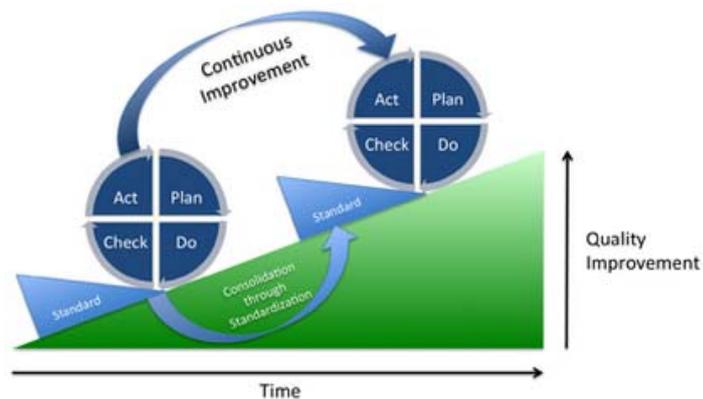


Imagen 2.2 Ciclo de Deming (Miguel, 2013)

2.3 Las 5S:

Con la información extraída de Brayan Salazar López (2016) y Carlos López (2001) sobre este tema:

Las 5S es una herramienta de organización que basa su actividad en cinco principios, designados con las palabras japonesas: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke:

- ❖ Seiri: significa clasificar. Consiste en seleccionar las herramientas, útiles e información que no sirven y quitarlas del lugar del trabajo. Evaluar si se pueden reparar y seguir utilizando los instrumentos y máquinas que estén dañados, o deben ser desechados. El resto se evalúa si pueden ser aprovechados por otro puesto de trabajo, en cuyo caso, se transfiere a este puesto, o por otra entidad, en este caso se vendería o cedería a esa empresa, o bien se descartaría, en caso de no tener utilidad. Se puede ver este proceso en la imagen 2.3.

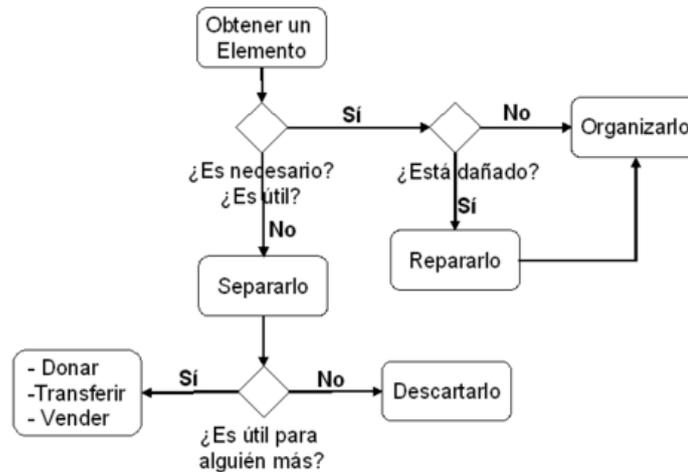


Imagen 2.3 Proceso Seiri (Castro, 2016)

- ❖ Seiton: significa ordenar. En este paso lo que se debe hacer es, una vez visto el material que sí sirve para el puesto de trabajo en el Seiri, se cataloga en función de la frecuencia de uso. Si el trabajador lo utiliza constantemente, deberá llevarlo encima; si lo usa varias veces al día, deberá tenerlo con un acceso sencillo; si lo utiliza todos los días, deberá tenerlo en el puesto de trabajo o mesa; si lo utiliza más de una vez al mes, deberá tenerlo guardado cerca del puesto de trabajo; y, fuera de los casos anteriores, deberá guardarse en el almacén bien señalada su posición. Hay que definir la cantidad que hay de cada útil y marcar dónde se ubica cada uno, de esta forma se podrá disponer de un lugar para dejar siempre cada cosa en su sitio cuando no esté en uso, y así saber dónde está cuando haya que buscarla para su próximo uso. Como se puede ver en la imagen 2.4 es mucho más sencillo encontrar la herramienta correcta en la mesa de la derecha.

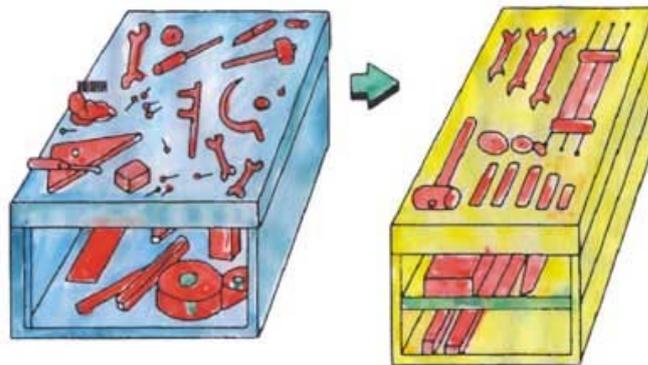


Imagen 2.4 Seiton (Pérez, 2015)

- ❖ **Seiso:** significa limpiar. En este paso lo que se hace es limpiar y acondicionar el puesto. Con esto se logra una mayor ergonomía del puesto y poder encontrar los focos de emisión de suciedad, tales como: fugas de aceite, grasa, etc., y así ser capaces de eliminarlos para mejorar el rendimiento del puesto de trabajo y conseguir, además, un ahorro (si eliminamos una fuga de aceite, ahorramos tener que sustituir ese aceite en la máquina). También se delimitan las zonas seguras para el trabajador y aquellas que no lo son.

Es importante que el trabajador entienda qué parte de su trabajo es mantener su puesto ordenado y limpio para que el Seiso cumpla con su función.

- ❖ **Seiketsu:** significa estandarizar. En esta etapa lo que se pretende es que se mantenga a lo largo del tiempo lo realizado en las anteriores etapas. Esto se hace formando a los trabajadores en el mantenimiento de sus puestos de trabajo, la implantación de moldes o plantillas con el estado de referencia en el que debe estar el puesto de trabajo, la creación de normas y manuales de catalogación, orden y limpieza. En la imagen 2.5 se ve como se han colocado carteles que indican dónde hay que depositar los residuos, dónde se guardan las escobas y cuál es el puesto de trabajo.



Imagen 2.5 Seiketsu (IMTI, 2018)

- ❖ Shitsuke: significa sostener. En esta etapa se pretende generar una cultura del respeto por los estándares establecidos y los logros conseguidos en organización, orden y limpieza. Para ello, se realizan controles de estado, visitas sorpresa, etc. También se intenta promover la filosofía de la mejora continua y enseñar a los trabajadores las mejoras conseguidas gracias a la metodología 5S, ya sean de ergonomía o de beneficio para la compañía.

2.4 Teoría de las restricciones:

Con los trabajos de Cristina Masa Lorenzo (s.f.) y Lean Manufacturing¹⁰ (2018) sobre el TOC se puede decir de esta herramienta que:

La teoría de las restricciones también conocida como TOC (por sus siglas en inglés (Theory of Constraints), es una herramienta de control del Lean Manufacturing que busca maximizar la producción de un proceso productivo trabajando sobre los cuellos de botella.

El cuello de botella marca el Tack Time y la capacidad productiva máxima de la empresa o fábrica, por eso es importante centrar los esfuerzos en mejorar esta parte de la cadena, puesto que por pequeña que sea la mejora se notará en el resultado final, aunque no se consiga que esta actividad deje de ser el cuello de botella.

Esta teoría tiene cinco pasos:

- ❖ El primero es identificar las limitaciones del sistema productivo, ya sea por falta de disponibilidad o un mal aprovechamiento.
- ❖ A continuación, hay que trazar un plan de acción con el que se pretende mejorar la situación de dicha limitación.
- ❖ Una vez establecido el plan a seguir, se concentran los recursos de la empresa en llevarlo a cabo.
- ❖ Una vez ejecutado, hay que medir los resultados obtenidos y comprobar si se ha cumplido con lo planeado y se ha mejorado el estado del cuello de botella.
- ❖ Una vez mejorado el estado del cuello de botella, hay que comprobar si esta actividad sigue siendo la limitación del proceso o con la mejora obtenida se ha conseguido trasladar el cuello de botella a una actividad distinta, teniendo que volver al primer paso en un ciclo infinito.

Hay que considerar que la Teoría de las restricciones no considera únicamente los procesos productivos de la fábrica, sino que también tiene que considerar los suministros, la logística de abastecimiento interna y la capacidad para poner el producto en el mercado. Se puede estar fabricando con una gran calidad una gran cantidad de productos que, si no hay capacidad de venta, se estará desperdiciando los recursos productivos (siendo en este caso la venta de productos el cuello de botella).

2.5 Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE):

Con la información obtenida de Manu Álvarez (2014) y Juan Martín (2017) se puede introducir el tema del AMFE de la siguiente manera:

El Análisis Modal de Fallos y Efectos es una herramienta surgida en los años cuarenta de la mano de las fuerzas armadas americanas y popularizada en los años setenta. Este sistema busca ahorrar tiempo y esfuerzos económicos en las distintas fases de desarrollo por las que pasa el producto, buscando los posibles fallos antes de que ocurran y encontrando la alternativa para que nunca lleguen a ocurrir, disminuir su impacto y/o frecuencia y conocer el momento de la vida útil del producto en que estos fallos ocurrirán.

El ANFE se realiza en tres etapas: enumerar los posibles fallos, establecer el orden de prioridad y priorizar los modos de fallo y buscar la solución.

- ❖ Enumerar los posibles fallos: lo primero es crear un equipo multidisciplinar que se encargue de buscar los fallos y posibles malos usos que se pudieran hacer del producto. Este grupo trabaja en analizar cada uno de los componentes y materiales de los que va a estar hecho el producto, analizando si estos materiales son adecuados para el producto y cómo los componentes aguantarán el trabajo para el que están diseñados.

- ❖ Establecer el orden de prioridad: una vez conocidos todos los posibles fallos del producto, hay que analizarlos siguiendo 3 criterios (algunas fuentes consideran cada nivel una etapa distinta):
 - Nivel de severidad: Indica lo grave y perjudicial que es el fallo encontrado.
 - Nivel de incidencia: Da la frecuencia con la que ocurre dicho fallo.
 - Nivel de detección: Aporta la capacidad de conocer si ha ocurrido el fallo antes de que se utilice el producto dañado.

Estos niveles son evaluados del 1 al 10, siendo 1 la mejor situación posible y 10 la peor. Una vez evaluados, se calcula el índice de probabilidad de fallo, este número surge del producto de los tres niveles. Por lo que el resultado estará comprendido entre 1 y 1000.

- ❖ Priorizar los modos de fallo y buscar la solución: la tercera fase es establecer la prioridad siguiendo el índice de probabilidad de fallo. Hay que fijar un valor de referencia que sirva de tope de los fallos que no se pueden dejar pasar. Habrá que trabajar en mejorar el nivel que haya aportado el peor resultado en cada uno de los fallos, tratando los fallos con peor índice primero.

Cuando se haya elegido una medida para reducir el índice de probabilidad de fallo hay que volver a evaluar los 3 niveles y ver si se ha conseguido reducir lo suficiente para pasar el corte previamente fijado.

Esta herramienta aporta, entre otras ventajas: un incremento de la calidad final, una mejora de imagen de la compañía asociada a ese incremento, mejor valoración del cliente, disminución del tiempo de desarrollo, reducción de la cantidad de pruebas necesarias para que el producto esté listo para mandar al mercado con su ahorro económico y temporal asociados, una mejor definición de la garantía del producto al conocer los posibles fallos y cuando ocurrirán, y un mayor esfuerzo en la reducción de los fallos al poder conocerlos antes de que se desarrolle el producto.

2.6 Mantenimiento Productivo Total (TPM):

Se ha podido recoger la información del TPM de Bryan Salaz López (2016) Jonathan Calle (2018) y Lic Viviana Liptzis (2017), y tratar así el tema:

El mantenimiento productivo total conocido como TPM por sus siglas del inglés (Total Productive Maintenance) es una metodología diseñada para mantener los equipos y máquinas en buen estado y correcto funcionamiento, trabajando en principios de prevención, cero defectos y accidentes, y la involucración total de los trabajadores. Esto último quiere decir que algunas tareas de mantenimiento preventivo podrán ser efectuadas por el personal de producción en vez de solo por el personal de mantenimiento.

El TPM tiene en consideración que los equipos de trabajo tienen un desgaste natural sobre el que no se puede actuar, pero también tienen un desgaste forzoso, sobre este segundo es sobre el que se trabaja para evitarlo o, al menos, reducirlo en la mayor medida posible. Puesto que una máquina en buen estado produce menos unidades no conformes (reflujos o chatarra), aumenta su tiempo disponible y con ello su productividad. El TPM planifica un mantenimiento preventivo que busca eliminar los mantenimientos correctivos, puesto que el primero es planificado (sabes qué, cuándo y cómo) y menos costoso que el segundo.

El TPM se fundamenta sobre ocho pilares, seis clásicos (1 mejoras enfocadas, 2 mantenimiento autónomo, 3 mantenimiento planificado, 4 mantenimiento de calidad, 5 educación y entrenamiento, 6 seguridad y medio ambiente) y dos nuevos que se han colocado por delante del quinto, que son: la excelencia administrativa y la gestión temprana.



Imagen 2.6 TPM (Calle, 2018)

- ❖ Mejoras enfocadas: Busca encontrar una oportunidad de mejora en la planta, eliminando o reduciendo desperdicios, entendiendo por desperdicio: todo aquello que no genera valor, ya sea material o pérdidas de tiempo. La tendencia es utilizar ciclos de Deming para llevar estas mejoras a cabo.

- ❖ **Mantenimiento autónomo:** Quiere implicar a los trabajadores de producción en las tareas de mantenimiento sencillas para que así conozcan mejor su puesto de trabajo y puedan entender, cuando algo no funciona correctamente, cuál puede ser el motivo y así poder reaccionar o avisar para que se eviten problemas mayores. El JIPM (Japan Institute of Plant Maintenance) recomienda un procedimiento de siete pasos para involucrar a estos operarios que se ven en la tabla 2.1.

Etapa	Nombre	Descripción
1	Limpieza Inicial	Eliminación de suciedad, escapes, polvo, identificación de "funguai"; ajustes menores
2	Acciones correctivas en la fuente	Evitar que el equipo se ensucie nuevamente, facilitar su acceso, inspección y limpieza inicial; reducir el tiempo empleado en la limpieza profunda
3	Preparación de estándares de inspección	Se diseñan y aplican estándares provisionales para mantener los procesos de limpieza lubricación y ajuste. Una vez validados se establecerán en forma definitiva
4	Inspección general	Entrenamiento para la inspección haciendo uso de manuales, eliminación de pequeñas averías y mayor conocimiento del equipo a través de la verificación.
5	Inspección autónoma	Formulación e implantación de procedimientos de control autónomo
6	Estandarización	Estandarización de los elementos a ser controlados. Elaboración de estándares de registro de datos, controles a herramientas, moldes, medidas de producto, patrones de calidad, etc. Elaboración de procedimientos operativos estándar. Aplicación de estándares
7	Control Autónomo pleno	Aplicación de políticas establecidas por la dirección de la empresa. Empleo de tableros de gestión visual (Andon), tablas MTBF y Tableros Kaizen

Tabla 2.1 Procedimiento de mantenimiento autónomo. Tabla de elaboración propia a partir de López B.S. (2016)

- ❖ **Mantenimiento planificado o mantenimiento preventivo:** consiste en la inclusión de medidas periódicas para prevenir y corregir pequeñas averías en las instalaciones, basándose en los datos históricos para

mejorar el estado de las máquinas y así evitar el desgaste forzoso de dichos equipos. Hay que tener en cuenta que no se le puede hacer el mismo mantenimiento a dos máquinas con distinto nivel de desgaste, aunque sean del mismo proceso productivo. Los planes de mantenimiento tienen que estar descritos al detalle para que se realice correctamente y no se quede alguna medida sin realizar o sin completar por falta de información. Además, hay que tener la lista de repuestos actualizada y revisarla periódicamente.

- ❖ **Mantenimiento de calidad:** enfocado a conseguir cero defectos. Lo primero que hay que tratar es analizar los fallos que se producen en la fabricación, su frecuencia, sus posibles causas y el efecto que causan. Una vez conocidos los problemas, hay que hacer el análisis preventivo a la máquina que los ocasiona, para evitarlos. Se establecen las condiciones de trabajo en las que tiene que trabajar dicha máquina para que no vuelvan a surgir esos fallos y se estandarizan. Se prepara un plan de inspección de los factores que causan el fallo y se le da una periodicidad.
- ❖ **Gestión temprana o prevención del mantenimiento:** consiste en planificar los procesos preventivos y su frecuencia antes incluso de comprar una nueva máquina o equipo.
- ❖ **Excelencia administrativa o mantenimiento áreas soporte:** cuando se habla de Administración o área soporte se refiere a los departamentos de compras, recursos humanos ingeniería, etc. Es decir, a aquellos que no pertenecen a la producción directa. La involucración de estos departamentos en el TPM tiene el objetivo de ayudar a reducir los costes del trabajo en los departamentos productivos con el abastecimiento, la logística interna y externa, etc.
- ❖ **Educación y entrenamiento:** como parte del Lean Manufacturing uno de los pilares tiene que estar enfocado a las personas y cambiar su forma de pensar o hábitos. El séptimo pilar del TPM marca como objetivo para el

área de producción que los empleados deben ser capaces de realizar análisis avanzados del mantenimiento del equipo, debe haber una promoción de especialistas y el desarrollo de centros de formación y entrenamiento. En los cargos directivos debe haber personal formado y capaz de enseñar y llevar un seguimiento del trabajo TPM que se realiza en el taller.

- ❖ Seguridad y medio ambiente: el octavo pilar persigue tener cero accidentes y cero contaminaciones. Este pilar debe ser aplicado desde el principio buscando que todas las actividades que se realicen en el taller sean desde el lado de la seguridad y el respeto por el medio ambiente. El rendimiento de una persona aumenta al trabajar en un entorno seguro y agradable.

2.7 Kanban

Kanban es una palabra japonesa que está formada por "kan", que significa pictograma o visual, y "ban", que significa tarjeta o cartón, por lo que se puede traducir como tarjeta visual.

Esta herramienta tiene su origen en la empresa Toyota, y está muy extendida entre las empresas que se dedican al desarrollo de software, al necesitar tener un gran control de lo que se está trabajando en cada momento y el estado en el que se encuentra dicho trabajo. Aunque no es específica de este sector y ya se está introduciendo en el mundo de la fabricación.

El objetivo del Kanban es controlar y decidir el orden en el cual se desarrollan los trabajos, para ello el tablero Kanban supone una representación del flujo físico que siguen los productos, indicando: dónde se encuentran, si están sin trabajar, en proceso, en calidad o completadas, esperando a pasar al siguiente puesto.

Javier Garzas trata tres reglas principales para la utilización del Kanban:

- ❖ Primera: "Visualizar el trabajo en Kanban y las fases del ciclo de producción". Para recrear los estados en los que puede estar un producto se utiliza un tablón Kanban que se divide en columnas, siendo cada columna cada uno de los estados por los que van a pasar los diferentes productos o pedidos. En estas columnas o estados se pegan los post-it que indican esos pedidos o productos y sus especificaciones. Al tener reflejados los trabajos en las distintas columnas, se puede saber echando un vistazo rápido en qué está trabajando cada uno y cuál será la siguiente tarea que deberá hacer.

Un ejemplo para explicar esto puede ser un restaurante. En el tablón estarían: "atender la mesa", "preparar el pedido", "servir la comida", "cobrar" y "arreglar la mesa"; los post-it corresponderían uno a cada mesa y dentro de cada uno, se indicarían las especificaciones de los pedidos de las distintas mesas.

- ❖ Segunda: "determinar el límite del trabajo en curso". El trabajo en curso se conoce como WIP (son las siglas inglesas de "Work In Progress"). El WIP indica el número de trabajos o tareas que hay en el sistema en ese momento. Este WIP debe ser limitado en cada fase para evitar que se acumulen los trabajos en un mismo puesto, de esta manera, para que un puesto pueda hacerse cargo de una nueva tarea tiene que dar salida primero a una de las que ya tiene dentro. Por lo que la existencia de WIP lleva a que los puestos se centren primero en acabar las tareas que tienen en proceso, en vez de ir trabajando en muchas tareas.

Siguiendo el ejemplo anterior; el límite de WIP máximo del restaurante se encuentra en el número de mesas que posee dicho restaurante. "Atender la mesa", "servir la comida", "cobrar" y "arreglar la mesa" dependerá del número de camareros de los que disponga el restaurante y "preparar el pedido" del número de cocineros y puestos de calor.

- ❖ Tercera: "Medir el tiempo en completar una tarea". Esto se refiere a controlar el Lead Time, es decir, el tiempo que transcurre desde que una tarea, producto o cliente entra, hasta que sale del sistema. También hay otro parámetro que mide el rendimiento del sistema: el cycle time, que marca el tiempo que tarda una estación en completar una tarea. El sumatorio de los cycle time del proceso, dividido entre el Lead Time da el rendimiento del proceso. Este valor no puede ser mayor que 1 y cuanto más se aproxime a este valor, menos sobrecostes y esperas tendrá.

Capítulo 3: Simulación

3.1 Introducción:

Según Robert E. Shannon “Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema.”

Aunque aquí el tipo de simulación que interesa es la conocida como “por ordenador” existen otros tipos de simulación, como pueden ser:

- ❖ Persona-Persona: Es un tipo de simulación en el que dos o más personas ensayan cómo podría ser, por ejemplo, una entrevista, de tal forma que se enseñen mecanismos o trucos para tener éxito cuando se realice la entrevista real.
- ❖ De sistema: En este tipo de simulación se recrea un escenario que puede ocurrir en la naturaleza o vida cotidiana en condiciones controladas, para aprender de ello. Un ejemplo podría ser la combinación de dos sustancias en un laboratorio o la combustión de un determinado material.
- ❖ Persona-Ordenador: Este tipo de simulación se utiliza al igual que el Persona-Persona para adiestrar o entrenar habilidades, solo que en esta ocasión una sola persona se enfrenta a una simulación programada que pondrá a prueba sus habilidades o conocimientos. Algunos ejemplos de

esta simulación son: simuladores de vuelo para pilotos, los juegos de estrategia y Rol o, incluso, los test de prueba de la autoescuela.

- ❖ Por Ordenador: Este es el tipo de simulación que se utiliza en el entorno industrial. Introduciendo unas variables de entrada al sistema, el ordenador nos devuelve otras de salida en función de los algoritmos internos del programa o software.

Los softwares de simulación son una herramienta cada vez más utilizada para analizar el funcionamiento de una instalación antes de invertir grandes cantidades de dinero en la implantación de la misma. También es utilizada para “probar” cómo cambia el funcionamiento de la misma al realizar distintos ajustes, sin correr el riesgo de estropear realmente el funcionamiento o ritmo de la cadena de montaje si dicho ajuste no es adecuado para la cadena de producción.

3.2 Softwares de simulación:

Algunos de los softwares más utilizados son:

- ❖ ARENA: este programa creado en el año 2000 permite simular procesos muy variados, desde el funcionamiento de colas hasta complejos procesos de fabricación. Su sistema de simulación es por eventos, es decir, muestra el instante en el que ocurre algo en el proceso.
- ❖ Aspen Plus: este programa de la empresa Aspen Tech, cuyo nombre proviene de las siglas en inglés de Advanced System for Process Engineering, que significa sistema avanzado de ingeniería de procesos, es un software de simulación orientado a sistemas de flujo continuo, siendo uno de los más extendidos.
- ❖ HYSYS: este programa de simulación de 1996 está orientado a la recreación de problemas de procesos químicos. Muy enfocado para su

utilización en plantas de la industria petroquímica. Pertenece a la empresa Aspen Tech, al igual que el Aspen Plus.

- ❖ ProModel: es un software de simulación muy sencillo que permite modelar sistemas de producción o de ventas sencillos. Está enfocado a lograr una optimización de costos sin alterar el nivel de servicio.
- ❖ SIMNET II: este programa creado en 1987 se centra en resolver problemas de colas utilizando un lenguaje de simulación discreta basado en rojo.
- ❖ TAYLOR II: este programa surgió en 1986 de la mano de la empresa F & H Simulaciones B.V. Es un programa válido para desarrollar simulaciones de elementos discretos que van a sufrir transformaciones, transportes y colas o esperas.
- ❖ WITNESS: la primera versión de esta herramienta apareció en el mercado en 1986. Es muy versátil, ya que permite la simulación de elementos discretos y continuos y simular tanto en tiempo continuo como por eventos. Permite la programación modular, por lo que un equipo puede trabajar a la vez en el modelo en distintos equipos. Esta herramienta ha sido la utilizada para realizar este trabajo, por lo que en el siguiente apartado se desarrollará más en profundidad.

3.3 WITNESS

La herramienta de simulación Witness permite crear modelos de gran complejidad con hasta 32000 parts diferentes que entran y salen de él.

Para crear un modelo con Witness hay que diseñar todos los elementos del sistema. Para ello hay que seguir tres etapas:

- ❖ Define: Se crean los distintos elementos, asignando a cada uno el tipo que son, y un nombre propio, que no podrá compartir con otro elemento, aunque sea de un tipo distinto.
- ❖ Display: Se hace la representación gráfica del elemento. Aunque esta etapa no es realmente necesaria para que el modelo funcione, su representación gráfica ayuda a la comprensión del mismo y facilita la corrección de errores que puedan ocurrir al realizar la programación.
- ❖ Detail: En esta etapa se crean las interrelaciones de los distintos elementos y se detalla el funcionamiento de cada uno de ellos.

Cuando se quiera borrar un elemento con Delete, primero es necesario asegurarse de que dicho elemento no está relacionado con ningún otro, puesto que, de otra manera, dará error al intentarlo.

3.3.1 Parts

Los Parts son elementos discretos que pueden representar personas, animales, coches o batidoras, por ejemplo, y fluyen por el sistema, entran desde un elemento predefinido llamado "World" y salen a otro elemento predefinido que puede ser "Ship", "Scrap" o "Assemble".

Para definir un part hay que darle un "Name", "Type", si es fijo o variable; en caso de ser fijo "Values" a sus atributos, "Arrival Mode", si es activo o pasivo, y en caso de ser activo; "Maximun Arrivals", "Inter Arrival time", "First Arrival at", "Lot size".

3.3.2 Machines

Los Machines son las máquinas o puestos de trabajo del modelo. Cogen las parts por una regla de entrada y, tras realizar unas acciones en ellas en su tiempo de ciclo, las envían al siguiente puesto por una regla de salida. Hay varios tipos de máquinas:

- ❖ Single: entra una sola pieza, se procesa y sale una sola pieza.
- ❖ Batch: entran las piezas hasta completar un lote de piezas, son procesadas juntas y salen en el mismo lote de piezas a la vez. El tiempo de ciclo no empieza hasta que todas las piezas del lote se encuentran en la máquina.
- ❖ Assembly: entran varias piezas que son ensambladas y salen como una sola pieza. El tiempo de ciclo no empieza a contar hasta que la máquina dispone de todas las piezas para hacer el ensamble.
- ❖ Production: entra una pieza en la máquina y, tras el procesado, sale esa misma pieza más una cantidad establecida de otro tipo de pieza que ha sido producida.
- ❖ General: Entra una cantidad fijada de piezas y sale otra cantidad de esas mismas piezas. Si las piezas que entran son de distinto tipo y a la salida solo hay una pieza, dicha pieza será del tipo de la primera que entró en la máquina. Su tiempo de ciclo no empieza hasta tener todas las piezas necesarias en su interior.
- ❖ Multi-Station: Máquina con varias posiciones en la que entran piezas de una manera secuenciada y salen en la misma secuencia de la máquina.

Para definir una machine es necesario darle un "Name", una "Quantity", que es el número de máquinas exactamente iguales funcionando en paralelo; el "type", que se han detallado anteriormente; sus "Input rules" y "output rules", que son los orígenes y formas de entrar de las parts en las máquinas; su "cycle time", los "breakdowns" que pueda sufrir la máquina; si necesita "labour" para funcionar o para ser reparada, su "Set up" de puesta en marcha o cambio de ráfaga, y las "actions" que realiza.

3.3.3 Buffers

Los almacenes o Buffers son los elementos donde se almacenan las parts cuando están esperando a ser procesadas por una máquina. Simulan el funcionamiento de un almacén o una cola de espera.

Para definir el buffer es necesario darle un "Name", el "Quantity" de cuantos hay funcionando iguales, su "Capacity", que es el número máximo de parts que puede almacenar a la vez, "Input position", que indica donde se colocan las piezas al entrar, "output position", el cual indica cómo abandonan las piezas el buffer y "search from", que indica cómo escanea el programa al buffer en busca de la pieza que desea coger.

3.3.4 Conveyors

El conveyor o transporte simula el funcionamiento de una cinta transportadora, una escalera mecánica o un karakuri, por ejemplo. Existen dos tipos de conveyor:

- ❖ Fixed: los parts mantienen siempre la misma distancia. Si uno se bloquea, todos quedan detenidos en el mismo momento, como ocurriría en la escalera mecánica.
- ❖ Queuing: Los parts pueden estar a cualquier distancia uno de otro. Cuando el primero se bloquea los demás se acercan hasta quedarse pegados al anterior, como es el caso de un karakuri.

Para definir un conveyor es necesario darle un "Name", la "Quantity" de cuántos hay funcionando en paralelo; el "type", visto anteriormente; el "Part Length", que es el número de posiciones del conveyor; "Max Capacity", número máximo de parts que puede haber a la vez en él; "cycle time", tiempo que tardan las parts en pasar de una posición a otra; "Rule input" y "Rule output" referidos a cómo entran y salen las parts del conveyor y los posibles "Breakdowns" (roturas) que puede sufrir.

3.3.5 Labour

Los Labours son las herramientas o trabajadores que hacen falta para que otro elemento del sistema funcione correctamente, ya sea para realizar su set-up, arreglar una rotura o el funcionamiento ordinario de dicho elemento.

Para definir el Labour es necesario darle un "Name", la "Quantity" de cuántos iguales hay en el modelo; el "PRE-EMPT LEVEL", referido a la prioridad que tienen las tareas que debe hacer, y si deja de hacer una al haber otra más prioritaria; la "Allowance", que es el tanto por uno al cual un labour termina la tarea que está haciendo antes de pasar a la siguiente; y el "Time penalty", que es el tiempo que añade a la tarea que abandona por el hecho de haberla abandonado.

3.3.6 Tracks y Vehicles

El vehicle es un medio de transporte que puede llevar lotes de parts de un punto a otro de la simulación. Para ello necesita recorrer una serie de Tracks o caminos, haciéndolo siempre desde la parte trasera hacia la frontal.

- ❖ Para definir un vehicle es necesario dotarle de un "Name", de la "Quantity", de cuántos iguales hay, la "Capacity" de parts que puede llevar cada uno y la "Entry to rule", que indica dónde empieza el vehicle en la simulación.

- ❖ Para definir un track es necesario asignarle un "Name", indicar la "Quantity" de elementos iguales a ese, la "Zone" en la que se agrupa, la "Capacity" de vehicles que puede tener a la vez, la "Duration", tiempo que estará el vehicle en dicho track; las "actions on" que se pueden hacer cuando un vehicle entra en el track; y la "Output Rule", que marca la ruta que seguirá el vehicle al siguiente track.

3.3.7 Modules

Los módulos son agrupaciones de los anteriores elementos que guardan como un sub-modelo para poder replicarlo en caso de que la simulación disponga de varias estaciones en la que se trabaje de la misma manera, y de esta forma ahorrar tiempo y facilitar el trabajo en la simulación.

3.3.8 Elementos en sistemas continuos

- ❖ Los Fluids son el equivalente a las Parts de los sistemas continuos, representan un líquido u otro fluido que pasa de manera continua a través del sistema.
- ❖ Los Processors son los sustitutos de las machines para los procesos continuos, operan con los fluidos pudiendo transformarlos en otros o mezclarlos.
- ❖ Los Tanks son los recipientes donde se almacenan los fluidos en lo que esperan a ser procesados por los processors, equivalen a los buffers.
- ❖ Los Pipers o tuberías son los elementos utilizados para transportar los fluids por el sistema, equivalen a los conveyors en el sistema tradicional.

3.3.9 Attributes

Los atributos son cualidades que se le atribuyen a las parts, pueden ser nombres o valores numéricos y son introducidos o cambiados por las actions de los diferentes elementos cuando son atravesados por la Part. Hay dos tipos de atributos:

- ❖ Fixed: en este tipo de atributos su valor tiene que ser el mismo para todos los part que representen el mismo tipo de cosa.
- ❖ Variable: para este otro tipo su valor puede cambiar entre dos part distintas que representen al mismo tipo de cosa.

Para especificar un Attribute es necesario asignarle un "Name", un "Quantity", puesto que puede ser un único valor o un vector; y el "Type" de attribute, si es de caracteres, numérico, entero o real.

3.3.10 Variables

Las variables son elementos que contienen nombres de elementos o valores numéricos. Pueden cambiar su valor en diferentes momentos debido a las actions, y, a diferencia de los attributes, no van relacionados a ningún part.

Para especificar una variable es necesario asignarle un "Name", un "Quantity", puesto que puede ser un vector o incluso una matriz (para este caso hay que poner el número de filas y columnas separados por una coma), y el "Type", si es de caracteres, numérico, entero o real.

3.3.11 Distributions

Las distribuciones dotan de aleatoriedad al sistema. Witness trae por defecto gran variedad de distribuciones enteras y reales y, además, permite crear nuevas distribuciones empíricas dotándolas de un nombre y de los valores y probabilidad de que estos ocurran.

Witness tiene una gran cantidad de semillas para generar números pseudo-aleatorios para crear sus modelos, al mismo tiempo, la simulación de Witness siempre se corre con la misma semilla para asegurar que los cambios que sufren los resultados al alterar el modelo sean motivo únicamente de la alteración del modelo y no de la aleatoriedad del mismo.

Para comprobar que el modelo es robusto y válido se pueden correr varias simulaciones con distintas semillas. Si los resultados obtenidos son similares, se puede considerar que se ha demostrado con éxito.

3.3.12 Elementos de entrada y salida

Existe un único elemento de entrada y tres elementos de salida:

- ❖ **World:** es el único elemento de entrada predefinido. Este elemento dispone de una cantidad infinita de todos los parts que se hayan podido crear en el modelo.

- ❖ **Ship:** este elemento de salida es al que se envían los parts que abandonan el modelo de una forma satisfactoria, es decir, por donde salen los clientes, la producción bien realizada, etc.

- ❖ **Scrap:** este elemento de salida recibe, como su propio nombre indica, los desperdicios, es decir, las parts cuya fabricación ha resultado ser defectuosa y no sirve, o los parts que son desechos de la producción de otros.

- ❖ **Assemble:** este elemento de salida recoge los parts que se han ensamblado dentro otro distinto y, por tanto, han desaparecido del sistema.

Capítulo 4: Modelado LKT

4.1 Componentes de la simulación

A continuación, se procede a la exposición y explicación de los elementos de la simulación en Witness.

4.1.1 Parts

Esta simulación cuenta con 6 parts o piezas: la pieza cliente, que es la única activa; las 3 originales: Verde, Amarillo y Rojo y dos piezas más que solo utiliza la máquina Expedición, que son: NoServido y ServidoMalaCalidad (Llevan dicha nomenclatura debido a que Witness no permite dejar espacios entre los nombres).



Imagen 4.1 Piezas del modelo

La pieza cliente es la única que hace por sí misma la entrada al sistema, sin que ninguna máquina la llame. Hace su primera llegada a los 26 segundos, y hace una nueva cada 26 segundos.

4.1.2 Buffers

El primer escenario tiene 29 Buffers o almacenes, que posteriormente se irán ampliando en los distintos escenarios. Los almacenes que se ven son en la separación en tres de los que preceden a cada máquina (uno por color) y reciben el nombre de la máquina a la que preceden, junto con el del color que contienen.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

Esto hacen 21 de los almacenes originales y 7 almacenes de reflujo que se denominan "Re", más el nombre correspondiente a la máquina precedida.

Para las máquinas M1, M2 y M3 no hay almacén de entrada, puesto que adquieren las piezas del infinito, pero sí que tienen almacén de reflujo, denominado Redo1.

Las máquinas M4 y M5 tienen los almacenes Do2 más color y ReDo2.

Las máquinas M6 y M7 tienen los almacenes Do3 más color y ReDo3.

Los buffers "Almacén" preceden a la máquina expedición y carecen de uno de Reflujo.

El buffer "Clientes" representa el punto en el que la part cliente entra al sistema, y se queda a la espera de que la máquina expedición la atienda.



Imagen 4.2 Almacenes del modelo

4.1.3 Attributes

La simulación cuenta con 2 atributos o atributos, que se utilizan en las piezas verde amarillo y rojo



Imagen 4.3 Atributos del modelo

Estado: puede tomar 4 valores, siendo:

- 0 La pieza circula por primera vez por el circuito y está en buen estado.
- 1 La pieza circula por primera vez por el circuito, pero tiene algún desperfecto.
- 2 La pieza está siendo recirculada y se encuentra en buen estado.
- 3 La pieza está siendo recirculada y se ha vuelto a cometer algún fallo en su producción.

Avería: el atributo avería tiene 3 opciones y cada una de estas opciones puede tomar 2 valores. Las 3 opciones son: Avería (1) que se ha producido un fallo de fabricación en la etapa 1, Avería (2) que se ha producido un fallo en la fabricación en la etapa 2 y Avería (3) que se ha producido un fallo de fabricación en la etapa 3; y los valores que puede tomar son 0, que es que no se cumple esta opción y 1, valor que toma cuando sí se cumple la opción.

4.1.4 Variables

La simulación inicial cuenta con 25 variables, que son utilizadas para importar los datos del Excel a Witness, o como contadores dentro de algunas máquinas para realizar sus tareas. Estas variables pueden ser únicas o pueden ser vectores de hasta 11 valores. Estos vectores de 11 valores hacen referencia a las 11 máquinas que importan datos del Excel para su funcionamiento. En 4.1.5 se indica qué número del vector corresponde a qué máquina.



Imagen 4.4 Variables del modelo

4.1.5 Machines

La simulación cuenta con 13 machines o máquinas que están distribuidas en 3 etapas de producción, una de comprobación, una referida a la expedición y la máquina virtual.



Imagen 4.5 Máquinas del modelo

La primera etapa de producción está formada por las máquinas M1, M2, M3 y Reflow, que, dependiendo del escenario, estarán las tres primeras en paralelo o en serie, y siempre la máquina Reflow termina la etapa.

La segunda etapa de producción está formada por las máquinas M4, M5 y OLA que, dependiendo del escenario, estarán las dos primeras en paralelo o en serie, y siempre la máquina OLA termina la etapa.

La tercera etapa de producción está formada por las máquinas M6, M7 y Test que, dependiendo del escenario, estarán las dos primeras en paralelo o en serie y siempre la máquina Test termina la etapa. A pesar de su nombre, la máquina Test es una máquina de producción más y, además de las piezas que vienen de su etapa, puede recibir las piezas de Reflow y OLA en determinadas circunstancias.

La etapa de comprobación está formada solo por la máquina QA, que es la encargada de comprobar si las piezas están en buen estado o no, y las envía a los buffers Almacén o a los Redo1 Redo2 o Redo3, dependiendo dónde esté el primer fallo detectado.

Las 10 máquinas de producción y la máquina de calidad tienen asignado un número del vector de las distintas variables, que se corresponden de la siguiente manera siguiendo el orden asignado de las máquinas en el Excel:

M1 es la máquina 1, M2 es la máquina 2, M3 es la máquina 3, Reflow es la máquina 4, M4 es la máquina 5, M5 es la máquina 6, OLA es la máquina 7, M6 es la máquina 8, M7 es la máquina 9, Test es la máquina 10 y QA es la máquina 11.

La máquina Expedición es una máquina de tipo Assembly que hace la salida de las piezas del sistema, y cuyo funcionamiento se explica en el punto 4.2.3.

La máquina virtual se encarga del llenado inicial de los almacenes, como se verá más adelante en el punto 4.2.4.

4.2 Parámetros iniciales y generales del funcionamiento

La simulación de Witness cuenta con unos datos fijos y otros que importa desde el documento Excel Input_Data_Sheets. Los que importa del documento Excel cada escenario (un documento Witness distinto) lo importa de la hoja del Excel con el mismo nombre.

4.2.1 Inicialización de la simulación

Lo primero que hace la simulación al iniciarse es, mediante un bucle For, importar toda la información en sus variables para las once columnas que tiene la hoja del Excel que corresponde por su nombre.

En la imagen 4.6 se observa el ejemplo de la simulación LKT. Los datos de trabajo de los que parte el Excel son de segundos, pero el tiempo de simulación que ha sido requerido y con el que se ha trabajado ha sido de minutos, por ese motivo en las variables temporales que se han importado se puede ver al final de la línea un «/60», que permite hacer el cambio requerido de segundos a minutos. (En el trabajo se habla en segundos puesto que, para hacer la explicación en minutos, se tendría que trabajar con cantidades menores que la unidad para la mayoría de los datos).

```
FOR Row = 1 TO 11
TiempoPlacaMin(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","B2:B12",Row,1) / 60
TiempoPlacaMax(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","C2:C12",Row,1) / 60
TiempoReprocesoMin(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","D2:D12",Row,1) / 60
TiempoReprocesoMax(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","E2:E12",Row,1) / 60
TiempoSetup(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","F2:F12",Row,1) / 60
TiempoReparaciónMin(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","G2:G12",Row,1) / 60
TiempoReparaciónMax(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","H2:H12",Row,1) / 60
TiempoTransporte(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","I2:I12",Row,1) / 60
PorcentajeCalidad(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","J2:J12",Row,1)
NumeroAverias(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","K2:K12",Row,1)
WIPInicialVerdes(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","L2:L12",Row,1)
WIPInicialAmarillos(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","M2:M12",Row,1)
WIPInicialRojos(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","LKT","N2:N12",Row,1)
NEXT
```

Imagen 4.6 Código de Iniciación

En el siguiente paso, se rellenan tres variables elaborando los datos acumulados de la importación del WIP inicial para que la máquina virtual pueda utilizarlas y así generar las piezas iniciales que hay en todos los almacenes de la simulación. Lo hace, como se observa en la imagen 4.7, igualando la primera posición con la primera posición del correspondiente, y el resto con un bucle FOR que suma en cada posición del vector la posición anterior y la posición equivalente del vector WIP inicial del mismo color.

```
Amarillos(1) = WIPInicialAmarillos(1)
Rojos(1) = WIPInicialRojos(1)
Verdes(1) = WIPInicialVerdes(1)
FOR Row = 2 TO 11
  Amarillos(Row) = Amarillos(Row - 1) + WIPInicialAmarillos(Row)
  Rojos(Row) = Rojos(Row - 1) + WIPInicialRojos(Row)
  Verdes(Row) = Verdes(Row - 1) + WIPInicialVerdes(Row)
```

Imagen 4.7 Asignación de valores

El último paso de las “Initialize Actions” o de la inicialización, rellena los datos para las averías de las máquinas. Estos datos se corresponden con el tiempo que tarda una máquina en ser reparada que, con los datos suministrados por Focus Lean, se ha optado por hacer siguiendo una distribución uniforme, al disponer únicamente, en los datos suministrados, de tiempo mínimo y máximo de reparación. Además, ambos valores son los mismos para cada máquina, pero al añadir la uniforme se permite que se pueda poner el tiempo variable si el usuario que realiza la simulación quiere darle más variedad. El otro dato corresponde al tiempo entre averías. En los datos recibidos está el número de averías que se producen en 8 minutos, por lo que, para extraer el tiempo, se ha procedido a dividir ese tiempo entre el número de averías que hay en el Excel, excepto si ese número de averías fuese 0, en cuyo caso daría error. Para evitar este error se ha creado un condicional para que cuando se dé este caso se introduzca un valor muy alto para el tiempo entre averías.

Hay que tener en cuenta, de todas formas, que el tiempo de reparación en el Excel debería ser de 0, puesto que, al no haber averías, no debería tener otro valor. En la imagen 4.8 se muestra su realización.

```
FOR Row = 1 TO 11
  Tiempodereparacion(Row) = Uniform (TiempoReparaciónMin(Row),TiempoReparaciónMax(Row))
  IF NumeroAverias(Row) > 0
    Tiempoentreaverias(Row) = 8 / NumeroAverias(Row)
  ELSE
    Tiempoentreaverias(Row) = 1000000000
  ENDIF
NEXT
```

Imagen 4.8 Tiempos en averías

4.2.2 Criterio de selección de piezas

Lo primero que escogerá una máquina, siempre será si está disponible la pieza del almacén de reflujo correspondiente. Estos almacenes llevan la denominación “Re” junto con el nombre de la máquina a la que precede. Si este almacén se encuentra vacío se coge la pieza verde, con una probabilidad del 70%; la amarilla, con el 20%; y la roja, con el 10%. Si por algún motivo no se puede adquirir uno de los tipos de piezas mencionados, se alteran los tantos por ciento para que la probabilidad relativa sea la misma, tal y como se muestra en la imagen 4.9, que corresponde a la máquina M4 en el escenario LKT.

En color verde se incluye la indicación que determina qué piezas se pueden o no coger.

```

IF NParts (Redo2) > 0
PULL from Redo2
ELSE
IF NParts (Do2Verde) > 0
IF NParts (Do2Amarillo) > 0
IF NParts (Do2Rojo) > 0
!todos
PERCENT Do2Verde 70.00 ,Do2Amarillo 20.00 ,Do2Rojo 10.00
ELSE
!no rojo
PERCENT Do2Verde 77.78 ,Do2Amarillo 22.22
ENDIF
ELSE
!no amarillo
IF NParts (Do2Rojo) > 0
PERCENT Do2Verde 87.50 ,Do2Rojo 12.50
ELSE
!solo verde
PULL from Do2Verde
ENDIF
ENDIF
ELSE
IF NParts (Do2Amarillo) > 0
IF NParts (Do2Rojo) > 0
!No verde
PERCENT Do2Amarillo 66.67 ,Do2Rojo 33.33
ELSE
!solo Amarillo
PULL from Do2Amarillo
ENDIF
ELSE
!solo Rojo
IF NParts (Do2Rojo) > 0
PULL from Do2Rojo
ENDIF
!Ninguno
ENDIF
ENDIF
!
ENDIF

```

Imagen 4.9 Selección de piezas

4.2.3 Funcionamiento de la máquina Expedición

Respecto a la máquina Expedición, dado que era una de las tabletas incluidas en la clase, y, a pesar de que no se contaba con información recabada de los documentos Excel, se tomó la decisión de incluirla en la simulación, debido a la aportación que supone de datos de capacidad y calidad de la entrega en la simulación.

Esta máquina funciona exactamente igual en todas las simulaciones, haciendo que, para poder comparar escenarios, todos se midan bajo la misma métrica.

No tiene averías, ni tiempo de cambio de herramienta, puesto que el cliente solo viene cada 26 segundos y pide una pieza al azar.

Esta máquina es de tipo assemble, lo que significa que une varias piezas en una sola. En este caso lo que hace es introducir la pieza cliente dentro de la pieza pasiva correspondiente.

El funcionamiento de su elección de piezas es el mismo que se ha explicado en el Criterio de selección de piezas, salvo que cuando una pieza no está disponible no se produce un cambio en los tantos por ciento, si no que se sustituye esa pieza por la pieza No Servido, diciendo así que nuestro sistema ha fallado al entregar la pieza que el cliente quería. Su funcionamiento aparece reflejado en la Imagen 4.10.

```
IF NParts (AlmacenVerde) > 0
  IF NParts (AlmacenAmarillo) > 0
    IF NParts (AlmacenRojo) > 0
      !todos
      PERCENT AlmacenVerde 70.00 ,AlmacenAmarillo 20.00 ,AlmacenRojo 10.00
      ELSE
      !no rojo
      PERCENT AlmacenVerde 70.00 ,AlmacenAmarillo 20.00 ,NoServido out of 'WORLD 10.00
      ENDIF
      ELSE
      !no amarillo
      IF NParts (AlmacenRojo) > 0
        PERCENT AlmacenVerde 70.00 ,NoServido out of 'WORLD 20.00 ,AlmacenRojo 10.00
        ELSE
        !solo verde
        PERCENT AlmacenVerde 70.00 ,NoServido out of 'WORLD 30.00
        ENDIF
        ENDIF
        ELSE
        IF NParts (AlmacenAmarillo) > 0
          IF NParts (AlmacenRojo) > 0
            !No verde
            PERCENT NoServido out of 'WORLD 70.00 ,AlmacenAmarillo 20.00 ,AlmacenRojo 10.00
            !
            ELSE
            !solo Amarillo
            PERCENT NoServido out of 'WORLD 80.00 ,AlmacenAmarillo 20.00
            ENDIF
            ELSE
            !solo Rojo
            IF NParts (AlmacenRojo) > 0
              PERCENT NoServido out of 'WORLD 90.00 ,AlmacenRojo 10.00
            !Ninguno
            ELSE
            PULL from NoServido out of 'WORLD
            ENDIF
            ENDIF
            ENDIF
            ENDIF
```

Imagen 4.10 Máquina expedición

A esto hay que añadir, que la máquina obtiene la pieza cliente desde el buffer de Clientes una cada dos veces que coge una Part. Para ello, utiliza la variable ExpediciónCliente alterando su valor: cuando coge una pieza altera el valor de 1 a 0, o de 0 a 1, en función del estado del valor de la variable. Si es 0, obtiene una pieza pasiva y, si es 1, la pieza Cliente.

Tras escoger la pieza pasiva, evalúa su estado. Si su estado es distinto de 0 (buena calidad), transforma la pieza que ha cogido en ServidoMalaCalidad, dando a entender así que a nuestro sistema de medición de calidad (QA) se le ha escapado una pieza defectuosa.

Hay que tener en cuenta que las piezas NoServido solo pueden tener estado 0, al no haber pasado por ninguna otra máquina que haya podido cambiar su estado.

```
IF Estado > 0
CHANGE TYPE to ServidoMalaCalidad
ENDIF
```

Imagen 4.11 Piezas servidas de mala calidad

Tras realizar o no la transformación de la pieza, deja pasar su tiempo de ciclo fijo de 26 segundos, y la saca del proceso, terminando así el tiempo que la pieza pasa en el sistema.

4.2.4 Funcionamiento de la máquina virtual

La máquina virtual funciona solamente en el instante cero de la simulación, y se dedica al llenado inicial de los almacenes de primera circulación. Como se puede ver en la imagen 4.12, utilizando los valores de las variables Verdes (11), Amarillos (11) y Rojos (11) recopila con ayuda de la variable contN (utilizada como un contador) todas las piezas necesarias para el llenado de los almacenes.

```
IF TIME = 0
IF ContN < Verdes(11)
PULL from Verde out of WORLD
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
PULL from Amarillo out of WORLD
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
PULL from Rojo out of WORLD
ENDIF
ELSE
Wait
ENDIF
```

Imagen 4.12 Llenado de la máquina virtual

Después, con su funcionamiento interno, se obtiene la probabilidad que se da de que estas piezas sean buenas o malas, y se añade en qué punto se ha introducido el error. Es decir, sabe dónde va a mandar cada pieza y asigna al atributo

Avería(x) de cada pieza una probabilidad de que haya ocurrido, solo si la pieza ha pasado por la máquina que genera esa avería, y siguiendo la probabilidad mencionada, así como la probabilidad de que la máquina cliente haya detectado dicha avería para el almacén final.

En la imagen 4.13 puede verse una parte del código, en concreto, la que se refiere al llenado de los almacenes de la primera etapa. Como las máquinas M1, M2 y M3 funcionan en paralelo y son iguales, se ha utilizado únicamente la calidad de M1. El PorcentajeCalidad (4) es el que corresponde a Reflow, después pasa por las máquinas M4 o M5, también en paralelo, por eso solo se utiliza el PorcentajeCalidad (5) y se salta al PorcentajeCalidad (7), que es el de la máquina OLA. Posteriormente, las máquinas M6 y M7, que también están en paralelo, y se ha usado el PorcentajeCalidad (8) que corresponde a M6. Después se pasa al Test, que tiene el PorcentajeCalidad (10) y, finalmente, el PorcentajeCalidad (11), que corresponde a la máquina QA, y que se encarga de detectar los errores; es por eso por lo que convierte a 0 el estado y todas las averías, siempre que el valor dado sea menor que su probabilidad de hacerlo bien.

```
!Pasa por M1, por M2 o por M3
IF Uniform(0,100) > PorcentajeCalidad(1)
  Averia(1) = 1
  Estado = 1
ENDIF
!Pasa por Reflow
IF ContN > Verdes(3) AND ContN < Verdes(11)
  IF Uniform(0,100) > PorcentajeCalidad(4)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(3) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  IF Uniform(0,100) > PorcentajeCalidad(4)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(3) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
  IF Uniform(0,100) > PorcentajeCalidad(4)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
```

Imagen 4.13 Calidad de las piezas iniciales

Finalmente, hace el llenado de los almacenes siguiendo el orden de aparición de los almacenes por colores. Es decir, primero sigue la línea de verdes, luego

amarillo y termina por rojos. En la imagen 4.14 puede observarse la parte del código en el que se hace el llenado de los amarillos, viendo que ya se han hecho todos los verdes y ningún rojo.

```

ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(3)
  PUSH to ReflowAmarillo
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(4)
  PUSH to Do2Amarillo
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(6)
  PUSH to QLAmarillo
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(7)
  PUSH to Do3Amarillo
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(9)
  PUSH to TESTAmarillo
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(10)
  PUSH to QAamarillo
ELSEIF ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  PUSH to AlmacenAmarillo
    
```

Imagen 4.14 Llenado inicial de los almacenes

4.3 Creación del modelo inicial

El primer escenario corresponde con el modelo original de la herramienta LKT, por lo que se ha denominado «LKT». Sus datos se obtienen del documento Excel Input_Data_Sheets, concretamente de la hoja LKT, como se observa en las Tablas 4.1 y 4.2, y cuya representación se ha reflejado en la imagen 4.15.

Estacion	TiempoPlacaM n	TiempoPlacaMa x	TiempoReprocesoMi n	TiempoReprocesoMax	TiempoSetup	TiempoReparacionMin
AssemblyOne	30	35	5	10	5	3
AssemblyTwo	30	35	5	10	5	3
AssemblyThree	30	35	5	10	5	3
Reflow	5	5	5	5	5	10
AssemblyFour	13	18	5	10	5	3
AssemblyFive	13	18	5	10	5	3
HeatWave	10	10	10	10	15	10
AssemblySix	8	12	5	10	5	3
AssemblySeven	8	12	5	10	5	3
Test	100	100	100	100	0	0
QA	3	5	2	2	0	0

Tabla 4.1 Parámetros LKT parte 1

TiempoReparacionMa x	TiempoTransporte	PorcentajeCalidad	NumeroAverias	WIPInicialVerdes	WIPInicialAmarillos	WIPInicialRojos
3	1	70	5	2	2	1
3	1	70	5	2	2	1
3	1	70	5	2	2	1
10	8	70	5	2	2	1
3	1	70	5	2	2	1
3	1	70	5	2	2	1
10	8	70	5	2	0	0
3	1	70	5	1	1	1
3	1	70	5	1	1	1
0	1	70	0	1	1	2
0	1	70	0	0	0	0

Tabla 4.2 Parámetros LKT parte 2

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

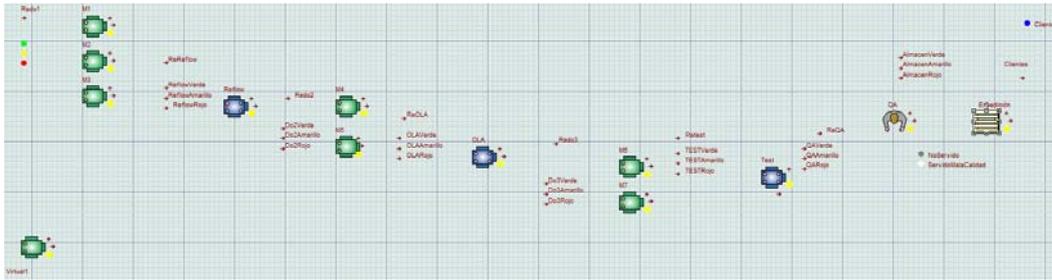


Imagen 4.15 Modelo LKT

Es preciso puntualizar que los datos de las Tablas 4.1 y 4.2 son los datos originales que se entregaron desde Focus Lean para la realización de la simulación.

4.3.1 Primera etapa

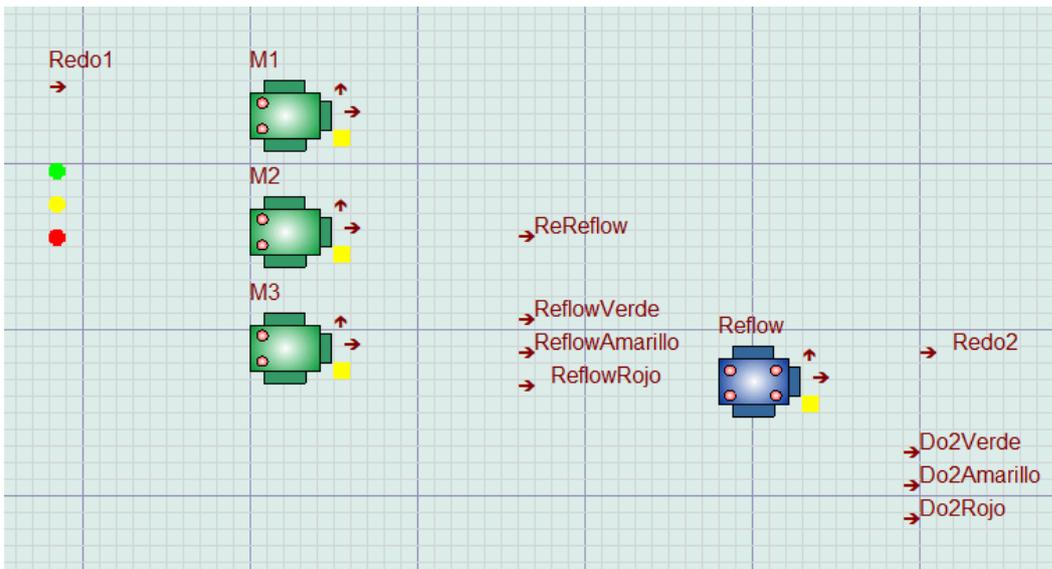


Imagen 4.16 Ampliación de parte de la imagen 4.15

En este escenario se puede apreciar que hay tres máquinas iguales funcionando en paralelo (M1, M2 M3), que empiezan la elaboración de los productos tomando las piezas de forma aleatoria, desde fuera del modelo, siguiendo el patrón ya visto. Estas máquinas tienen un tiempo de ciclo que sigue una Uniform (30, 35), para las piezas que empieza a trabajar desde el principio; y otra Uniform (5, 10) para las piezas de reflujo. Las tres máquinas vierten su producción a los almacenes que se corresponden con sus colores, llamados "Reflow" más el color correspondiente, o al ReReflow, si es una pieza de reflujo. Cuando la pieza que

entra en la máquina no es igual que la anterior, la máquina tiene que hacer un cambio de herramienta, que le supone un tiempo de 5 segundos.

Cuando una pieza llega al almacén Redo1, la primera de las tres máquinas que quede disponible cogerá obligatoriamente dicha pieza sin importar el color que tenga o el color trabajado anteriormente en esa máquina, sufriendo el cambio de herramienta si fuera necesario.

Las máquinas del modelo se averían. En la imagen 4.16 se ve que lo hacen 5 veces cada una en los 8 minutos que dura la simulación. Para pasar este dato a Witness se han dividido los 8 minutos entre el número de averías, lo que da una avería cada 96 segundos de funcionamiento (como el número lo importa desde el Excel, este tiempo entre averías cambia si se modifica el Excel). Además, tienen un tiempo de reparación que sigue una Uniform (3, 3) segundos. Ya que, aunque esto da un tiempo fijo de 3 segundos, si se modifica el Excel podrá dar tiempos variables. Este mismo criterio se ha utilizado a lo largo de toda la recreación del modelo.

Al verter las tres máquinas su producción a los mismos almacenes, las piezas de WIP (Work In Progres) inicial de las tres máquinas se suman y se añaden a los almacenes correspondientes.

En su funcionamiento interno, estas máquinas ponen el atributo Avería (1) a 0, de esta forma si la pieza es de reflujo “corrige” el defecto que tiene. Después, con una Uniform (0, 100) comparada con la probabilidad de que la máquina trabaje correctamente (70% para este escenario), si la uniforme fuese menor no habría cambio alguno, pero si fuese mayor cambiaría el estado de 0 a 1 (pieza nueva buena a pieza nueva mala) o de 2 a 3 (pieza de reflujo buena a pieza de reflujo mala), y pondría el atributo Avería (1) a 1 (fallo en la primera etapa).

La máquina Reflow recoge las piezas, siempre que sea posible, del almacén ReReflow; y si este almacén está vacío coge, con la probabilidad descrita en el 4.2.2, las piezas de los almacenes “Reflow” más el color. Si no tiene piezas disponibles, espera a la primera que llegue a cualquier almacén. Esta máquina

vierte sus piezas a los almacenes “Do2”, que son los almacenes iniciales de la segunda etapa. Pero si la pieza es de reflujó tiene en cuenta varias posibilidades: la mandará a Redo2, solo si la pieza tiene el atributo Avería (2) con valor 1. Si no es así, pasa a la siguiente posibilidad: que tenga el atributo Avería (3) con valor 1, en este caso, lo mandaría a Redo3. Si ninguno de los dos tiene valor 1 lo envía directamente a ReTest.

El tiempo de ciclo de esta máquina varía siguiendo una Uniform (5, 5), para las piezas nuevas, y otra Uniform (5, 5), para las piezas de reflujó. (Es importante tener en cuenta que, en este caso, los valores son iguales y podría haberse puesto un tiempo de flujo único y constante, pero como importa los datos del Excel se ha considerado mejor opción dejarlo igual que el resto de máquinas). Esta máquina sufre averías de la misma manera y en la misma cantidad que las anteriores, pero su tiempo de reparación sigue una Uniform (10, 10). Su tiempo de cambio de herramienta es también de 5 segundos.

En su funcionamiento interno esta máquina trabaja con una Uniform (0, 100) comparada con la probabilidad de que la máquina trabaje correctamente (70% para este escenario). Si es menor la uniforme no realiza cambio alguno, pero si es mayor, cambia el estado de 0 a 1 (pieza nueva buena a pieza nueva mala) o de 2 a 3 (pieza de reflujó buena a pieza de reflujó mala), y pone el atributo Avería (1) a 1 (fallo en la primera etapa).

4.3.2 Segunda etapa

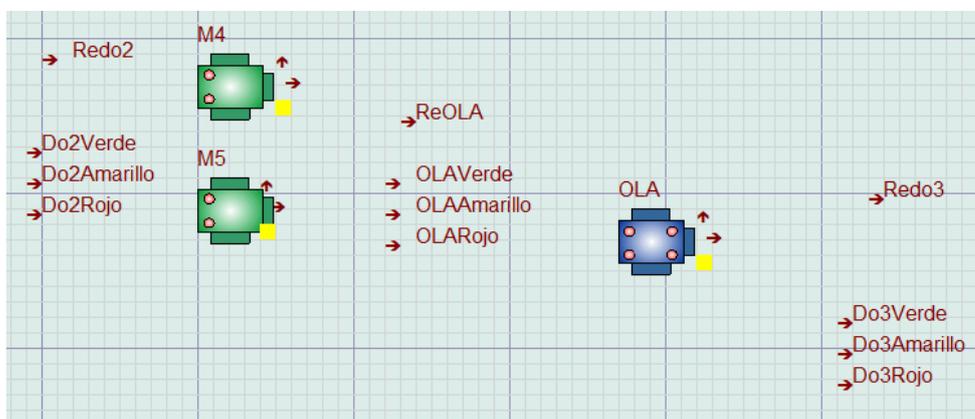


Imagen 4.17 Ampliación de parte de la imagen 4.15

Este primer escenario tiene las máquinas M4 y M5 en paralelo y con los mismos parámetros. Ambas recogen sus piezas de los almacenes "Do2", cogiendo, siempre que sea posible, primero del Redo2, que es el almacén de reflujos. Para este primer escenario el tiempo de ciclo para piezas nuevas es una Uniform (13, 18), y para las piezas de reflujos una Uniform (5, 10). Estas dos máquinas vierten su producción a los almacenes "OLA", ya sea el de reflujos (ReOLA) o los almacenes de color.

Estas máquinas también sufren las averías de la misma manera (5 averías en 8 minutos) y con el tiempo de reparación una Uniform (3, 3).

Como en la primera etapa, al tener el mismo almacén siguiente a las dos máquinas, su WIP Inicial se suma y se vierte a los almacenes "OLA" más el color adecuado.

En su funcionamiento interno estas máquinas ponen el atributo Avería (2) a 0, así si la pieza es de reflujos "corrige" el defecto que tiene. Después, con una Uniform (0, 100) comparada con la probabilidad de que la máquina trabaje correctamente (70% para este escenario), si es menor no habría cambio alguno, pero si es mayor, cambia el estado de 0 a 1 (pieza nueva buena a pieza nueva mala) o de 2 a 3 (pieza de reflujos buena a pieza de reflujos mala), y pone el atributo Avería (2) a 1 (fallo en la segunda etapa).

Cuando el almacén ReOLA tenga piezas, la máquina OLA cogerá las piezas solamente de ahí. Si este almacén está vacío, cogerá las piezas con las probabilidades ya explicadas de los almacenes de colores OLA. Esta máquina vierte su producción de piezas nuevas a los almacenes "Do3" color, y las piezas recicladas las puede depositar en el almacén ReDo3. Si tienen el atributo Avería (3) en 1, o en ReTest si no lo tienen.

OLA tiene, como las máquinas anteriores, un tiempo de ciclo dependiente de si trabaja con piezas nuevas, que sigue una Uniform (10, 10); y otro para piezas de reflujos, que sigue otra Uniform (10, 10), coincidente en valores por el caso en el que trabajamos. Su tiempo de cambio de herramienta es el mayor del proceso: 15

segundos. Sufre el mismo número de averías, por lo que su tiempo entre averías es también de 96 segundos y el de reparación sigue una Uniform (10, 10).

En su funcionamiento interno, OLA trabaja con una Uniform (0, 100) comparada con la probabilidad de que la máquina trabaje correctamente (70% para este escenario) si la uniforme es menor no habría cambio alguno, pero si es mayor cambia el estado de 0 a 1 (pieza nueva buena a pieza nueva mala) o de 2 a 3 (pieza de reflujo buena a pieza de reflujo mala), y pone el atributo Avería (2) a 1 (fallo en la segunda etapa).

4.3.3 Tercera etapa

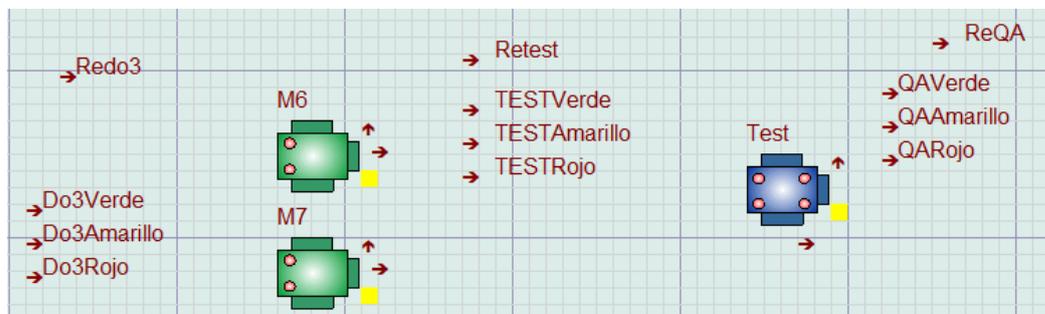


Imagen 4.18 Ampliación de parte de la imagen 4.15

El escenario LKT tiene las máquinas M6 y M7 en paralelo y con idénticos parámetros. Recogen sus piezas de trabajo, siempre que este tenga piezas disponibles, del almacén ReDo3. Si no es posible cogerán las piezas siguiendo la probabilidad del problema de los almacenes “Do3” y el color adecuado. Su tiempo de ciclo sigue dos uniformes: para las piezas nuevas usa una Uniform (8, 12); y para piezas de reflujo otra Uniform (5, 10). Los almacenes destino de estas máquinas son ReTest, para las piezas de reflujo y “Test” más el color de la pieza, para las de primera circulación.

Como M6 y M7 están en paralelo, su WIP inicial se suma antes de verterlo a los almacenes respectivos.

Estas máquinas también sufren 5 averías en la simulación de 8 minutos, por lo que su tiempo ente averías es el mismo (96 segundos) y su tiempo de reparación sigue la Uniform (3, 3).

En su funcionamiento interno estas máquinas ponen el atributo Avería (3) a 0, así si la pieza es de reflujo “corrige” el defecto que tenga. Después, con una Uniform (0, 100) comparada con la probabilidad de que la máquina trabaje correctamente (70% para este escenario) si es menor la uniforme no habría cambio alguno, pero si es mayor cambia el estado de 0 a 1 (pieza nueva buena a pieza nueva mala) o de 2 a 3 (pieza de reflujo buena a pieza de reflujo mala), y pone el atributo Avería (3) a 1 (fallo en la tercera etapa).

La máquina Test es la última máquina de esta etapa y de los procesos productivos. Como ya se ha explicado, su almacén ReTest recoge todas las piezas que sufren reproceso, puesto que recoge de las máquinas Reflow, OLA, M6 y M7.

Esta máquina es la más distinta al resto, puesto que es la única que procesa las piezas de 4 en 4 en vez de individualmente. Además, tiene la restricción de que las piezas de trabajo o son las 4 de reflujo, o ninguna. Esto supone que no tiene que coger las piezas del almacén ReTest en cuanto haya alguna, sino que espera a que al terminar un ciclo de trabajo suyo tenga 4 piezas disponibles, como mínimo, en este almacén antes de recoger de él. Si no tiene esa cantidad trabajará con las piezas de primer flujo.

Esta máquina no sufre averías ni cambios de herramienta, pero se ha preparado en la programación la posibilidad de incluir esta posibilidad en futuras simulaciones, teniendo, únicamente, que introducir los datos en el Excel.

Tiene, como el resto de máquinas, dos tiempos de ciclo: uno para las piezas nuevas que sigue una Uniform (100, 100); y otro para las piezas de reflujo, que sigue la Uniform (100, 100). Es otro supuesto más en que las piezas de reflujo y las de nueva producción coinciden en tiempos, y que, además, son constantes.

En su funcionamiento interno Test trabaja con una Uniform (0, 100) comparada con la probabilidad de que la máquina trabaje correctamente (70% para este escenario), si es menor la uniforme no habría cambio alguno, pero si es mayor cambia el estado de 0 a 1 (pieza nueva buena a pieza nueva mala) o de 2 a 3

(pieza de reflujo buena a pieza de reflujo mala), y pone el atributo Avería (2) a 1 (fallo en la segunda etapa).

4.3.4 Calidad

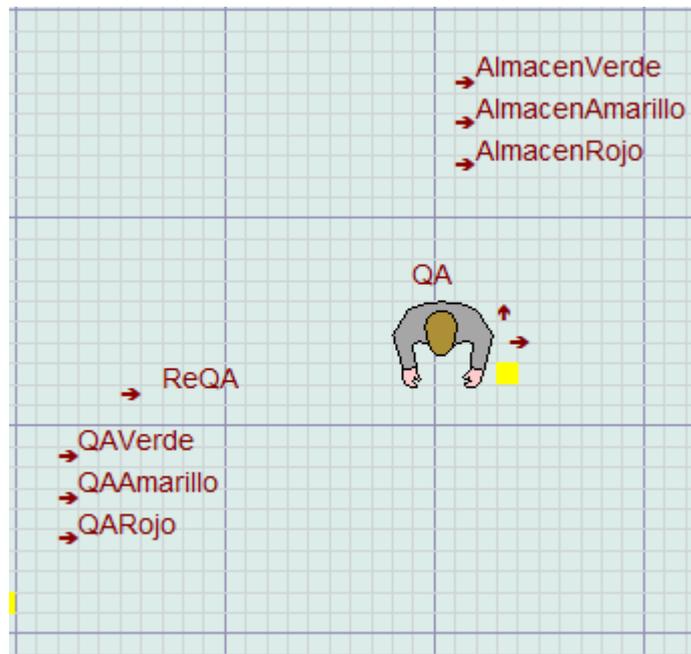


Imagen 4.19 Ampliación de parte de la imagen 4.15

La máquina QA se dedica a comprobar la calidad de las piezas que le llegan, y de mandarlas: a los “Almacén” más color, si son buenas; o al almacén de reflujo correspondiente, si detecta que son defectuosas.

Esta máquina representa a una persona que hace un control visual de las piezas, por lo que ni sufre averías, ni cambios de herramienta.

La máquina QA coge las piezas del almacén ReQA, siempre que este disponga de piezas, y si no las hay coge las piezas de los almacenes “QA” color, con la probabilidad ya descrita en el 4.2.2. Tiene un tiempo de ciclo diferente para las piezas de reflujo (Uniform (2, 2)), que para las piezas de primera circulación que siguen una Uniform (3, 5).

En su funcionamiento interno tiene dos etapas: en la primera, convierte todas las piezas buenas (estados 0 y 2) en piezas buenas de primera circulación (estado 0);

y todas las piezas malas (estados 1 y 3) en piezas malas de primera circulación (estado 1). En la segunda etapa, convierte las piezas del estado 1 al estado 2, puesto que son las candidatas a ser recirculadas.

En la salida de la máquina, si la pieza tiene el estado 2 usa una Uniform (0, 100) que compara con la probabilidad de que la máquina trabaje correctamente. Si la probabilidad es mayor (es decir, se le escapa la pieza mala) vierte la pieza al "Almacén" color correspondiente; pero si es menor, detecta que la pieza es mala y la envía a reflujó. Primero comprueba si el atributo *Avería* (1) está en 1: si es así la envía a ReDo1. Si no es así, comprueba si *Avería* (2) está en 1, y, de ser así, envía la pieza a ReDo2. En caso contrario, comprueba que *Avería* (3) está en 1 y lo envía a ReDo3. Si el estado es 0, es que la pieza está en buen estado, y siempre la envía al "Almacén" color correspondiente.

Capítulo 5: Modelado NPLUS1 y Validación

5.1 Introducción

En este capítulo se introduce la nueva versión NPLUS1 que toma como datos de partida para su funcionamiento los datos actualizados obtenidos de clases anteriores para el funcionamiento del sistema.

Se ha considerado para la realización de esta versión que las máquinas en paralelo de cada etapa no tienen por qué ser iguales como pasaba en LKT por lo que se han analizado los resultados de cada máquina de manera independiente.

Tras el modelado se hace una validación del modelo comparándolo con el anterior.

5.2 Recopilación de los datos

Para crear los datos, se ha recogido la información de las simulaciones de: TestValladolid (tres sesiones), Mercedes 11S (dos sesiones) y Mercedes 18S y 18SV2 (dos sesiones).

Se han importado los datos de estas siete simulaciones a una misma hoja Excel, observando que las simulaciones solo recogen los valores medios y totales, por lo que para crear distribuciones se ha obtenido el valor máximo, mínimo y medio de los resultados para utilizar distribuciones triangulares en los distintos escenarios., se ha considerado que la función triangular es la que mejor se adapta al funcionamiento del modelo puesto que permite trabajar sobre unos valores

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

que no estén centrados como ocurre en el caso de la distribución normal truncada.

En la Tabla 5.1 se puede ver, a la izquierda del atributo, las tres columnas que reflejan los valores; mínimo, promedio, y máximo, de los valores obtenidos en las prácticas en la máquina 1, que aparecen a la derecha del nombre de la variable.

Mínimo	Promedio	Máximo	M1							
0	5.142857	13	Cantidad productos buenos	6	5	13	0	0	2	10
3	6.857143	14	Cantidad productos producidos	7	8	14	3	3	3	10
62.5	78.25714	100	% Productos buenos	85.7	62.5	92.9	70	70	66.7	100
28.5	38.32857	57.2	Tiempo medio montaje	57.2	34.7	28.5	35	35	35	42.9
255.6	362.8571	428.6	Tiempo total montaje	400.6	277.9	399.3	382.9	255.6	395.1	428.6
0	43.4	170.1	Tiempo total reproceso	0	133.7	0	0	170.1	0	0
2.6	8.2	17.3	Tiempo medio espera	6.8	5.7	2.6	17.3	4.9	15	5.1
14.8	41.84286	52	Tiempo total de espera	47.7	45.5	35.4	52	14.8	45.1	51.4
0	12.14286	30	Tiempo total cambio	15	10	30	10	10	10	0
0	2.428571	6	Numero de cambios	3	2	6	2	2	2	0
0	19.72857	35.1	Tiempo total averia	16.7	12.8	14.3	35.1	29.5	29.7	0
51.4	73.72857	97.1	Tiempo total no productivo	79.4	68.3	80.7	97.1	54.3	84.9	51.4
1	1.428571	2	Inventario en curso (VIP)	2	1	1	2	1	2	1
12	18.32857	25.4	%Tnoproductivo vs Tproductivo	19.8	16.6	20.2	25.4	12.8	21.5	12
79.8	84.65714	89.3	%Utilizacion estacion	83.5	85.8	83.2	79.8	88.7	82.3	89.3
0	43.75429	100	%Produccion estacion vs producidos final	63.64	38.1	100	0	27.27	27.27	50
5	7.142857	10	Comentario	5	5	10	10	5	5	10
-1	-1	-1	Calificacion	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Tabla 5.1 Correcciones en datos

Las casillas en rojo son valores excesivamente atípicos que se han corregido. Al hacer las correcciones se han utilizado los valores estándar de LKT para la calidad y los valores máximo o mínimo para las duraciones, dependiendo de por dónde fuera excesivamente atípica dicha duración.

En la máquina QA se observó que los resultados obtenidos para el tanto por ciento de calidad no eran correctos, puesto que consideraba que su calidad al igual que la del resto de máquinas era el número de productos buenos que salían dividido entre el número total de productos que pasaban por dicha máquina. Para la corrección de dicha calidad se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$\%calidad = 100 * \left(1 - \frac{PRC}{PTT - PAC - Almacen}\right)$$

Donde: PRC es productos rechazados por el cliente, PTT es el número total de productos que ha trabajado el puesto QA y PAC son los productos que el cliente ha aceptado. Esto es así porque la máquina QA deja pasar todos los productos buenos, y estos no se deben tener en cuenta para calcular su calidad. Además, no se sabe cuál es la calidad del producto que está en el almacén, por lo que hay que restarlo también de los productos trabajados.

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados obtenidos para calidad. Se ha optado por no quitar el valor de 25, a pesar de ser atípico por ser un valor calculado mediante una fórmula utilizando los datos reales de la simulación.

QA								
Cantidad productos buenos	11	21	14	0	11	11	20	
Cantidad productos producidos	25	57	71	19	21	13	20	
% Productos buenos	87.5	94.73684211	100	100	90.90909091	25	100	
Tiempo medio montaje	11.8	5.1	4.2	7.3	12.9	24.5	13.8	
Tiempo total montaje	296.2	293.4	295.4	139.3	271.1	318.1	276.2	
Tiempo total reproceso	0	0	0	0	0	0	0	
Tiempo medio espera	7.4	3.3	2.6	17.9	9.9	12.5	10.2	
Tiempo total de espera	183.8	186.6	184.6	340.7	208.9	161.9	203.8	
Tiempo total cambio	0	0	0	0	0	0	0	
Numero de cambios	0	0	0	0	0	0	0	
Tiempo total averia	0	0	0	0	0	0	0	
Tiempo total no productivo	183.8	186.6	184.6	340.7	208.9	161.9	203.8	
Inventario en curso (WIP)	1	0	0	0	1	1	0	
%Tnoproductivo vs Tproductivo	62.1	63.6	62.5	244.6	77.1	50.9	73.8	
%Utilizacion estacion	61.7	61.1	61.5	29	56.5	66.3	57.6	
%Produccion estacion vs producidos final	227.27	271.43	507.14	0	190.91	118.18	100	
Comentario	5	5	5	5	5	5	10	
Calificacion	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	

Tabla 5.2 Correcciones en calidad QA

El Excel está preparado con celdas vinculadas para que si se añaden nuevas simulaciones las implemente automáticamente a sus fórmulas y cálculos. Solo habría que comprobar los nuevos datos y corregirlos, si se considera necesario, y extenderla fórmula de la calidad de QA a la nueva simulación.

5.3 Nplus1 en paralelo

Se ha utilizado dicha denominación para este escenario porque es el término con el que Focus Lean se refiere a la nueva versión que quieren llevar a cabo y el "apellido" en paralelo puesto que posteriormente se diseñarán nuevos escenarios dentro de esta versión en los que se cambia el sistema productivo.

Es el primer escenario que utiliza los tiempos reales de las sesiones de uso de la aplicación, que se ven en las Tablas 5.3 y 5.4.

Estacion	TiempoPlacaMi n	TiempoPlacaMe d	TiempoPlacaMa x	TiempoReprocesoMi n	TiempoReprocesoMax	TiempoSetup	TiempoReparacionMin
AssemblyOne	28.5	38.32857143	57.2	5	10	5	3
AssemblyTwo	24.5	42.22857143	66.4	5	10	5	3
AssemblyThree	35	41.08571429	54.2	5	10	5	3
Reflow	8.1	10.02857143	12.7	5	5	5	10
AssemblyFour	9.9	21.67142857	37.5	5	10	5	3
AssemblyFive	10.4	28.65714286	47.7	5	10	5	3
HeatWave	11.9	15.42857143	17.5	10	10	15	10
AssemblySix	9.67	22.20428571	35	5	10	5	3
AssemblySeven	9.42	19	35	5	10	5	3
Test	100	110.0571429	120.4	100	100	0	0
QA	4.2	11.37142857	24.5	2	2	0	0

Tabla 5.3 Parámetros NPLUS1 en paralelo parte 1

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

TiempoReparacionMa x	TiempoTransporte	PorcentajeCalidad	NumeroAverias	WIPInicialVerdes	WIPInicialAmarillos	WIPInicialRojos
3	1	78,25714286	5	2	2	1
3	1	70,81428571	5	2	2	1
3	1	82,58571429	5	2	2	1
10	8	81,05714286	5	2	2	1
3	1	80,52857143	5	2	2	1
3	1	87,8	5	2	2	1
10	8	78,18571429	5	2	0	0
3	1	87,28571429	5	1	1	1
3	1	76,27142857	5	1	1	1
0	1	60,47142857	0	1	1	2
0	1	85,449419	0	0	0	0

Tabla 5.4 Parámetros NPLUS1 en paralelo parte 2

Se aprecia que se ha introducido una nueva columna respecto a los datos de entrada de LKT que es Tiempo de placa medio que hace referencia al promedio de los valores obtenidos.

También se ve que los valores de tiempo de reproceso no se han modificado puesto que la obtención de resultados no aporta valores a estos datos, al igual que el número de averías y los tiempos de reparación, transporte y Setup.

Puesto que este escenario se ha creado para la validación de LKT sigue la misma estructura que el escenario LKT, por lo que la Imagen 4.15 es válida también para mostrar la distribución de Nplus1.

5.4 Cambios respecto a LKT

A continuación, se van a explicar los cambios que sufre el escenario respecto al escenario inicial por la entrada de estos nuevos valores y se va a estructurar por etapas del modelo.

5.4.1 Primera etapa

Este escenario sigue contando con tres máquinas en paralelo para la primera etapa, solo que ahora son máquinas distintas, y cada una responde a las variables obtenidas de las clases.

El tiempo de ciclo de reflujos de las máquinas se mantiene igual por falta de datos. Pero el tiempo de ciclo de piezas nuevas pasa de ser la misma distribución uniforme, a ser una distribución triangular distinta para cada una. La

distribución triangular necesita tres parámetros: el mínimo (igual que la uniforme), la media y el máximo (igual que la uniforme). Se ha elegido esta distribución para representar los datos, por su cierta similitud con la uniforme, que es la utilizada en la primera simulación. Para M1 sigue la Triangle (28.50, 38.32, 57.20), para M2 la Triangle (24.50, 42.22, 66.40), y para M3 la Triangle (35, 41.08, 52.20). Se puede ver en la máquina M3 que la duración mínima se corresponde con la máxima de la que seguía en la simulación LKT. Esto es así debido a que los datos de las simulaciones en esta máquina son todos mayores de lo esperado, y los que eran más exagerados fuera del tiempo de ciclo "normal", se han corregido por dicho máximo.

La calidad también se modifica en función de los datos de las clases, otorgando los valores de 78.25% para M1, 70.81% para M2 y 82.58% para M3. Todos mayores que el 70% previsto en LKT.

El resto del funcionamiento de M1, M2 y M3 es exactamente igual que el descrito en LKT.

Para la máquina Reflow también se modifica el tiempo de ciclo de piezas nuevas, que pasa a ser la Triangle (8.10, 10.02, 12.70) y su calidad, que es 81.05%. El resto del funcionamiento es igual que el descrito en LKT.

Se ha considerado que la máquina Reflow no hace distinción entre piezas nuevas y piezas de reflujo, ya que los datos de sus uniformes en LKT son iguales y al no disponer de datos para cambiar los tiempos de las piezas de reflujo, en la programación se ha incluido en comentarios el hecho de que la máquina haga la distinción, por si en un futuro se introducen esos datos.

La forma de los comentarios se observa en la imagen 5.1, en verde.

```
!IF Estado < 2
TiempoCiclo(4) = Triangle (TiempoPlacaMin(4),TiempoPlacaMed(4),TiempoPlacaMax(4))
!ELSE
!TiempoCiclo(4) = Uniform (TiempoReprocesoMin(4),TiempoReprocesoMax(4))
!ENDIF
```

Imagen 5.1 Preparación funcionamiento diferenciado

5.4.2 Segunda etapa

El escenario NPLUS1 tiene, al igual que el LKT dos máquinas en paralelo en esta etapa, solo que, ahora, de igual forma que en la primera etapa, son máquinas distintas, y cada una responde a las variables obtenidas de las clases.

El tiempo de ciclo de reflujo de las máquinas se mantiene igual por falta de datos. Pero el tiempo de ciclo de piezas nuevas pasa de ser la misma distribución uniforme a ser una distribución triangular distinta para cada una, siendo la Triangle (9.90, 21.67, 37.50) para M4, y la Triangle (10.40, 28.65, 47.70) para M5. Se ve que el tiempo de simulación establecido para LKT (Uniform (13, 18)) era demasiado optimista respecto a los datos arrojados por las clases teóricas, en donde los datos oscilan entre mínimos un poco por debajo de esos valores, y máximos de hasta más del doble del máximo estimado.

Las calidades también se modifican, siendo 80.52% para M4 y 87.80% para M5.

La máquina OLA pasa a seguir una distribución Triangle (11.90, 15.42, 17.50) para las piezas nuevas y su calidad pasa a ser de 78.18%.

El resto de parámetros se mantienen igual en las tres máquinas respecto a lo visto en el escenario LKT.

Para la máquina OLA, al igual que en la máquina Reflow, se ha considerado que no hace distinción entre piezas nuevas y piezas de reflujo, ya que los datos de sus uniformes en LKT son iguales, y al no disponer de datos para cambiar los tiempos de las piezas de reflujo, en la programación se ha incluido en comentarios el hecho de que la máquina haga la distinción, por si en un futuro se introducen esos datos.

5.4.3 Tercera etapa

La tercera etapa sigue contando con dos máquinas, solo que ahora, como en el resto de etapas, son máquinas distintas y cada una responde a las variables obtenidas de las clases.

El tiempo de ciclo de piezas de primera circulación pasa a ser una distribución triangular distinta para cada una, siendo la Triangle (9.67, 15.63, 28.40) para M6 y la Triangle (9.42, 15.71, 32.5) para M7. Al igual que para la dos, el tiempo de ciclo pasa a ser mayor que el previsto en LKT, llegando a ser hasta 2.5 veces el máximo predicho.

Las calidades de estas máquinas también se modifican, siendo 87.28% para M6 y 76.27% para M7.

La máquina Test pasa a seguir una distribución Triangle (100, 110.05, 120.40), para las piezas nuevas y su calidad pasa a ser de 60.47%. Siendo esta la única máquina que empeora su calidad respecto a lo esperado en el escenario inicial LKT.

El resto de parámetros se mantienen igual en las tres máquinas respecto a lo visto en el escenario LKT.

Para la máquina Test, al igual que en las máquinas Reflow y OLA, se ha considerado que no hace distinción entre piezas nuevas y piezas de reflujo, ya que los datos de sus uniformes en LKT son iguales y, al no disponer de datos para cambiar los tiempos de las piezas de reflujo, se ha incluido en la programación comentarios del hecho de que la máquina haga la distinción, por si en un futuro se introducen esos datos.

5.4.4 Calidad

El funcionamiento de la máquina QA sigue siendo igual que en LKT, solo su tiempo de ciclo pasa a ser para las piezas de primera circulación una Triangle (4.20, 8.58, 13.80), manteniendo el mismo tiempo de ciclo para las piezas de reflujo (Uniform (2, 2)). Volvemos a ver un tiempo de ciclo máximo mucho mayor que el esperado en la simulación LKT.

Para la calidad de esta máquina, como ya se ha explicado anteriormente, se ha tenido que recalcular, obteniendo un valor de 85.45%.

5.5 Validación del Modelo

Para validar el modelo se va a proceder a comparar los resultados promedios obtenidos de simular 20 veces cada escenario, utilizando un tiempo de 8 minutos de simulación puesto que este es el tiempo que se emplea en las clases de Focus Lean en correr la aplicación.

Después se compararán los resultados obtenidos en extender esos tiempos a una semana de trabajo para el programa funcione en modo estacionario y poder analizar mejor las diferencias que pueda haber.

Una semana de trabajo son 60 minutos por hora, 8 horas al día, 5 días a la semana que da 2400 minutos.

5.5.1 Resultados escenario LKT 8 minutos

El escenario inicial muestra cómo resulta ser la producción si se siguen los parámetros teóricos que se han planificado para las clases.

En la tabla 5.5 se observa que la fábrica tiene un índice de calidad del 49.27%, lo que supone enormes problemas de calidad, puesto que esto quiere decir que más de la mitad de las piezas que se entregan al cliente son malas. Además, se deja de abastecer el 60% de las piezas al cliente, por lo que éste recibe en buenas condiciones casi el 20% del total de lo que pide.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo	
LKT	Verde	2,25	1,9	42,1	54,2168675	60,1449275
	Amarillo	0,6	1	21,95	37,5	23,1884058
	Rojo	0,55	0,6	11,35	47,826087	16,6666667
	Total servido	3,4	3,5	75,4	49,2753623	
	NoServido	10,3				

Tabla 5.5 Piezas escenario LKT

En la tabla 5.6 se observa que las máquinas M6 y M7 pasan un 68% de su tiempo esperando piezas, por lo que el equilibrado de la cadena no es bueno. Con estos datos puede parecer que el cuello de botella se encuentra en la máquina OLA.

		ocupada	Libre	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
LKT	M1	90,7072178	0	6,1979167	3,0948655	14,9
	M2	90,21077	0	6,72673	3,0625	14,2
	M3	90,24928	0	6,68822	3,0625	14,55
	Reflow	60,17722145	2,81969875	30,7530797	6,25	57,5
	M4	69,1087835	17,25661085	11,4742802	2,16032545	21,95
	M5	46,89765525	28,9114222	22,69092245	1,5	38,65
	OLA	55,57291665	0	38,6979166	5,72916675	26,2
	M6	25,64830985	68,50793995	5,15624995	0,6875	12,65
	M7	25,5679712	68,58827855	5,15624995	0,6875	12,4
	Test	100	0	0	0	16
	QA	14,3683519	85,6316481	0	0	20
	Media Fabricacion	65,41401257	18,60839503	13,35415656	2,62343577	22,9
	Media Total	60,77349796	24,70141804	12,14014232	2,384941609	22,63636364

Tabla 5.6 Máquinas escenario LKT

Se ve que la máquina Test está utilizada en su 100% del tiempo, y que el puesto QA, que es el siguiente, tiene más de un 85% de espera. Se entiende, por tanto, que esta máquina también es candidata a ser cuello de botella y que el operario QA está infrautilizado.

5.5.2 resultados escenario NPLUS1 8 minutos

Este escenario es generado a partir de simular los datos de entrada generados por el trabajo realizado por los alumnos de Focus Lean.

En la tabla 5.7 se observa que la fábrica tiene un índice de calidad del 80,59%, esto supone que el cliente reciba correctamente 8 de cada 10 productos lo que puede parecer bueno, pero a esto hay que sumarle que se le han entregado solamente 6,7 piezas de promedio de las 17 que pide cada vez por lo que el cliente solo recibe en buen estado 30% de todo lo que pide.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
NPLUS1	Verde	3,25	0,75	36,25	81,25	59,7014925
	Amarillo	1,3	0,4	20,05	76,4705882	25,3731343
	Rojo	0,85	0,15	10,8	85	14,9253731
	Total servido	5,4	1,3	67,1	80,5970149	
	No Servido	10,4				

Tabla 5.7 Piezas escenario NPLUS1

En la tabla 5.8 se observa que las máquinas M6 y M7 pasan un 58% de su tiempo esperando piezas, por lo que el equilibrado de la cadena no es bueno. Con estos datos puede parecer que el cuello de botella se encuentra en la máquina OLA

		ocupada	Libre	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
NPLUS1	M1	91,8497138	0	5,0252862	3,125	11,8
	M2	92,0003822	0	4,8958334	3,1037844	10,85
	M3	92,0501323	0	4,8248677	3,125	11
	Reflow	74,60472425	0	17,0619425	8,333333	34,5
	M4	58,38382125	33,38039185	6,4080903	1,82769655	12,75
	M5	30,20422875	54,0110098	14,8160115	0,96875	26
	OLA	63,7500447	0	29,7216247	6,5283306	20,2
	M6	35,7316301	58,92344185	4,15568985	1,18923825	10,35
	M7	37,5744838	57,3341438	3,90387245	1,1875	9,85
	Test	100	0	0	0	16
	QA	29,3852379	70,6147621	0	0	19,75
	Media Fabricacion	67,61491612	20,36489873	9,08132186	2,93886328	16,33
	Media Total	64,13949082	24,93306813	8,255747145	2,671693891	16,64090909

Tabla 5.8 Máquinas escenario NPLUS1

Se ve que la máquina Test está utilizada en su 100% del tiempo, y que el puesto QA, que es el siguiente, tiene más de un 70% de espera. Se entiende, por tanto, que esta máquina también es candidata a ser cuello de botella y que el operario QA está infrautilizado.

también se aprecia que las máquinas M4 y M5 tienen un tiempo libre promedio del 45% y que la máquina Reflow que es la anterior a estas, no tiene tiempo de espera por lo que se la puede considerar también candidata a ser cuello de botella.

5.5.3 Comparación 8 minutos

En la tabla 5.9 se observa la resta de los resultados del escenario LKT a los de NPLUS1 y que el nuevo escenario aporta en líneas generales mucha mayor calidad, un nivel de servicio algo peor que puede ser debido a la aleatoriedad, un incremento de las piezas buenas servidas, un decremento de las piezas malas servidas y una reducción del WIP.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	1	-1,15	-5,85	27,0331325
Amarillo	0,7	-0,6	-1,9	38,9705882
Rojo	0,3	-0,45	-0,55	37,173913
Total servido	2	-2,2	-8,3	31,3216526
No Servido	0,1			

Tabla 5.9 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en piezas

En cuanto a los productos se puede concluir que para 8 minutos hay una mejora de los resultados obtenidos respecto a los resultados esperados pero que se sigue dando un escenario inicial de una fábrica en mal estado con un cliente descontento por el no abastecimiento, aunque con un problema de calidad mucho menor.

En la tabla 5.10 se puede ver la comparación de las máquinas entre los escenarios LKT y Nplus1 como en el caso anterior los resultados son la resta de los valores de LKT a NPlus1.

	ocupada	Libre	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
M1	1,142496	0	-1,1726305	0,030135	-3,1
M2	1,789612	0	-1,8308966	0,041284	-3,35
M3	1,800852	0	-1,8633523	0,0625	-3,55
Reflow	14,4275	-2,8197	-13,6911372	2,083333	-23
M4	-10,725	16,12378	-5,0661899	-0,33263	-9,2
M5	-16,6934	25,09959	-7,87491095	-0,53125	-12,65
OLA	8,177128	0	-8,9762919	0,799164	-6
M6	10,08332	-9,5845	-1,0005601	0,501738	-2,3
M7	12,00651	-11,2541	-1,2523775	0,5	-2,55
Test	0	0	0	0	0
QA	15,01689	-15,0169	0	0	-0,25
Media Fabricacion	2,200904	1,756504	-4,2728347	0,315428	-6,57
Media Total	3,365993	0,23165	-3,88439518	0,286752	-5,995454545

Tabla 5.10 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en máquinas

Se puede apreciar que en todos los puestos menos en Test pasan más tiempo ocupados y se trabajan menos piezas por lo que se puede decir que los alumnos son más lentos de lo que se esperaban que fueran destacando el caso de Reflow donde se trabajan 23 productos menos.

Al trabajar menos productos se sufren menos cambios de herramienta y con ello los tiempos de SETUP que pasan las máquinas son menores

El operario de QA trabaja más tiempo del esperado, pero como vimos en las anteriores tablas, sigue teniendo mucho tiempo ocioso.

5.5.4 Resultados escenario LKT 2400 minutos

El escenario inicial muestra cómo resultaría ser la producción si se siguieran los parámetros teóricos que se han planificado para las clases.

En la tabla 5.11 se ve que la fábrica tiene un índice de calidad del 56,32%, lo que supone enormes problemas de calidad, puesto que, esto quiere decir, que casi la mitad de las piezas que se entregan al cliente son malas. Además, se deja de abastecer casi la mitad de las piezas al cliente, por lo que el cliente recibe en buenas condiciones poco más de un cuarto de las piezas totales que pide.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
LKT	Verde	1125,8	875,75	2514,9	56,246409	69,8121763
	Amarillo	330,7	253,85	682,1	56,5734326	20,3885527
	Rojo	158,15	122,8	363,9	56,291155	9,79927103
	Total servido	1614,65	1252,4	3560,9	56,3174692	
	NoServido	2670,15				

Tabla 5.11 Piezas escenario LKT

En la tabla 5.12 se observa que todas las máquinas de fabricación, excepto la máquina Test, están bloqueadas ente un 27% y 68% de su tiempo, por lo que se puede considerar que el cuello de botella se encuentra ubicado en dicha máquina. Además, se puede ver que la máquina tiene un 100% de su tiempo ocupado, lo que confirma dicha hipótesis.

		ocupada	Libre	Bloqueada	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
LKT	M1	50,9553213	0	43,22763015	4,2246528	1,59239585	2670,15
	M2	50,68936995	0	43,6150126	4,11145085	1,5841667	2638,2
	M3	50,6816537	0	43,4563324	4,27795135	1,58406245	2644,95
	Reflow	25,2905965	7,94201475	52,65992345	11,47447915	2,63298605	7283,6
	M4	27,6279435	4,4694121	62,5321472	4,50705965	0,8634375	2930,5
	M5	18,74556225	6,2240546	68,68169925	5,7630588	0,58562505	3618,95
	OLA	40,53959895	0	27,85163415	27,3858502	4,2229167	5837,55
	M6	15,1121069	12,6711296	68,0286733	3,71579865	0,47229165	2305,6
	M7	15,05613135	12,6507094	68,1848259	3,6380208	0,4703124	2299,05
	Test	100	0	0	0	0	5756
	QA	11,98275135	88,01724865	0	0	0	5760
	Media Fabricacion	39,46982844	4,395732045	47,82378784	6,909832225	1,400819435	3798,455
Media Total	36,97100325	11,9976881	43,47617076	6,281665659	1,273472214	3976,777273	

Tabla 5.12 Máquinas escenario LKT

También se puede observar que el operario de calidad QA tiene libre cerca del 88% de su tiempo. Lo que indica que está parado prácticamente en todo momento.

5.5.5 Resultados escenario Nplus1 2400 minutos

Este escenario da como resultado cómo queda la fábrica tras la semana de trabajo siguiendo las distribuciones generadas a partir del trabajo de los alumnos de Focus Lean.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

En la tabla 5.13 se observa que la fábrica tiene un índice de calidad del 84,63%, esto supone que el cliente reciba correctamente 8,4 de cada 10 productos lo que puede aportar la sensación de que se trabaja correctamente, pero a esto hay que añadir el hecho de que se le han entregado menos de la mitad de las piezas que pide. Por esto, el cliente solo recibe en buen estado el 40% de todo lo que pide.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
NPLUS1	Verde	1595,1	289,5	2514,9	84,6386501	69,9100436
	Amarillo	466,05	83,15	686,3	84,8597961	20,3728091
	Rojo	220,25	41,7	367,65	84,0809315	9,71714736
	Total servido	2281,4	414,35	3568,85	84,6295094	
	No Servido	2841,3				

Tabla 5.13 Piezas escenario NPLUS1

En la tabla 5.14 se observa que todas las máquinas de fabricación, excepto la máquina Test, están bloqueadas entre un 15% y 55% de su tiempo. Lo que quiere decir que el cuello de botella se encuentra claramente ubicado en dicha máquina.

		ocupada	Libre	Bloqueada	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
NPLUS1	M1	63,8519906	0	30,09257025	4,0600695	1,99536965	2575,45
	M2	64,5251555	0	29,6701573	3,78802095	2,0166667	2426,45
	M3	64,1196507	0	29,9044117	3,97187495	2,00406255	2463,1
	Reflow	48,65961075	1,0312482	34,46903685	10,77135415	5,0687501	6813,3
	M4	34,34347555	6,254025	54,58749935	3,74166655	1,0733333	2442,9
	M5	17,90231875	10,05020255	65,9349109	5,5531928	0,559375	3467,05
	OLA	53,944592	0	15,9663058	24,469054	5,6200481	5194,55
	M6	23,7163318	17,1781017	54,84417765	3,52013885	0,7412502	2182,15
	M7	24,7006478	16,6469788	54,50209565	3,37829865	0,7719793	2129,4
	Test	100	0	0	0	0	5228,2
	QA	20,13196385	79,86803615	0	0	0	5232,05
	Media Fabricacion	49,57637735	5,116055625	36,99711655	6,32536704	1,98508349	3492,255
	Media Total	46,89961248	11,91169022	33,63374231	5,750333673	1,804621355	3650,418182

Tabla 5.14 Máquinas escenario NPLUS1

También se puede observar que el operario de calidad QA tiene libre cerca del 80% de su tiempo.

5.5.6 Comparación 2400 minutos

En la tabla 5.15 se observa la resta de los resultados del escenario LKT a los de NPLUS1 y que el nuevo escenario aporta en líneas generales mucha mayor calidad, un nivel de servicio en torno a un 6% peor, un incremento de las piezas buenas servidas, un decremento de las piezas malas servidas y un incremento de WIP muy poco significativo.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	469,3	-586,25	0	28,3922411
Amarillo	135,35	-170,7	4,2	28,2863635
Rojo	62,1	-81,1	3,75	27,7897765
Total servido	666,75	-838,05	7,95	28,3120402
No Servido	171,15			

Tabla 5.15 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en piezas

En cuanto a los productos se puede concluir que para 2400 minutos hay una mejora de los resultados obtenidos respecto a los resultados esperados en cuanto a calidad y un decremento significativo en el nivel de servicio por lo que se sigue dando un escenario inicial de una fábrica en mal estado con un cliente descontento por el no abastecimiento, aunque con un problema de calidad mucho menor.

En la tabla 5.16 se puede ver la comparación de las máquinas entre los escenarios LKT y Nplus1 como en los casos anteriores los resultados son la resta de los valores de LKT a NPlus1.

	ocupada	Libre	Bloqueada	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
M1	12,89667	0	-13,13506	-0,1645833	0,402974	-94,7
M2	13,83579	0	-13,94486	-0,3234299	0,4325	-211,75
M3	13,438	0	-13,55192	-0,3060764	0,42	-181,85
Reflow	23,36901	-6,91077	-18,19089	-0,703125	2,435764	-470,3
M4	6,715532	1,784613	-7,944648	-0,7653931	0,209896	-487,6
M5	-0,84324	3,826148	-2,746788	-0,209866	-0,02625	-151,9
OLA	13,40499	0	-11,88533	-2,9167962	1,397131	-643
M6	8,604225	4,506972	-13,1845	-0,1956598	0,268959	-123,45
M7	9,644516	3,996269	-13,68273	-0,25972215	0,301667	-169,65
Test	0	0	0	0	0	-527,8
QA	8,149213	-8,14921	0	0	0	-527,95
Media Fabricacion	10,10655	0,720324	-10,82667	-0,58446519	0,584264	-306,2
Media Total	9,928609	-0,086	-9,842428	-0,53133199	0,531149	-326,3590909

Tabla 5.16 Comparación escenarios NPLUS1 y LKT en máquinas

Se puede ver que todos los puestos anteriores a Test pasan menos tiempo bloqueados y que además en todos los puestos se trabajan menos piezas y pasan más tiempo ocupados, esto quiere decir que los alumnos son más lentos de los esperados en el escenario LKT.

Al trabajar menos productos se sufren menos cambios de herramienta y con ello los tiempos de SETUP que pasan las máquinas son menores.

El operario de QA trabaja más tiempo del esperado, pero como vimos en las anteriores tablas, sigue teniendo mucho tiempo ocioso.

5.5.7 Conclusiones

Se puede decir que los resultados arrojados por los alumnos son muy similares a los esperados en el modelo teórico a pesar de que los tiempos de LKT fueron demasiado optimistas y sus calidades muy pesimistas, estos dos hechos se han contrarrestado dejando una situación similar de la empresa para poder empezar a trabajar en las herramientas Lean que son el objetivo de la herramienta didáctica.

Capítulo 6: Nuevos Escenarios NPLUS1

6.1 Introducción

Una vez validado el modelo NPLUS1 se pasa al siguiente paso que es la conversión de la planta al sistema productivo en serie que hace en tres escenarios en los cuales se va modificando una a una las etapas desde el principio hacia el final. Pasando posteriormente a introducir los Kanban en el último escenario.

Para la creación de los distintos escenarios se tuvieron que preparar nuevas hojas del Excel que se detallaran más adelante y los cambios necesarios tanto en las hojas del Excel como en los modelados por Witness.

6.2 123Serie

Se ha utilizado la mencionada denominación para este escenario, dado que en él se pasa de tener todas las máquinas de producción en paralelo, a que las máquinas de la primera etapa estén en serie.

Para este escenario se ha generado una nueva hoja de Excel con el mismo nombre, que puede verse las Tablas 6.1 y 6.2.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

Estacion	TiempoPlacaMin	TiempoPlacaMed	TiempoPlacaMax	TiempoReprocesoMin	TiempoReprocesoMax	TiempoSetup	TiempoReparacionMin
AssemblyOne	9,206666667	11,58634921	16,57322751	1,616666667	2,761111111	5	3
AssemblyTwo	7,873333333	12,00857143	18,7584127	1,616666667	2,761111111	5	3
AssemblyThree	11,37333333	12,92126984	16,35153439	1,616666667	2,761111111	5	3
Reflow	8,1	10,02857143	12,7	5	5	5	10
AssemblyFour	9,9	21,67142857	37,5	5	10	5	3
AssemblyFive	10,4	28,65714286	47,7	5	10	5	3
HeatWave	11,9	15,42857143	17,5	10	10	15	10
AssemblySix	9,67	15,63285714	28,4	5	10	5	3
AssemblySeven	9,42	15,71428571	32,5	5	10	5	3
Test	100	110,0571429	120,4	100	100	0	0
QA	4,2	8,585714286	13,8	2	2	0	0

Tabla 6.1 Parámetros 123Serie parte 1

TiempoReparacionMax	TiempoTransporte	PorcentajeCalidad	NumeroAverias	WIPInicialVerdes	WIPInicialAmarillos	WIPInicialRojos
3	1	96,76031979	5	2	2	1
3	1	93,5900312	5	2	2	1
3	1	98,51240965	5	2	2	1
10	8	81,05714286	5	2	2	1
3	1	80,52857143	5	2	2	1
3	1	87,8	5	2	2	1
10	8	78,18571429	5	2	0	0
3	1	87,28571429	5	1	1	1
3	1	76,27142857	5	1	1	1
0	1	60,47142857	0	1	1	2
0	1	85,449419	0	0	0	0

Tabla 6.2 Parámetros 123Serie parte 2

Los cambios respecto a Nplus1 afectan a las máquinas M1, M2 y M3 y son:

- ❖ TiempoPlacaMin: se recalcula como $1/3$ del tiempo de placa mínimo de Nplus1, y se le resta la centésima parte del promedio de los tiempos de placa mínimo de Nplus1. Esta resta se debe a que, al tener menos tareas de trabajo por trabajador, se mejora la especialización y los tiempos.
- ❖ TiempoPlacaMed: se calcula como $1/3$ del tiempo de placa medio de Nplus1 y se le resta $1/3$ del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de placa Mínimo de esta hoja.
- ❖ TiempoPlacaMax: se calcula como $1/3$ del tiempo de placa máximo de Nplus1 y se le resta $1/3$ del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de placa Medio de esta hoja.
- ❖ TiempoReprocesoMin: se recalcula como $1/3$ del tiempo de reproceso mínimo de Nplus1 y se le resta la centésima parte del promedio de los tiempos de reproceso mínimo de Nplus1. Esta resta se debe a que, al tener menos tareas de trabajo por operario, se mejora la especialización y los tiempos.

- ❖ TiempoReprocesoMax: se calcula como $1/3$ del tiempo de reproceso máximo de Nplus1 y se le resta $1/3$ del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de reproceso Mínimo de esta hoja.
- ❖ PorcentajeCalidad: se calcula como el mínimo entre el 100% de calidad y multiplicar por 1,05 la raíz cúbica de la calidad de Nplus1. Para hacer la raíz hay que pasar el número a tanto por 1 y, después de ella, volver a pasarlo a tanto por ciento. Se pone el mínimo, puesto que en caso de que en futuras simulaciones se den resultados muy buenos, con este producto, se podrían obtener resultados de calidad mayores que el 100%.

Se incluyen ocho nuevos almacenes, denominados: “M2” más color, “M3” más color y REM2 y REM3, y se redistribuyen las máquinas de la forma en que se refleja en la imagen 6.1.

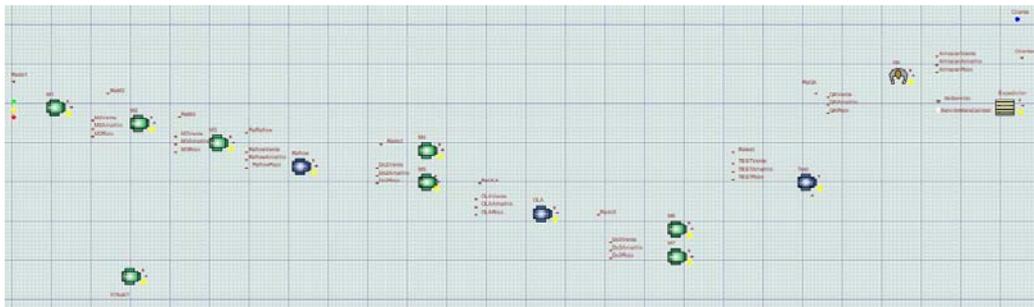


Imagen 6.1 Modelo 123Serie

Las etapas dos y tres no sufren ningún cambio en este nuevo escenario.

6.2.1 Primera etapa

Como ya se ha explicado anteriormente, este escenario modifica la primera etapa y pasa a tener las máquinas M1, M2 y M3 en serie, tal y como se observa en la imagen 6.2.

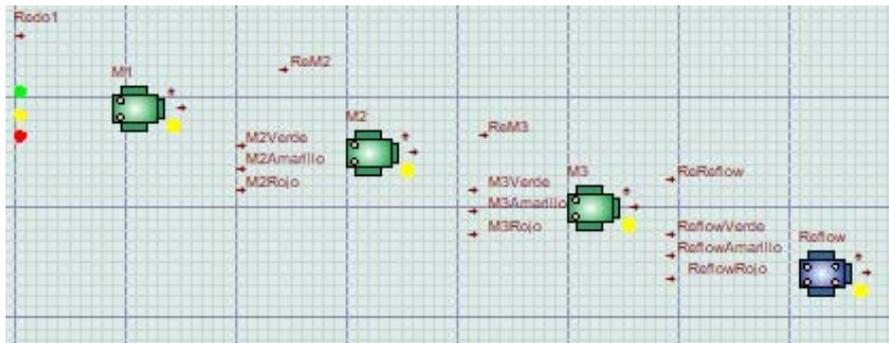


Imagen 6.2 Ampliación de parte de la imagen 6.1

En este nuevo escenario sólo la máquina M1 selecciona las piezas desde fuera del modelo (siguiendo el 70 verde, 20 amarillo y 10 rojo, ya visto), las procesa, siguiendo la Triangle (9.50, 12.77, 19.06) y vierte la producción a los almacenes “M2” más el color de la pieza de trabajo. Esto es así siempre que el almacén Redo1 esté libre ya que, si este almacén tiene alguna pieza, siempre procesará esta primero, con un tiempo de ciclo Uniform (1.66, 3.33) y, verterá la producción al almacén ReM2.

La calidad de M1 pasa a ser 92.15%, y el resto de su funcionamiento es igual que el descrito en el escenario Nplus1.

La máquina M2 obtiene las piezas del almacén ReM2, siempre que el almacén cuente con piezas, las procesa, con un tiempo de ciclo Uniform (1.66, 3.33) y las lleva al almacén ReM3. Si ReM2 está vacío, las piezas se obtienen de “M2” más color, siguiendo la fórmula de 4.2.2. Procesa las piezas siguiendo una Triangle (8.16, 14.07, 22.13) y las vierte a los almacenes “M3” más el color de la pieza trabajada.

La calidad de M2 pasa a ser 89.13% y el resto de su funcionamiento sigue igual que lo dicho en Nplus1.

La máquina M3 obtiene las piezas del almacén ReM3, siempre que el almacén cuente con piezas, las procesa, con un tiempo de ciclo Uniform (1.66, 3.33) y las lleva al almacén ReReflow, como hace en los escenarios anteriores. Si ReM3 está vacío obtiene las piezas de “M3” más color, siguiendo la fórmula de 4.2.2. Procesa las piezas siguiendo una Triangle (11.66, 13.69, 18.066) y las vierte a los

almacenes “Reflow” más el color de la pieza trabajada, como hacían las tres máquinas en los anteriores escenarios.

La calidad de M3 pasa a ser 93.82% y el resto de su funcionamiento sigue igual que lo dicho en Nplus1.

En este escenario la única máquina que pone la Avería (1) a 0 es la máquina M1, puesto que si las otras dos lo hicieran “arreglarían” los fallos que hubieran podido cometer en las máquinas anteriores (M1 para M2, y M1 y M2 para M3).

Como ya no vierten su producción al mismo almacén, si no que cada una tiene el suyo propio, ya no tienen en el mismo WIP y, por lo tanto, no habrá que sumarlos.

La máquina Reflow no sufre cambios respecto a Nplus1.

6.2.2 Llenado inicial de los almacenes

Lo explicado en el apartado 4.2.4 deja de ser completamente correcto por la incorporación de los nuevos almacenes y el paso de paralelo a serie que los ha generado.

Ahora la máquina virtual llena un total de 24 almacenes, siguiendo el orden de colores.

Al estar en serie estas tres máquinas y tener cada una su almacén a posterior, la máquina virtual tiene que rellenar estos nuevos almacenes con las probabilidades de que las piezas estén dañadas. Además, todos los almacenes posteriores se ven afectados por las tres máquinas y no solo por una de las tres. En la imagen 6.3 se observa que la máquina M1 afecta a todas las piezas que crea la máquina virtual, pero M2 y M3 solo a aquellas que estén destinadas a almacenes posteriores a su funcionamiento.

```
!Pasa por M1
IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(1)
  Averia(1) = 1
  Estado = 1
ENDIF
!Pasa por M2
IF ContN > Verdes(1) AND ContN < Verdes(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(2)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(1) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(2)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(1) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(2)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
!Pasa por M3
IF ContN > Verdes(2) AND ContN < Verdes(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(3)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(2) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(3)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(2) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(3)
    Averia(1) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
```

Imagen 6.3 Calidad piezas 123Serie

6.3 12345Serie

Se ha utilizado dicha denominación para este escenario debido a que aquí se pasa de tener solo las máquinas de producción de la primera etapa en serie a tener las máquinas de la primera y segunda estación en serie.

Para este escenario se ha generado una nueva hoja de Excel con el mismo nombre, que se muestra en las Tablas 6.3 y 6.4.

Estacion	TiempoPlacaMin	TiempoPlacaMed	TiempoPlacaMax	TiempoReprocesoMin	TiempoReprocesoMax	TiempoSetup	TiempoReparacionMin
AssemblyOne	9,206666667	11,58634921	16,57322751	1,616666667	2,761111111	5	3
AssemblyTwo	7,873333333	12,00857143	18,7584127	1,616666667	2,761111111	5	3
AssemblyThree	11,37333333	12,92126984	16,35153439	1,616666667	2,761111111	5	3
Reflow	8,1	10,02857143	12,7	5	5	5	10
AssemblyFour	4,8485	7,842107143	13,29605357	2,45	3,725	5	3
AssemblyFive	5,0985	9,713535714	16,78176786	2,45	3,725	5	3
HeatWave	11,9	15,42857143	17,5	10	10	15	10
AssemblySix	9,67	15,63285714	28,4	5	10	5	3
AssemblySeven	9,42	15,71428571	32,5	5	10	5	3
Test	100	110,0571429	120,4	100	100	0	0
QA	4,2	8,585714286	13,8	2	2	0	0

Tabla 6.3 Parámetros 12345Serie parte 1

TiempoReparacionMax	TiempoTransporte	PorcentajeCalidad	NumeroAverias	WIPInicialVerdes	WIPInicialAmarillos	WIPInicialRojos
3	1	96,76031979	5	2	2	1
3	1	93,5900312	5	2	2	1
3	1	98,51240965	5	2	2	1
10	8	81,05714286	5	2	2	1
3	1	94,2245987	5	2	2	1
3	1	98,38673691	5	2	2	1
10	8	78,18571429	5	2	0	0
3	1	87,28571429	5	1	1	1
3	1	76,27142857	5	1	1	1
0	1	60,47142857	0	1	1	2
0	1	85,449419	0	0	0	0

Tabla 6.4 Parámetros 12345Serie parte 2

Los cambios respecto a 123S afectan a las máquinas M4 y M5, y son:

- ❖ TiempoPlacaMin: se recalcula como 1/2 del tiempo de placa mínimo de Nplus1, y se le resta la centésima parte del promedio de los Tiempos de placa mínimo de Nplus1. Esta resta se debe a que, al tener menos tareas de trabajo por trabajador, mejora la especialización y se mejoran los tiempos.
- ❖ TiempoPlacaMed: se calcula como 1/2 del tiempo de placa medio de Nplus1 y se le resta 1/3 del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de placa Mínimo de esta hoja.
- ❖ TiempoPlacaMax: se calcula como 1/2 del tiempo de placa máximo de Nplus1 y se le resta 1/3 del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de placa Medio de esta hoja.
- ❖ TiempoReprocesoMin: se recalcula como 1/2 del tiempo de reproceso mínimo de Nplus1 y se le resta la centésima parte del promedio de los tiempos de reproceso mínimo de Nplus1. Esta resta se debe a que, al tener menos tareas de trabajo por trabajador, mejora la especialización y se mejoran los tiempos.

- ❖ **TiempoReprocesoMax:** se calcula como $1/2$ del tiempo de reproceso máximo de Nplus1 y se le resta $1/2$ del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de reproceso Mínimo de esta hoja.
- ❖ **PorcentajeCalidad:** se calcula como el mínimo entre el 100% de calidad y multiplicar por 1,05 la raíz cuadrada de la calidad de Nplus1. Para hacer la raíz hay que pasar el número a tanto por 1 y, después de ella, volver a pasarlo a tanto por ciento. Se pone el mínimo puesto que, en caso de que en futuras simulaciones se den resultados muy buenos, con este producto, se podrían obtener resultados de calidad mayores que el 100%.

Se incluyen cuatro nuevos almacenes, denominados “M5” más color y REM5, y se redistribuyen las máquinas como se puede ver en la imagen 6.4.

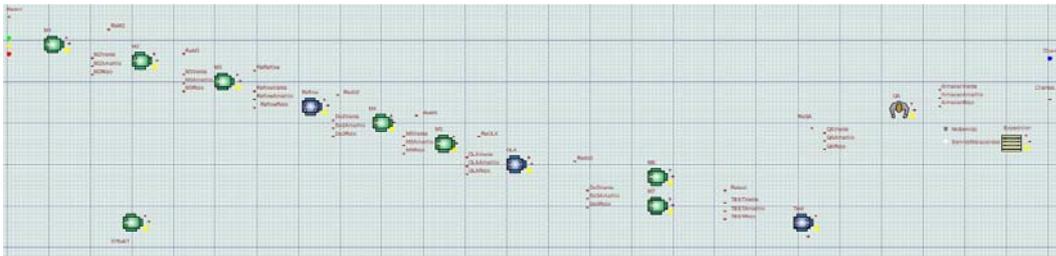


Imagen 6.4 Modelo 12345Serie

Las etapas uno y tres no sufren ningún cambio en este nuevo escenario.

6.3.1 Segunda etapa

Como ya se ha explicado anteriormente, este escenario modifica la segunda etapa y pasa a tener las máquinas M4 y M5 en serie, tal y como se observa en la imagen 6.5.



Imagen 6.5 Ampliación de parte de la imagen 6.4

En este escenario ahora sólo la máquina M4 recoge las piezas de los almacenes “Reflow” color y del almacén de reflujo Redo2, y lo hace siguiendo la misma norma que en los escenarios anteriores. Ahora, sigue un tiempo de ciclo para piezas de primera circulación Triangle (4.95, 10.83, 18.75) que, tras el proceso, vierte su producción a los almacenes “M5” color. Para las piezas de reflujo sigue una Uniform (2.50, 5.00) y vierte estas otras piezas al almacén ReM5.

La calidad de M4 pasa a ser del 89.73%, y el resto del funcionamiento de la máquina no sufre cambios respecto a Nplus1.

La máquina M5 obtiene las piezas del almacén ReM5, siempre que este tenga piezas, las procesa, con un tiempo de ciclo Uniform (2.50, 5.00) y las lleva al almacén ReOLA, como hacían en anteriores escenarios la máquina M4 y esta. Si ReM5 está vacío obtiene las piezas de “M5” más color, siguiendo la fórmula vista en 4.2.2. Procesa las piezas siguiendo una Triangle (5.20, 14.32, 23.85), y las vierte a los almacenes “OLA” más el color de la pieza trabajada, como hacía en anteriores escenarios.

La calidad de M5 pasa a ser 93.70%, y el resto de su funcionamiento se mantiene de la misma forma que lo dicho para Nplus1.

En este escenario la única máquina que pone la Avería (2) a 0 es la máquina M4, puesto que si M5 lo hiciera “arreglaría” los fallos que hubiera podido cometer M4.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

Como ya no vierten su producción al mismo almacén, si no que cada una tiene el suyo propio, ya no tienen en el mismo WIP y no hay que sumarlos.

La máquina OLA no sufre cambios respecto a Nplus1.

6.3.2 Llenado inicial de los almacenes

A lo añadido en 5.3.2 se añaden 3 nuevos almacenes y una nueva probabilidad de que se averíen las piezas.

Ahora, la máquina virtual llena un total de 27 almacenes, siguiendo el orden de colores.

Al estar en serie estas nuevas dos máquinas y tener cada una su almacén a posterior, la máquina virtual tiene que rellenar estos nuevos almacenes con las probabilidades de que las piezas estén dañadas. Además, todos los almacenes posteriores se ven afectados por ambas máquinas y no solo por una de ellas. En la imagen 6.6 se puede ver que la máquina M4 afecta a las piezas posteriores al cuarto almacén (corresponde al almacén Redo2) de cada color, y M5 a las posteriores al quinto almacén.

```

!Pasa por M4
IF ContN > Verdes(4) AND ContN < Verdes(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(5)
    Averia(2) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(4) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(5)
    Averia(2) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(4) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(5)
    Averia(2) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
!Pasa por M5
IF ContN > Verdes(5) AND ContN < Verdes(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(6)
    Averia(2) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(5) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(6)
    Averia(2) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(5) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(6)
    Averia(2) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

Imagen 6.6 Calidad piezas 12345Serie

6.4 1234567Serie

Este escenario recibe la mencionada denominación debido a que todo el proceso productivo está en serie.

En este caso se ha generado una nueva hoja de Excel con el mismo nombre, la cual puede observarse en las tablas 6.5 y 6.6.

Estacion	TiempoPlacaMin	TiempoPlacaMed	TiempoPlacaMax	TiempoReprocesoMin	TiempoReprocesoMax	TiempoSetup	TiempoReparacionMin
AssemblyOne	9.206666667	11.58634921	16.57322751	1.616666667	2.761111111	5	3
AssemblyTwo	7.873333333	12.00857143	18.7584127	1.616666667	2.761111111	5	3
AssemblyThree	11.373333333	12.92126984	16.35153439	1.616666667	2.761111111	5	3
Reflow	8.1	10.02857143	12.7	5	5	5	10
AssemblyFour	4.8485	7.842107143	13.29605357	2.45	3.725	5	3
AssemblyFive	5.0985	9.713535714	16.78176786	2.45	3.725	5	3
HeatWave	11.9	15.42857143	17.5	10	10	15	10
AssemblySix	4.73955	6.277989286	10.23899464	2.45	3.725	5	3
AssemblySeven	4.61455	6.235846429	11.24292321	2.45	3.725	5	3
Test	100	110.0571429	120.4	100	100	0	0
QA	4.2	8.585714286	13.8	2	2	0	0

Tabla 6.5 Parámetros 1234567Serie parte 1

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

TiempoReparacionMax	TiempoTransporte	PorcentajeCalidad	NumeroAverias	WIPInicialVerdes	WIPInicialAmarillos	WIPInicialRojos
3	1	96,76031979	5	2	2	1
3	1	93,5900312	5	2	2	1
3	1	98,51240965	5	2	2	1
10	8	81,05714286	5	2	2	1
3	1	94,2245987	5	2	2	1
3	1	98,38673691	5	2	2	1
10	8	78,18571429	5	2	0	0
3	1	98,09816512	5	1	1	1
3	1	91,70019084	5	1	1	1
0	1	60,47142857	0	1	1	2
0	1	85,449419	0	0	0	0

Tabla 6.6 Parámetros 1234567Serie parte 2

Los cambios respecto a 12345S afectan a las máquinas M6 y M7, y son:

- ❖ TiempoPlacaMin: se recalcula como $1/2$ del tiempo de placa mínimo de Nplus1, y se le resta la centésima parte del promedio de los Tiempos de placa mínimo de Nplus1. Esta resta se debe a que, al tener menos tareas de trabajo por trabajador, se mejoran la especialización y los tiempos.
- ❖ TiempoPlacaMed: se calcula como $1/2$ del tiempo de placa medio de Nplus1, y se le resta $1/3$ del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de placa Mínimo de esta hoja.
- ❖ TiempoPlacaMax: se calcula como $1/2$ del tiempo de placa máximo de Nplus1 y se le resta $1/3$ del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de placa Medio de esta hoja.
- ❖ TiempoReprocesoMin: se recalcula como $1/2$ del tiempo de reproceso mínimo de Nplus1 y se le resta la centésima parte del promedio de los tiempos de reproceso mínimo de Nplus1. Esta resta se debe a que al tener menos tareas de trabajo por trabajador se mejoran la especialización y los tiempos.
- ❖ TiempoReprocesoMax: se calcula como $1/2$ del tiempo de reproceso máximo de Nplus1, y se le resta $1/2$ del recorrido que queda entre este valor y el Tiempo de reproceso Mínimo de esta hoja.
- ❖ PorcentajeCalidad: se calcula como el mínimo entre el 100% de calidad y multiplicar por 1,05 la raíz cuadrada de la calidad de Nplus1. Para hacer la raíz hay que pasar el número a tanto por 1 y, después de ella, volver a

pasarlo a tanto por ciento. Se pone el mínimo puesto que, en caso de que en futuras simulaciones se den resultados muy buenos, con este producto, se podrían obtener resultados de calidad mayores que el 100%.

Se incluyen cuatro nuevos almacenes denominados “M7” más color y REM7, y se redistribuyen las máquinas como se observa en la imagen 6.7. Aunque parece que se ha cambiado también la máquina virtual, como ésta solo llena los almacenes al inicio del programa, no tiene ninguna relevancia en la presentación del problema.



Imagen 6.7 Modelo 1234567Serie

Las etapas uno y dos no sufren ningún cambio en este nuevo escenario.

6.4.1 Tercera etapa

En este escenario se modifica la tercera etapa, pasando a tener las máquinas M6 y M7 en serie, como se aprecia en la imagen 6.8.

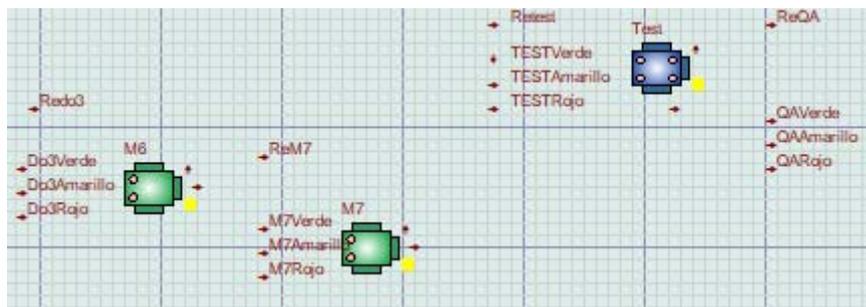


Imagen 6.8 Ampliación de parte de la imagen 6.7

En este escenario ahora sólo la máquina M6 recoge las piezas de los almacenes “ReOLA” color, y del almacén de reflujo Redo3, que lo hace siguiendo la misma norma explicada en 4.2.2. Sigue un tiempo de ciclo para piezas de primera circulación Triangle (4.83, 7.81, 14.20) que, tras el proceso, vierte su producción a

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

los almacenes “M7” color. Para las piezas de reflujo sigue una Uniform (2.50, 5.00) y vierte estas otras piezas al almacén ReM7.

La calidad de M6 pasa a ser del 93.42%, y el resto del funcionamiento de la máquina no sufre cambios respecto a Nplus1.

Siempre que el almacén ReM7 tenga piezas, la máquina M7 las obtiene de ahí, y las procesa con un tiempo de ciclo Uniform (2.50, 5.00), después las lleva al almacén ReTest, como hacía en los anteriores escenarios. Si ReM7 está vacío obtiene las piezas de “M7” más color, siguiendo la fórmula vista en 4.2.2. Procesa las piezas siguiendo una Triangle (4.71, 7.85, 16.25) y las vierte a los almacenes “Test” más el color de la pieza trabajada, tal y como hacía en anteriores escenarios.

La calidad de M7 pasa a ser 87.33%, y el resto de su funcionamiento se mantiene igual que lo establecido para Nplus1.

En este escenario la única máquina que pone la Avería (3) a 0 es la máquina M6, puesto que, si M7 lo hiciera, “arreglaría” los fallos que hubiera podido cometer M6.

Como ya no vierten su producción al mismo almacén, si no que cada una tiene su propio almacén, en este escenario no tienen en el mismo WIP y no hay que sumarlos.

La máquina Test no sufre cambios respecto a Nplus1.

6.4.2 Llenado inicial de los almacenes

A lo dispuesto en 5.4.2 añadimos 3 nuevos almacenes, y una nueva probabilidad de que se averíen las piezas.

Ahora, la máquina virtual llena un total de 30 almacenes, siguiendo el orden de colores.

Al estar en serie estas nuevas dos máquinas, y tener cada una su almacén a posterior, la máquina virtual tiene que rellenar estos nuevos almacenes con las probabilidades de que las piezas estén dañadas. Además, todos los almacenes posteriores se ven afectados por ambas máquinas, y no solo por una de ellas. Con la imagen 6.9 se puede ver que la máquina M6 afecta a las piezas posteriores al séptimo almacén (siendo este el almacén Redo3) de cada color, y M7 a las posteriores al octavo almacén.

```

!Pasa por M6
IF ContN > Verdes(7) AND ContN < Verdes(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(8)
    Averia(3) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(7) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(8)
    Averia(3) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(7) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(8)
    Averia(3) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
!Pasa por M7
IF ContN > Verdes(8) AND ContN < Verdes(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(9)
    Averia(3) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(8) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(9)
    Averia(3) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF
IF ContN > Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(8) AND ContN < Verdes(11) + Amarillos(11) + Rojos(11)
  IF Uniform (0,100) > PorcentajeCalidad(9)
    Averia(3) = 1
    Estado = 1
  ENDIF
ENDIF

```

Imagen 6.9 Calidad piezas 1234567Serie

6.5 Kanban

Este escenario recibe dicha denominación puesto que se cambia de un sistema Push a un sistema Pull, al introducir la metodología Kanban, explicada en 2.7.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

Para este escenario se ha generado una nueva hoja de Excel con el mismo nombre, lo cual puede verse en las tablas 6.7 y 6.8. En el Excel se observa que se han añadido tres nuevas columnas (llamadas “Kanban” y color) que representan el número de Kanban de cada tipo de pieza que existen entre una máquina y la siguiente.

Estacion	TiempoPlacaMin	TiempoPlacaMed	TiempoPlacaMax	TiempoReprocesoMin	TiempoReprocesoMax	TiempoSetup	TiempoReparacionMin
AssemblyOne	9.206666667	11.58634921	16.57322751	1.616666667	2.761111111	5	3
AssemblyTwo	7.873333333	12.00857143	18.7584127	1.616666667	2.761111111	5	3
AssemblyThree	11.37333333	12.92126984	16.35153439	1.616666667	2.761111111	5	3
Reflow	8.1	10.02857143	12.7	5	5	5	10
AssemblyFour	4.8485	7.842107143	13.29605357	2.45	3.725	5	3
AssemblyFive	5.0985	9.713535714	16.78176786	2.45	3.725	5	3
HeatWave	11.9	15.42857143	17.5	10	10	15	10
AssemblySix	4.73955	6.277989286	10.23899464	2.45	3.725	5	3
AssemblySeven	4.61455	6.235846429	11.24292321	2.45	3.725	5	3
Test	100	110.0571429	120.4	100	100	0	0
QA	4.2	8.585714286	13.8	2	2	0	0

Tabla 6.7 Parámetros Kanban parte 1

TiempoReparacionMax	TiempoTransporte	PorcentajeCalidad	NumeroAverias	WIPInicialVerdes	WIPInicialAmarillos	WIPInicialRojos	Kanban Verde	Kanban Amarillo	Kanban Rojo
3	1	96.76031979	5	2	2	1	2	2	1
3	1	93.6900312	5	2	2	1	2	2	1
3	1	98.51240965	5	2	2	1	2	2	1
10	8	81.05714286	5	2	2	1	2	2	1
3	1	94.2245987	5	2	2	1	2	2	1
3	1	98.38673691	5	2	2	1	2	2	1
10	8	78.18571429	5	2	0	0	2	2	1
3	1	98.09816512	5	1	1	1	2	2	1
3	1	91.70019084	5	1	1	1	7	5	3
0	1	60.47142857	0	1	1	2	8	8	8
0	1	85.449419	0	0	0	0	7	4	2

Tabla 6.8 Parámetros Kanban parte 2

En apariencia no sufre ningún cambio, por lo que la imagen 6.7 nos sirve también para representar este escenario.

En cuanto al funcionamiento del escenario, cambia el sistema de elección de piezas de las máquinas, limitando su libertad de producción y haciendo que las máquinas que preceden al cuello de botella (el Test y en parte también la OLA, puesto que esta máquina produce otro cuello de botella si solo tenemos en cuenta el funcionamiento de las dos primeras etapas) no generen una sobreproducción que bloquee los almacenes y haga que las máquinas se queden bloqueadas con piezas en su interior.

6.5.1 Inicialización de la simulación

Al tener este escenario 3 nuevas columnas en el Excel, hay que añadirle al sistema también tres nuevas variables que reflejan en Witness los Kanban para su funcionamiento, y que reciben el nombre de “Kanban” color y el número de

máquina a la que pertenecen. En la imagen 6.10 se observa cómo se realiza la nueva importación de datos del Excel.

```

FOR Row = 1 TO 11
TiempoPlacaMin(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","B2:B12",Row,1) / 60
TiempoPlacaMed(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","C2:C12",Row,1) / 60
TiempoPlacaMax(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","D2:D12",Row,1) / 60
TiempoReprocesoMin(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","E2:E12",Row,1) / 60
TiempoReprocesoMax(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","F2:F12",Row,1) / 60
TiempoSetup(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","G2:G12",Row,1) / 60
TiempoReparaciónMin(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","H2:H12",Row,1) / 60
TiempoReparaciónMax(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","I2:I12",Row,1) / 60
TiempoTransporte(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","J2:J12",Row,1) / 60
PorcentajeCalidad(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","K2:K12",Row,1)
NumeroAverias(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","L2:L12",Row,1)
WIPInicialVerdes(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","M2:M12",Row,1)
WIPInicialAmarillos(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","N2:N12",Row,1)
WIPInicialRojos(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","O2:O12",Row,1)
KanbanVerde(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","P2:P12",Row,1)
KanbanAmarillo(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","Q2:Q12",Row,1)
KanbanRojo(Row) = XLRangeToReal ("Input_Data_Sheets.xlsx","Kanban","R2:R12",Row,1)
NEXT

```

Imagen 6.10 Inicialización sistema

El resto de la inicialización es igual que lo explicado en el apartado 4.2.1

6.5.2 Criterio de selección de piezas

Este escenario modifica los criterios de selección de piezas explicados en 4.2.2

La prioridad de las máquinas sigue siendo tratar primero las piezas de reflujo. Estas piezas no se ven afectadas por los Kanban, puesto que su traslado por el sistema se hace a través de los almacenes “Re” ya mencionados.

Cuando el almacén “Re” de la máquina esté libre de piezas, empieza el criterio de selección de piezas condicionado de los almacenes de primera circulación.

Cuando se pueden coger todas las piezas, seguimos manteniendo los tantos por ciento explicados de 70% verde, 20% amarillo y 10% rojo.

La diferencia radica en que ya no solo se tiene en cuenta la disponibilidad del almacén anterior a la máquina, si no que tenemos que tener en cuenta los Kanban de la siguiente máquina para elegir la producción, tal y como se puede ver en la imagen 6.11 que en esta ocasión representa a la máquina M2. En verde se

muestra el comentario de qué piezas se pueden coger y qué tanto por ciento corresponde a cada tipo de pieza en cada ocasión.

```
IF NParts (ReM2) > 0
  PULL from ReM2
ELSE
  IF NParts (M3Verde) < KanbanVerde(2) AND NParts (M2Verde) > 0
  IF NParts (M3Amarillo) < KanbanAmarillo(2) AND NParts (M2Amarillo) > 0
    IF NParts (M3Rojo) < KanbanRojo(2) AND NParts (M2Rojo) > 0
      !todos
      PERCENT M2Verde 70.00 ,M2Amarillo 20.00 ,M2Rojo 10.00
    ELSE
      !no rojo
      PERCENT M2Verde 77.78 ,M2Amarillo 22.22
    ENDIF
  ELSE
    !no amarillo
    IF NParts (M3Rojo) < KanbanRojo(2) AND NParts (M2Rojo) > 0
      PERCENT M2Verde 87.50 ,M2Rojo 12.50
    ELSE
      !solo verde
      PULL from M2Verde
    ENDIF
  ENDIF
ELSE
  IF NParts (M3Amarillo) < KanbanAmarillo(2) AND NParts (M2Amarillo) > 0
  IF NParts (M3Rojo) < KanbanRojo(2) AND NParts (M2Rojo) > 0
    !No verde
    PERCENT M2Amarillo 66.67 ,M2Rojo 33.33
  ELSE
    !solo Amarillo
    PULL from M2Amarillo
  ENDIF
  ELSE
    !solo Rojo
    IF NParts (M3Rojo) < KanbanRojo(2) AND NParts (M2Rojo) > 0
      PULL from M2Rojo
    ENDIF
  ENDIF
  !Ninguno
ENDIF
!
```

Imagen 6.11 Criterio selección de piezas

6.5.3 Primera etapa

La máquina M1 sigue teniendo un criterio especial a la hora de recoger piezas, puesto que esta máquina no tiene almacenes iniciales (sin contar con el almacén de reflujo ReDo1). En este caso sí se ve limitada su selección, debido a los Kanban que la unen con la máquina M2. Estas restricciones hacen que, por primera vez, se puedan ver tiempos de espera en esta máquina.

Se puede ver su criterio especial de selección de piezas en la imagen 6.12.

```

IF NParts (Redo1) > 0
  PULL from Redo1
ELSE
  IF NParts (M2Verde) < KanbanVerde(1)
    IF NParts (M2Amarillo) < KanbanAmarillo(1)
      IF NParts (M2Rojo) < KanbanRojo(1)
!todos
      PERCENT Verde out of WORLD 70.00 ,Amarillo out of WORLD 20.00 ,Rojo out of WORLD 10.00
      ELSE
!no rojo
      PERCENT Verde out of WORLD 77.78 ,Amarillo out of WORLD 22.22
      ENDIF
      ELSE
!no amarillo
      IF NParts (M2Rojo) < KanbanRojo(1)
        PERCENT Verde out of WORLD 87.50 ,Rojo out of WORLD 12.50
        ELSE
!solo verde
        PULL from Verde out of WORLD
        ENDIF
      ENDIF
      ELSE
      IF NParts (M2Amarillo) < KanbanAmarillo(1)
        IF NParts (M2Rojo) < KanbanRojo(1)
!No verde
        PERCENT Amarillo out of WORLD 66.67 ,Rojo out of WORLD 33.33
        ELSE
!solo Amarillo
        PULL from Amarillo out of WORLD
        ENDIF
        ELSE
!solo Rojo
        IF NParts (M2Rojo) < KanbanRojo(1)
          PULL from Rojo out of WORLD
          ENDIF
!Ninguno
        ENDIF
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF

```

Imagen 6.12 Criterio de selección M1

El resto de máquinas de esta etapa solo se ve afectado por el cambio de criterio que produce la introducción de los Kanban que se ve en el apartado 6.5.2.

6.5.4 Tercera etapa

Las máquinas M6 y M7 solo sufren el cambio de criterio ya explicado, pero para la máquina Test se ha tenido que añadir un nuevo vector de tres variables, llamado Intest (x). Lo que hace es controlar qué es lo que tiene la máquina Test dentro para hacer su producción sin superar los Kanban marcados por el usuario de ninguno de los tres colores de piezas.

Por lo que su criterio de selección (la pestaña FROM) tiene que tener en cuenta, en primer lugar, si tiene las cuatro piezas de reflujo disponibles. Si es así las coge

sin tener nada más en cuenta. Si no tiene esas cuatro piezas disponibles, empieza a mirar los almacenes Test, los almacenes QA y los “Kanban” color (10).

Como se ha venido estableciendo en toda la simulación se sigue utilizando el criterio 70 Verde, 20 Amarillo, 10 Rojo, pero para este escenario y esta máquina se han establecido unos nuevos límites que explicados para la pieza verde son: Para poder coger la pieza verde es necesario que el número de piezas verdes en el almacén QA, más el número de piezas de este color dentro de la máquina, sea menor que el KanbanVerde (10), y que, además, el número de piezas en TestVerde sea mayor que cero. (Esto puede parecer obvio, pero si no se incluye esta condición, la máquina se queda esperando a que llegue la pieza de este tipo en vez de coger otra distinta, aunque pudiera por los criterios).

En la imagen 6.13 se observa el procedimiento. Primero, valorando las piezas de reflujos, la variable cogervarios, como se ve en 5.15. Suma un valor cada vez que se coge una pieza de reflujos, y cuando suma cuatro, vuelve al valor cero. Después se observa cómo se hace la selección de piezas siempre que se pueda coger Verde (en Witness se puede ver el programa entero).

```
IF NParts (Retest) > 3
  PULL from Retest
ELSEIF cogervarios > 0
  PULL from Retest
ELSE
  IF NParts (QAVerde) + Intest(1) < KanbanVerde(10) AND NParts (TESTVerde) > 0
    IF NParts (QA Amarillo) + Intest(2) < KanbanAmarillo(10) AND NParts (TESTAmarillo) > 0
      IF NParts (QA Rojo) + Intest(3) < KanbanRojo(10) AND NParts (TESTRojo) > 0
!todos
        PERCENT TESTVerde 70.00 ,TESTAmarillo 20.00 ,TESTRojo 10.00
      ELSE
!no rojo
        PERCENT TESTVerde 77.78 ,TESTAmarillo 22.22
      ENDIF
    ELSE
!no amarillo
      IF NParts (QA Rojo) + Intest(3) < KanbanRojo(10) AND NParts (TESTRojo) > 0
        PERCENT TESTVerde 87.50 ,TESTRojo 12.50
      ELSE
!solo verde
        PULL from TESTVerde
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF
```

Imagen 6.13 Criterio selección Test

Después de haber seleccionado la pieza, analiza de qué tipo es. Si es de reflujos (estado 2 o 3) aumenta el valor de cogervarios. Si es de primera circulación (estado 0 o 1), añade al Intest del tipo correspondiente un valor, para que no se

llene la máquina por encima de los Kanban que es capaz de admitir el almacén como se muestra en la imagen 6.14.

```

IF Estado > 1
  cogervarios = cogervarios + 1
ELSE
  cogervarios = 0
ENDIF
IF cogervarios = 4
  cogervarios = 0
ENDIF
!
!
IF Estado < 2
  IF TYPE = Verde
    Intest(1) = Intest(1) + 1
  ENDIF
  IF TYPE = Amarillo
    Intest(2) = Intest(2) + 1
  ENDIF
  IF TYPE = Rojo
    Intest(3) = Intest(3) + 1
  ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

Imagen 6.14 Piezas dentro de Test

Tras esto, la máquina, al igual que el resto de los escenarios, añade su probabilidad de transformar las piezas de buenas a malas, y hace el vertido de las piezas a los almacenes correspondientes. Al hacer el vertido, resta al Intest el valor del tipo de pieza que sale, para así vaciar los Kanban de "en trabajo" y que pasen a contar como Kanban de "realizado" al estar en el almacén (solo para las piezas de primera circulación).

Capítulo 7: Experimentos

7.1 Introducción

Tras el diseño de los escenarios se va a proceder a la realización de su simulación con 20 semillas distintas. Para ello se van a correr las simulaciones primero 8 minutos que corresponde con el tiempo que se utiliza en las clases en las que se va a utilizar, y posteriormente se ejecutara con un tiempo de 2400 minutos que corresponde a una semana de trabajo con un solo turno de producción.

7.2 Tiempo de la formación

En las formaciones, el tiempo de simulación es de 8 minutos. Para este tiempo se ha trabajado con los datos de 20 simulaciones con distintas semillas para cada escenario, y así, poder comparar posteriormente los resultados obtenidos.

Para el análisis de los tiempos de las máquinas y trabajadores, no se ha mostrado el tiempo bloqueado, puesto que con 8 minutos de producción no hay tiempo suficiente para que ninguno alcance este estado.

7.2.1 Escenario 123S

Este escenario muestra cómo queda la fábrica tras los 8 minutos de trabajo, siguiendo las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario al poner en serie las máquinas M1 M2 M3.

En la tabla 7.1 se aprecia que, en contra de lo esperado, se ha empeorado la calidad a un 79,69%, y se ha mantenido la misma cantidad de piezas entregadas.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
123s	Verde	3,3	0,9	36	78,5714286	63,1578947
	Amarillo	1,5	0,25	19,5	85,7142857	26,3157895
	Rojo	0,5	0,2	11,95	71,4285714	10,5263158
	Total servido	5,3	1,35	67,45	79,6992481	
	No Servido	10,4				

Tabla 7.1. Piezas escenario 123Serie

En la tabla 7.2 se muestra la comparación entre el escenario 123S y el Nplus1 restando a los resultados de primero, los del segundo. En términos generales, se puede apreciar que los resultados obtenidos con este nuevo escenario son peores en todos los aspectos que los obtenidos en el escenario anterior.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	0,05	0,15	-0,25	-2,67857143
Amarillo	0,2	-0,15	-0,55	9,24369748
Rojo	-0,35	0,05	1,15	-13,5714286
Total servido	-0,1	0,05	0,35	-0,89776681
No Servido	0			

Tabla 7.2 Comparación piezas 123Serie contra NPLUS1

En la tabla 7.3 se puede observar que aumenta el tiempo que las máquinas están produciendo, y se disminuye el tiempo de esperas. También aumenta el tiempo de cambio de herramienta, debido, sobre todo, a que las máquinas M1, M2 y M3 triplican el número de piezas que trabajan cada una y, por lo tanto, tienen que aumentar también en un % similar el número de cambios de herramienta que hacen.

Con estos nuevos datos que se obtienen se sigue sin saber si el cuello de botella se encuentra en OLA o Test y, además, se ve que puede haber otro cuello de botella en M3, ya que la máquina REFLOW pasa a tener tiempos de espera que antes no tenía.

		ocupada	Libre	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
123S	M1	82,14648185	0	15,32226815	2,53125	34,35
	M2	82,29166665	0	15,20833335	2,5	32,45
	M3	82,02582805	0	15,47417195	2,5	31,35
	Reflow	72,80329	0,97161145	18,05800735	8,167091	33,75
	M4	85,5200118	0,2254488	11,5674628	2,6870766	18,85
	M5	87,4813425	0,28298235	9,37633395	2,8593412	16,25
	OLA	55,88541665	0	38,07291665	6,0416667	26,45
	M6	47,6686574	45,1542593	5,6770833	1,5	13,5
	M7	49,9171262	43,02037385	5,4687501	1,59375	12,7
	Test	100	0	0	0	16
	QA	29,85177795	70,14822205	0	0	19,7
	Media Fabricacion	74,57398211	8,965467575	13,42253276	3,03801755	23,565
	Media Total	70,50832719	14,52753616	12,20230251	2,761834136	23,21363636

Tabla 7.3 Máquinas escenario 123Serie

7.2.2 Escenario 12345S

Este escenario muestra cómo queda la fábrica tras minutos de funcionamiento siguiendo las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario, al poner en serie las dos primeras etapas.

En la tabla 7.4 se puede apreciar que el índice de calidad de la fábrica mejora hasta el 84,67%, y que se mejora el abastecimiento pasando de un 10,4 a 10,15 de piezas no servidas. Esto quiere decir que el cliente empieza a tener más piezas y de mayor de calidad. El cliente recibe de buena calidad más de 3,4 piezas por cada 10 que pide.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
12345s	Verde	3,8	0,55	35,5	87,3563218	63,5036496
	Amarillo	1,35	0,2	19,6	87,0967742	22,6277372
	Rojo	0,65	0,3	11,7	68,4210526	13,8686131
	Total servido	5,8	1,05	66,8	84,6715328	
	No Servido	10,15				

Tabla 7.4 Piezas escenario 12345Serie

En la tabla 7.5 aparece reflejada la comparación entre el escenario 12345S y el 123S con el mismo criterio de la anterior comparación, con la puesta en serie de la segunda etapa ya se obtiene una mejora respecto al sistema anterior, que es lo que se pretende con este cambio. Se incrementan las entregas de buena calidad y

se disminuyen las de mala, aumentando de esta manera la calidad y, además, reduciendo la no entrega.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	0,5	-0,35	-0,5	8,78489327
Amarillo	-0,15	-0,05	0,1	1,38248848
Rojo	0,15	0,1	-0,25	-3,0075188
Total servido	0,5	-0,3	-0,65	4,97228473
No Servido	-0,25			

Tabla 7.5 Comparación piezas 12345Serie contra 123Serie

En la tabla 7.6 se aprecia un nuevo incremento del tiempo de cambio de herramientas, debido al incremento de piezas trabajadas por las máquinas M4 y M5. Por otra parte, se observa que se disminuye el tiempo medio que pasan trabajando las máquinas de producción y se incrementa su tiempo de espera.

		ocupada	Libre	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
12345S	M1	81,80261765	0	15,69738235	2,5	34,05
	M2	81,7202094	0	15,7797906	2,5	32,5
	M3	81,0930905	0	16,4069095	2,5	31,25
	Reflow	72,6703936	1,1440836	18,0401846	8,1453379	33,6
	M4	66,21656475	10,1940144	21,6206709	1,96875	38,45
	M5	76,3388537	0	21,1611463	2,5	37,65
	OLA	63,94366315	0	29,4938369	6,56249995	20,2
	M6	36,81494665	57,17130625	4,763747	1,25	10,75
	M7	38,7862168	55,9221164	4,01041665	1,28125	10,15
	Test	100	0	0	0	16
	QA	29,39512045	70,60487955	0	0	19,7
	Media Fabricacion	69,93865562	12,44315207	14,69740848	2,920783785	26,46
	Media Total	66,2528797	17,73058184	13,36128044	2,655257986	25,84545455

Tabla 7.6 Máquinas escenario 12345Serie

Con estos nuevos datos obtenidos, se sigue sin saber si el cuello de botella se encuentra en OLA o Test; además, el posible cuello de botella de M3 deja de ser significativo, ya que la máquina REFLOW pasa a ser un cuello de botella respecto a la máquina M4.

7.2.3 Escenario 1234567S

Este escenario muestra cómo queda la fábrica siguiendo, durante 8 minutos de trabajo, las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario, al poner en serie toda la producción.

En la tabla 7.7 se aprecia una calidad del 86,71% y un nivel de No servicio del 9,85, lo que supone un nuevo incremento en la calidad percibida del cliente, puesto que, en este caso, recibe 3,6 piezas buenas por cada 10 que pide.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
1234567s	Verde	4	0,4	35,65	90,9090909	61,5384615
	Amarillo	1,45	0,15	19,45	90,625	22,3776224
	Rojo	0,75	0,4	11,55	65,2173913	16,0839161
	Total servido	6,2	0,95	66,65	86,7132867	
	No Servido	9,85				

Tabla 7.7 Piezas escenario 1234567Serie

La tabla 7.8 refleja la comparación del escenario 1234567S con el 12345S de la misma manera que anteriormente, y se observa que con la puesta en serie de la tercera etapa se mantiene la tendencia anterior de mejora en calidad y en entregas.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	0,2	-0,15	0,15	3,55276907
Amarillo	0,1	-0,05	-0,15	3,52822581
Rojo	0,1	0,1	-0,15	-3,20366133
Total servido	0,4	-0,1	-0,15	2,04175387
No Servido	-0,3			

Tabla 7.8 Comparación piezas 1234567Serie contra 12345Serie

En la Tabla 7.9 se aprecia un nuevo incremento del tiempo cambio de herramientas debido al incremento de piezas trabajadas por las máquinas M6 y

M7. Vuelve a disminuir el tiempo medio de producción y a aumentarse los tiempos de espera.

		ocupada	Libre	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
1234567S	M1	82,16471525	0	15,30403475	2,53125	34,45
	M2	81,83540375	0	15,66459625	2,5	32,6
	M3	81,32395795	0	16,17604205	2,5	31,3
	Reflow	72,14684975	0,96447795	18,7424902	8,14618185	33,4
	M4	65,2671717	11,1171963	21,6468821	1,96875	37,8
	M5	76,4037423	0,4250898	20,6711679	2,5	37,6
	OLA	65,1875004	0	28,02951785	6,7829817	20,7
	M6	29,9422275	60,65028605	8,48381785	0,9236687	21,25
	M7	35,40015085	51,81990265	11,5611966	1,21875	23,7
	Test	98,4412905	1,5587095	0	0	16
	QA	30,5783794	69,4216206	0	0	19,35
	Media Fabricacion	68,811301	12,65356623	15,62797456	2,907158225	28,88
	Media Total	65,33558085	17,81429844	14,2072496	2,642871114	28,01363636

Tabla 7.9 Máquinas escenario 1234567Serie

Con estos nuevos datos que se obtienen, se llega a las mismas conclusiones que en el anterior escenario, el cuello de botella puede ser entre las máquinas OLA y Test, y otro más pequeño en la máquina Reflow.

7.2.4 Escenario Kanban

Este escenario muestra cómo queda la fábrica tras una producción de 8 minutos siguiendo las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario, al poner en serie toda la producción y al cambiar el sistema de trabajo de Push a Pull.

En la tabla 7.10 se observa un índice de calidad del 85,31%, algo menor que el anterior, y un nivel de servicio idéntico, lo que lleva a una menor calidad percibida por el cliente, aunque muy poco significativa.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
Kanban	Verde	3,95	0,5	25,55	88,7640449	62,2377622
	Amarillo	1,4	0,15	16,75	90,3225806	21,6783217
	Rojo	0,75	0,4	10,7	65,2173913	16,0839161
	Total servido	6,1	1,05	53	85,3146853	
	No Servido	9,85				

Tabla 7.10 Piezas escenario Kanban

En la tabla 7.11 se aprecia la comparación del escenario Kanban con el 1234567S, observando un pequeño empeoramiento en la calidad de las entregas al cliente.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	-0,05	0,1	-10,1	-2,14504597
Amarillo	-0,05	0	-2,7	-0,30241935
Rojo	0	0	-0,85	0
Total servido	-0,1	0,1	-13,65	-1,3986014
No Servido	0			

Tabla 7.11 Comparación piezas Kanban contra 1234567Serie

En este escenario lo que hay que destacar es el decremento de WIP respecto al anterior escenario, puesto que esta es la ventaja que aporta el sistema Kanban: controlar y reducir el Lead Time y el WIP.

La tabla 7.12 refleja el equilibrado que se hace entre las piezas trabajadas por las distintas máquinas de la empresa, debido al sistema implantado. Al hacer este equilibrado, disminuye el tiempo que están trabajando las máquinas que producían más piezas y, por lo tanto, aumenta su tiempo libre. Al hacer menos piezas, las máquinas necesitan también menos cambios de herramientas y sufren menos averías.

		ocupada	Libre	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
Kanban	M1	47,71616705	40,5792745	10,23580815	1,46875	21,1
	M2	49,66769835	38,6694102	10,13164155	1,53125	20,95
	M3	51,66035735	36,5888816	10,1257609	1,625	20,95
	Reflow	45,12937295	40,18811005	9,99501695	4,68750025	20,85
	M4	34,830171	53,9356559	10,0154232	1,21875	21,2
	M5	40,42358885	48,73750815	9,6162472	1,22265575	21,15
	OLA	64,85318965	0	28,5353616	6,61144875	20,55
	M6	29,2206138	61,3161468	8,46323935	1	20,9
	M7	33,16720105	55,3186987	10,4203505	1,09375	22,35
	Test	98,4412905	1,5587095	0	0	16
	QA	29,99257375	70,00742625	0	0	19,25
	Media Fabricacion	49,51096506	37,68923954	10,75388494	2,045910475	20,6
	Media Total	47,73656585	40,62725651	9,776259036	1,859918614	20,47727273

Tabla 7.12 Máquinas escenario Kanban

El equilibrado es únicamente en producción, no es un equilibrado de cadena, ya que este segundo hace que se trabaje al mismo ritmo, sin tiempos de espera tan grandes.

Con estos datos se sigue viendo un cuello de botella en las máquinas OLA y Test, pero aún no se sabe con exactitud cuál de los dos es el que ralentiza todo el sistema. Al trabajar la máquina Test solo 16 piezas y la máquina OLA 20,55, se puede considerar que el cuello de botella principal es Test.

7.2.5 Conclusiones 8 minutos

Con 8 minutos de simulación los datos obtenidos no son muy significativos, debido a que no se llega a ver una producción completa del sistema. Esto es así ya que, inicialmente, los almacenes se encuentran casi vacíos y no hay tiempo suficiente para que el sistema alcance el estado de producción estacionario.

Además, la variabilidad tan alta debido a la aleatoriedad en un tiempo tan corto, hace que los resultados obtenidos en algunos de los escenarios no sean los esperados en relación al trabajo realizado.

Debido a esto se va a realizar el análisis con un tiempo de simulación mayor para obtener nuevos datos de análisis, esperando obtener unos resultados más relevantes y relacionados con los objetivos.

7.3 Tiempo de una semana de trabajo

El tiempo de una semana de trabajo se ha calculado como una empresa de ensamblaje que funciona con un único turno con una jornada de 8 horas los 5 días de la semana, lo que viene a ser un tiempo de simulación de 2400 minutos.

Para este nuevo tiempo de simulación se han mostrado los tiempos que las máquinas o trabajadores pasan bloqueados, puesto que ahora toman valores.

7.3.1 Escenario 123S

Este escenario muestra cómo queda la fábrica tras la semana de trabajo, siguiendo las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario, al poner en serie las máquinas M1 M2 M3.

En la tabla 7.13 se puede ver que el índice de calidad de la fábrica mejora hasta el 86,31%. A pesar de esta mejora, sigue sin ser capaz de abastecer más del 50% de la producción.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
123s	Verde	1710,75	270,55	4503,65	86,3448241	69,7984922
	Amarillo	499,4	79,95	1296,1	86,2000518	20,409709
	Rojo	239,95	38	638,2	86,3284763	9,79179877
	Total servido	2450,1	388,5	6437,95	86,3136758	
	No Servido	2698,45				

Tabla 7.13 Piezas escenario 123Serie

En la tabla 7.14 se aprecia la comparación entre el escenario 123S y el Nplus1. Con el paso de “en paralelo” a “en serie” de la primera etapa, se aumentan las piezas buenas entregadas y se disminuyen tanto las piezas malas entregadas como las piezas no entregadas. El lado negativo es que, al añadir nuevos almacenes intermedios, que se llenan hasta saturar, se incrementa también el Work In Process, lo que implica un mayor coste en la producción.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	115,65	-18,95	1988,75	1,70617399
Amarillo	33,35	-3,2	609,8	1,34025572
Rojo	19,7	-3,7	270,55	2,24754487
Total servido	168,7	-25,85	2869,1	1,68416634
No Servido	-142,85			

Tabla 7.14 Comparación piezas 123Serie frente a LKT

En la tabla 7.15 se observa que todas las máquinas de fabricación, excepto la máquina Test, están bloqueadas hasta el 63% de su tiempo, por lo que se puede considerar que el cuello de botella se encuentra ubicado en dicha máquina. Además, se puede ver que la máquina tiene un 100% de su tiempo ocupado, lo que confirma dicha hipótesis.

		ocupada	Libre	Bloqueada	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
123S	M1	81,25397575	0	0,1783923	16,0285694	2,53906255	10121,95
	M2	71,8845974	0	11,8055808	14,06357175	2,2462501	8749,85
	M3	61,3420859	0	25,32536165	11,4154921	1,9170605	7238,5
	Reflow	46,5389453	5,0282089	33,19742765	10,38688785	4,8485305	6516,45
	M4	45,34573565	3,52631245	44,6921879	5,01857645	1,4171875	3259,15
	M5	48,72553975	2,90554555	42,30047715	4,5458334	1,52260425	2841,6
	OLA	37,6514328	0	32,8616722	25,56502005	3,92187515	5421,65
	M6	24,8089982	7,94306335	62,7704385	3,70208345	0,77541665	2279,65
	M7	25,60486635	7,6416525	62,4719534	3,48142355	0,80010405	2209
	Test	100	0	0	0	0	5228,2
	QA	20,79225785	79,20774215	0	0	0	5232,05
	Media Fabricacion	54,31561771	2,704478275	31,56034916	9,4207458	1,998809125	5386,6
	Media Total	51,26803954	9,659320445	28,6912265	8,564314364	1,817099205	5372,55

Tabla 7.15 Máquinas escenario 123Serie

En la media de fabricación se observa que aumenta el tiempo medio que están las máquinas ocupadas, y disminuye el tiempo que están libres o bloqueadas. Esto podría indicar que ha mejorado el equilibrio de la cadena, pero no es así; sino que es debido a que los nuevos almacenes permiten a las máquinas M1, M2 y M3 fabricar más piezas y, así, disminuir su tiempo bloqueadas.

7.3.2 Escenario 12345S

Este escenario muestra cómo queda la fábrica, tras la semana de trabajo, siguiendo las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario, al poner en serie las dos primeras etapas.

En la tabla 7.16 se puede ver que el índice de calidad de la fábrica mejora hasta el 87,67%. Con esta mejora es capaz de abastecer poco más del 50% de la demanda.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
12345s	Verde	1811,65	257,7	4418,95	87,5468142	69,8196602
	Amarillo	530,55	72,45	1274,7	87,9850746	20,3451592
	Rojo	256,1	35,4	625	87,8559177	9,83518059
	Total servido	2598,3	365,55	6318,65	87,6663799	
	No Servido	2573,15				

Tabla 7.16 Piezas escenario 12345Serie

En la tabla 7.17 se observa la comparación entre el escenario 12345S y el 123S. Se ve que con el paso de “en paralelo” a “en serie” de la segunda etapa, aumentamos las piezas buenas entregadas y disminuimos, tanto las piezas malas entregadas, como las piezas no entregadas. En esta ocasión, al introducir los nuevos almacenes, no se aumenta el WIP, puesto que estos almacenes intermedios lo que permiten es recibir parte los productos semielaborados de las máquinas anteriores, permitiéndolas trabajar un mayor número de piezas. La reducción del WIP que se observa es debido al incremento de piezas entregadas. Si la simulación fuera más larga, estos almacenes también llegarían a saturar y aumentaría el WIP.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	100,9	-12,85	-84,7	1,20199011
Amarillo	31,15	-7,5	-21,4	1,78502284
Rojo	16,15	-2,6	-13,2	1,52744132
Total servido	148,2	-22,95	-119,3	1,35270412
No Servido	-125,3			

Tabla 7.17 Comparación piezas 12345Serie contra 123Serie

En la tabla 7.18 se observa que las máquinas M1 y M2 ya no se bloquean, puesto que su producción es absorbida por los nuevos almacenes. Como se explicó anteriormente, con un incremento del tiempo de simulación sí llegarían a bloquearse. El resto de las máquinas sí pasan hasta un 52% de su tiempo bloqueadas debido al cuello de botella, que sigue siendo el Test.

		ocupada	Libre	Bloqueada	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
12345S	M1	81,3632101	0	0	16,09417915	2,54261075	10164,55
	M2	81,5729405	0	0	15,8777549	2,54930465	9886,05
	M3	75,5262606	0	8,243015	13,87051625	2,3602083	8803,75
	Reflow	57,9783277	7,25903715	15,7594824	12,96287495	6,04027785	8119,15
	M4	40,96116715	18,0172341	28,14934175	11,59236105	1,2798958	7400
	M5	38,60777255	3,47430665	47,37484795	9,33682295	1,20625005	5948,65
	OLA	54,8924082	0	14,29004385	25,09914505	5,7184028	5285,7
	M6	25,6269654	17,4676964	52,27002565	3,834375	0,8009375	2353,4
	M7	26,4149184	16,9092547	52,2490561	3,60156245	0,82520825	2272,3
	Test	100	0	0	0	0	5228,2
	QA	21,38820475	78,61179525	0	0	0	5232
	Media Fabricacion	58,29439706	6,3127529	21,83358127	11,22695918	2,332309595	6546,175
	Media Total	54,93928867	12,88539311	19,84871025	10,20632652	2,12028145	6426,704545

Tabla 7.18 Maquinas escenario 12345Serie

En la media de fabricación se ve que aumenta el tiempo de fabricación y disminuye el tiempo de bloqueo. Esto es debido a que, con los nuevos almacenes, las máquinas M1 y M2 dejan de estar bloqueadas y pueden trabajar todo el tiempo de la simulación y, M3 y Reflow, siguen llegando a bloquearse, pero trabajan una mayor parte de su tiempo.

7.3.3 Escenario 1234567S

Este escenario muestra cómo queda la fábrica, tras la semana de trabajo, siguiendo las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario al poner en serie toda la producción.

En la tabla 7.19 se observa que el índice de calidad de la fábrica mejora hasta el 88,71%. Esta mejora permite que se siga mejorando poco a poco en el abastecimiento de la demanda.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
1234567s	Verde	1900,35	241,55	4340,9	88,7226294	69,8119357
	Amarillo	551,4	71,2	1253,1	88,5640861	20,2926893
	Rojo	270,1	33,5	612,15	88,9657444	9,89537499
	Total servido	2721,85	346,25	6206,15	88,7145139	
	No Servido	2468,95				

Tabla 7.19 Piezas escenario 1234567Serie

En la tabla 7.20 se puede ver la comparación del escenario 1234567S con el 12345S. Se observa que con el paso de “en paralelo” a “en serie” de la última etapa se sigue incrementando el número de piezas buenas entregadas, y se disminuye tanto el número de piezas malas entregadas, como el de piezas no entregadas. En esta ocasión, como en la anterior, no se incrementa el WIP al introducir los almacenes, puesto que absorben la producción de almacenes anteriores. De igual forma, se incrementaría al aumentarlo respecto a 12345S, si el tiempo de simulación fuera mayor.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	88,7	-16,15	-78,05	1,17581522
Amarillo	20,85	-1,25	-21,6	0,57901146
Rojo	14	-1,9	-12,85	1,10982673
Total servido	123,55	-19,3	-112,5	1,04813399
No Servido	-104,2			

Tabla 7.20 Comparación piezas 1234567Serie contra 12345Serie

En la tabla 7.21 se observa que se añaden las máquinas M3 y OLA a las máquinas M1 y M2, como máquinas que no se bloquean. M3 es debido a la tendencia de los almacenes siguientes de absorber su producción. El caso de OLA es diferente, puesto que tanto la máquina anterior se bloquea como la máquina siguiente tiene esperas (tanto...como...queda raro. Revisalo). Se puede deducir que esta máquina es un cuello de botella menor que el Test, pero que, al mejorar la máquina Test, la siguiente maquina sobre la que se deberá trabajar en ella sería esta.

		ocupada	Libre	Bloqueada	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
1234567S	M1	81,3401914	0	0	16,1177252	2,5420833	10186,6
	M2	81,55293355	0	0	15,8985653	2,5485012	9909,95
	M3	82,31706265	0	0	15,11058975	2,5723476	9549,65
	Reflow	64,1210574	7,87403205	7,0028578	14,32288615	6,67916665	8982
	M4	46,0045606	17,86308915	21,88398825	12,81054965	1,4378124	8251,45
	M5	44,6780118	3,4987699	39,77447165	10,6526041	1,3961426	6800,2
	OLA	63,9803206	0	0	29,3548125	6,66486695	6161,2
	M6	26,97488945	61,9204623	0,98923145	9,2723958	0,84302075	5903,3
	M7	20,50462665	19,4658736	52,4658969	6,922874	0,6407292	4438,05
	Test	99,99480435	0,00519565	0	0	0	5228
	QA	21,8946679	78,1053321	0	0	0	5231,85
	Media Fabricacion	61,14684585	11,06274227	12,21164461	13,04630025	2,532467065	7541,04
	Media Total	57,57846603	17,15752316	11,1014951	11,86027295	2,302242786	7331,113636

Tabla 7.21 Máquinas escenario 1234567Serie

En la media de fabricación se ve que aumenta el tiempo de fabricación y disminuye el tiempo de bloqueo. Esto es debido a que, con los nuevos almacenes, las máquinas M1, M2, M3 y Reflow dejan de estar bloqueadas y pueden trabajar todo el tiempo de la simulación.

7.3.4 Escenario Kanban

Este escenario muestra cómo queda la fábrica, tras la semana de trabajo, siguiendo las distribuciones generadas a partir de la modificación creada en este escenario, al poner en serie toda la producción y al cambiar el sistema de trabajo de Push a Pull.

En la tabla 7.22 se puede ver que el índice de calidad 88,66% se mantiene más o menos estable. Esto se debe a que el sistema Kanban no altera la calidad del sistema.

		Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad	% tipo
Kanban	Verde	1898,05	241,15	28,7	88,7270942	69,793315
	Amarillo	551,85	70,6	23,25	88,6577235	20,3079885
	Rojo	267,75	35,65	13,05	88,2498352	9,8986966
	Total servido	2717,65	347,4	65	88,665764	
	No Servido	2472				

Tabla 7.22 Piezas escenario Kanban

En la tabla 7.23 se observa la comparación del escenario Kanban con el 1234567S. Se aprecia un pequeño empeoramiento en las entregas al cliente, lo cual no se considera significativo, puesto que se trata de 3 unidades sobre más de 5500 lo que supone un 0,05%.

	Servicio buena calidad	Servido mala calidad	WIP	Calidad
Verde	-2,3	-0,4	-4312,2	0,0044648
Amarillo	0,45	-0,6	-1229,85	0,09363742
Rojo	-2,35	2,15	-599,1	-0,7159092
Total servido	-4,2	1,15	-6141,15	-0,04874985
No Servido	3,05			

Tabla 7.23 Comparación piezas Kanban contra 1234567Serie

Lo que sí hay que destacar son las 6141 piezas menos que hay en el sistema en WIP en los almacenes, lo que supone un grandísimo ahorro, tanto económico como de espacio, respecto al sistema anterior.

A diferencia del resto de escenarios, por mucho que aumente el tiempo de simulación, el WIP se mantendrá más o menos constante. Por lo que la mejora en él es real.

En la tabla 7.24 se observa que, en este caso, ninguna máquina está bloqueada. Esto se debe a que las máquinas esperan a que el almacén les solicite una pieza para empezar a fabricarla, por lo que, cuando terminan su producción, pueden entregarla a dicho almacén.

		ocupada	Libre	Bloqueada	Cambio de herramienta	Rota	Piezas trabajadas
Kanban	M1	28,19005345	64,83543265	0	6,09357645	0,88093745	4050,6
	M2	29,22446215	63,8041488	0	6,0581597	0,9132292	4050,5
	M3	30,5118652	62,50728255	0	6,02741445	0,95343745	4050,45
	Reflow	28,92978385	62,05389675	0	6,00347225	3,01284725	4050,5
	M4	20,71726885	72,54273105	0	6,09270825	0,64729175	4059,2
	M5	24,65367325	68,5228548	0	6,05295145	0,7705208	4059,2
	OLA	42,14808235	35,3828532	0	18,07837185	4,39069265	4058,15
	M6	16,7411957	76,9195682	0	5,8157986	0,5234375	3819,3
	M7	17,3454961	76,4555108	0	5,65659725	0,54239585	3817,45
	Test	99,99480435	0,00519565	0	0	0	5228
	QA	21,8523146	78,1476854	0	0	0	5231,55
	Media Fabricacion	33,84566853	58,30294745	0	6,587905025	1,26347899	4124,335
	Media Total	32,75536362	60,10701453	0	5,989004568	1,148617264	4224,990909

Tabla 7.24 Máquinas escenario Kanban

En este escenario se ve un mayor equilibrado de la cadena, puesto que todas las máquinas trabajan un número similar de piezas. Las variaciones son debidas únicamente al completado inicial de los Kanban y a las piezas de reflujo, que no pasan por todas las máquinas del sistema y no siguen el sistema Kanban. Este equilibrio es solo en cuanto a producción realizada, puesto que las máquinas tienen un gran desajuste en sus tiempos de ciclo. Esto se observa en todos los tiempos de espera de los que disponen.

Ahora, se puede ver y analizar correctamente el funcionamiento del sistema y sus oportunidades de mejora, puesto que se observa cuánto tiempo está cada máquina trabajando y cuánto está esperando a que le pidan una pieza.

Se aprecia con claridad que el cuello de botella es la Máquina Test, por lo que lo primero que se debe trabajar para llegar a cumplir con las peticiones del cliente, deberá ser que esta máquina mejore su funcionamiento.

Como se vio en el escenario 1234567S, la siguiente máquina que presenta un peor funcionamiento es OLA, puesto que su tiempo libre es de un 35%, mientras que las demás promedian un 65% de infrautilización. Hay margen de mejora antes de que OLA llegue a ser un cuello de botella.

Al trabajar menos tiempo, se reduce el número de averías y el tiempo que las máquinas pasan averiadas. Se podría trabajar en aplicar parte del tiempo disponible de la máquina en hacer mantenimiento preventivo y correctivo, y así disminuir aún más el número de roturas y el tiempo que pasan las máquinas averiadas. Se establece esta consideración puesto que el tiempo que pasan averiadas es un tiempo en el que se les está requiriendo una pieza, y, además, siempre es mayor el coste de reparación que el de mantenimiento.

Se reduce también el tiempo de cambio de herramienta porque, al hacer menos piezas, son necesarios menos cambios. Se puede trabajar en un SMED para reducir más dicho tiempo, esto es especialmente importante en la máquina OLA, puesto que su tiempo de cambio de herramienta es cercano la mitad de su tiempo de trabajo.

7.3.5 Conclusiones una semana

Al extender la simulación hasta los 2400 minutos se consigue que, en la mayoría de los escenarios, se llegue al estado de producción de la empresa en condiciones Estacionarias. Para los escenarios 12345S y 1234567S habría que extender aún más el tiempo, para llegar a saturar todos los almacenes y que se viera el funcionamiento en condiciones normales.

Con este nuevo tiempo de simulación la variabilidad se ve absorbida por la cantidad de productos que trabaja cada máquina, por lo que los resultados obtenidos de las simulaciones consiguen ser significativos y se ven alineados con los objetivos del trabajo.

Capítulo 8: Resultados

8.1 Resultados Esperados

8.1.1 Sistema productivo en serie

Los resultados esperados al pasar un sistema productivo de “en paralelo” a “en serie” son:

- ❖ Una mejora en la calidad. Debido a la especialización de los puestos, al realizar menos acciones en cada puesto de trabajo, se disminuyen los errores cometidos por los operarios.
- ❖ Disminución del Tack Time. Al repartir el tiempo que se realiza en cada pieza entre diferentes puestos de trabajo, se estructura la fabricación y se consigue un Tack time igual al tiempo de ciclo del cuello de botella.
- ❖ Disminución de la dispersión del tiempo de cada operación. Al realizar menos operaciones en cada pieza, el puesto de trabajo tiene menos componentes o distracciones que puedan llevar al operario a tener retrasos por confundirse al coger la pieza o herramienta.
- ❖ Incremento de la productividad. Al trabajar menos en cada pieza, cada puesto de trabajo puede trabajar en más piezas y aumentar su nivel productivo.

En conjunto, al convertir una fábrica en una cadena se espera aumentar la productividad, mejorar la calidad y estabilizar el proceso.

8.1.2 Sistema productivo con Kanban

Los resultados esperados al pasar de un sistema productivo de contra almacén a sistema Kanban son:

- ❖ Equilibrar la producción entre los diferentes puestos de trabajo, puesto que ahora, cada puesto de trabajo funciona bajo pedido de su cliente directo, que es el siguiente puesto de trabajo.
- ❖ Eliminar la sobreproducción. Los puestos de trabajo no producen el 100% de su capacidad, si no que producen lo justo para completar los Kanban con el siguiente puesto.
- ❖ Disminución del stock de la empresa y el ahorro económico que ello conlleva. Al limitar las piezas que produce cada puesto a lo que le solicita el siguiente, se evita tener grandes cantidades de stock delante del cuello de botella.
- ❖ Reducción del Lead Time. Al haber menos stock de piezas intermedias, el tiempo que pasa un producto dentro del proceso se reduce al acortar sus tiempos de espera. De esta manera, se mejoran los tiempos de entrega a cliente.

8.2 Resultados Obtenidos

8.2.1 Sistema productivo en serie

Esto se ha realizado al pasar del escenario Nplus1 al 1234567S:

- ❖ Se ha observado un incremento en el nivel de servicio y en la calidad percibida por el cliente, puesto que se han entregado más piezas y de mayor calidad.
- ❖ Las máquinas han aumentado su productividad, puesto que han pasado de hacer 3492 piezas de media a 7541, más del doble de media.

- ❖ A pesar de este incremento en la producción de las máquinas, la mejora percibida por el cliente es mucho menor.
- ❖ Sigue existiendo un gran problema en la calidad, puesto que de las 5228 piezas que ha trabajado la máquina, sólo han llegado al cliente final 2721 piezas en buen estado.
- ❖ Los tiempos de cambio de herramienta han aumentado. Al trabajar más piezas cada máquina, y tener que cambiar las herramientas para trabajar sobre piezas distintas, se aumenta el número de cambios de herramienta, lo que provoca un incremento de este tiempo, a pesar de que el tiempo de cambio de herramienta unitario se ha reducido, puesto que se necesitan menos herramientas en cada puesto.
- ❖ Se han liberado algunas máquinas de su bloqueo debido, principalmente, a la inclusión de nuevos almacenes capaces de recoger la producción generada.

8.2.2 Sistema productivo con Kanban

Este cambio de sistema se ha producido al pasar del escenario 1234567S al escenario Kanban.

- ❖ Se ha reducido el WIP de 6206 a 65 productos. Esto supone un ahorro económico muy importante. A esto hay que añadir que el escenario 1234567s no ha llegado a ser estable y saturar los almacenes, por lo que, cuando esto suceda, el ahorro en WIP y económico será aún mayor.
- ❖ Se ha empeorado la calidad percibida por el cliente, puesto que recibe menos piezas y más defectuosas. Sin embargo, esto no ha sido significativo y puede ser consecuencia de la aleatoriedad de la simulación.

- ❖ Se ha reducido el lead time desde un promedio de 810 minutos hasta uno de 50 minutos. Esto supone una mejora del 94% analizando la situación en una semana de simulación, que, al igual que ocurre con el WIP, en el escenario anterior al Kanban el lead time aún no ha alcanzado el punto estable y seguirá creciendo.
- ❖ Al haber equilibrado la producción por el sistema kanban, se ha eliminado el bloqueo de los almacenes y las máquinas y se puede determinar realmente cuál es el cuello de botella que corresponde a la máquina Test que no dispone apenas de tiempo libre, (dispone de un tiempo libre inicial al principio de la simulación debido al llenado de los almacenes).

8.3 Explicación de la diferencia entre objetivo y resultado

El incremento de entrega y calidad obtenidos son menores de lo esperado, puesto que se ha trabajado sobre unos puestos que, inicialmente, no estaban saturados y se ha mejorado su funcionamiento. Esto ha supuesto una mejora en calidad en dichos puestos y una disminución del tiempo de transformación que sufren las piezas. Esta mejora de calidad en estos puestos hace que disminuyan las piezas defectuosas que circulan por el sistema y que el puesto QA hace volver a pasar por el proceso productivo.

Como todas las piezas defectuosas que detecta QA, vuelven al proceso productivo, a las etapas en las que han sido producidos dichos fallos, y después de ser tratados en su etapa, se dirigen a la máquina Test. Una reducción en el tanto por ciento de los productos defectuosos permite a esta máquina tratar una mayor cantidad de productos por primera vez, que puedan llegar al puesto QA.

Al mejorar la calidad del sistema productivo, el puesto QA recibe una mayor proporción de piezas de buena calidad que pasan el control y llegan a la

expedición, lo que hace que la calidad percibida por el cliente mejore sin que el puesto QA haya mejorado realmente.

Conclusiones y líneas futuras

Conclusiones

Se ha recreado con éxito la aplicación didáctica LKT con la herramienta Witness. Su validación con el modelo NPLUS1 en paralelo se ha considerado exitosa debido a que los resultados percibidos por el cliente son muy similares entre LKT y NPLUS1 en paralelo. Este resultado se obtiene gracias a que se contrarrestan los efectos de una calidad obtenida muy superior a la planteada en LKT, con unos tiempos de trabajo por parte los alumnos bastante más lentos que los predefinidos para la herramienta.

Se han desarrollado correctamente los nuevos escenarios en los que se transforma el sistema productivo en paralelo gradualmente a un sistema productivo en serie. Los resultados obtenidos por este cambio no han sido tan positivos como se esperaba, puesto que el sistema productivo cuenta con un cuello de botella que limita la producción ubicado en una máquina distinta a sobre las que se ha trabajado.

La introducción del Modelo controlado con Kanban se puede considerar un éxito puesto que los resultados obtenidos son exactamente los mismos que los deseados al hacer esta mejora. Estos son una reducción drástica del WIP y del Lead Time asociado a él.

Los cambios son más significativos cuando se llega al modelo estacionario que trabajando solo en los tiempos de ejecución de la clase.

Líneas futuras

La mejora aportada por el paso del sistema productivo por talleres a “en serie” o “en línea”, se vería mucho mejor reflejada si se realizara sobre un taller donde el cuello de botella se encontraría sobre las máquinas de las cuales se va a cambiar su sistema de fabricación, puesto que, como se ha visto en la Teoría de las restricciones, hay que centrar los esfuerzos de mejora en el cuello de botella.

Este cambio se puede realizar mejorando las condiciones de la máquina Test o empeorando las condiciones de los puestos M. En mi opinión sería preferible mejorar el tiempo de ciclo de la máquina Test, puesto que en las clases este puesto es realizado por una tableta bastante tediosa y monótona, debido a la falta de reto que supone llevarla.

Después de la máquina Test, el siguiente cuello de botella que se aparece es la máquina OLA. Su cuello de botella es causado por el gran tiempo de cambio de herramienta que sufre esta máquina. Para mejorar esto hay que aplicarle una metodología SMED. Se ha considerado que, para que en la clase se observe la mejora que esta herramienta supone, se puede introducir en el programa que los cambios de herramienta se realicen de manera manual por los alumnos en la tableta, en vez de tener que dar a un único botón y esperar que a que se realice el cambio.

Esto podría llevarse a cabo con un menú de cambio en el que los alumnos vayan escogiendo las herramientas que son necesarias para realizar la producción; la plantilla, las distintas piezas que hay que montar o los tiempos de cocción que necesita cada base.

La mejora aportada por el SMED puede ser que, en el primer escenario, el cambio se tenga que hacer pieza a pieza, y que, tras una primera aplicación del SMED, el cambio se haga seleccionando unos packs necesarios para la base que se va a realizar, y, de esta forma, una segunda aplicación de esta herramienta permita que las piezas que son iguales entre las distintas bases tengan un lugar fijo que no necesite ser cambiado al cambiar de tipo de pieza. Con esto se conseguiría

reducir los tiempos que necesitan emplear los alumnos en hacer los cambios de herramienta.

Tras estas dos mejoras aportadas al proceso se pasará al cambio de sistema productivo en serie. Siguiendo el criterio del TOC se deberá trabajar sobre el cuello de botella que tenga el proceso, por lo que convendrá observar cuál es la etapa cuyas máquinas M suponen un cuello de botella y cambiar esos puestos al nuevo sistema. Este paso se realizará en tres fases: una por etapa. Los alumnos deben poder escoger qué etapa se transforma primero, y sería interesante también que puedan elegir cómo hacer el equilibrado de los nuevos puestos de trabajo para repartir las cargas.

Una vez acabado el cambio de sistema productivo se pasa a introducir el sistema Pull síncrono con el cliente mediante Kanban. La teoría señala que el cambio de una fábrica al sistema Pull debe hacerse desde el cliente hacia el proveedor, sin embargo, en la clase se puede introducir el sistema Kanban entero de una sola vez. Para que la mejora aportada por el Kanban se vea efectiva desde un principio, lo ideal sería que el llenado inicial de los almacenes se haga hasta completar los Kanban que se decidan poner en los puestos, por lo que la producción empezaría una vez el cliente haga su primer pedido. Como el cliente hace su primer pedido después de un tiempo de espera, se puede hacer este llenado inicial completo solo hasta el puesto QA, y que, después de dicho puesto, solo haya una pieza de cada tipo para asegurar el primer suministro.

Al realizar estos escenarios en las clases, se estaría mostrando a los alumnos la importancia del TOC; el sistema se mejora desde su eslabón más débil, del SMED; un cambio de herramienta rápido y bien preparado permite mejorar la productividad y la calidad. Se mostraría también la ventaja que supone el sistema productivo en cadena y las ventajas de los sistemas Pull, ya que no se realiza sobreproducción y se mejora el conocimiento del propio sistema.

Bibliografía

- Álvarez, M. (2014). *Amfe*. Recuperado el Octubre de 2018, de <http://www.amfe.es/>
- 7Grauns. (Julio de 2016). *significados.com*. Recuperado el Abril de 2019, de <https://www.significados.com/kanban/>
- Calle, J. (2018). *BSgrupo*. Recuperado el Octubre de 2018, de <https://bsgrupo.com/bs-campus/blog/Los-8-Pilares-del-TPM-1134>
- Cardenal, Y. Y. (9 de Marzo de 2018). *Me as Engineer*. Recuperado el 10 de Mayo de 2019, de <http://blog.yassergarcia.com/2018/03/09/software-para-simulacion-por-computadora-simnet/>
- Castro, G. (8 de Noviembre de 2016). *Wordpress*. Recuperado el Septiembre de 2018, de <https://productivate.wordpress.com/2016/11/08/herramienta-5s-detalle-de-cada-una-de-las-s/>
- Cobos. (22 de Abril de 2010). *Inteligencia_art*. Recuperado el 3 de Octubre de 2018, de [ttp://equipo6simula.obolog.es/simulador-taylor-ii-565594](http://equipo6simula.obolog.es/simulador-taylor-ii-565594)
- CPMformación. (2018). Recuperado el Septiembre de 2018, de <https://www.cpmformaciongmp.com/que-es-lean-manufacturing/>
- Educación 3.0. (19 de Julio de 2018). *Educaciontrespuntocero*. Recuperado el 6 de Mayo de 2019, de <https://www.educaciontrespuntocero.com>

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

García, B. F. (s.f.). *Clarcat*. Recuperado el 2 de Octubre de 2018, de <https://www.clarcat.com/arena/>

García, E. (10 de Noviembre de 2016). *EQUIPOALTRAN*. Recuperado el Septiembre de 2018, de <http://equipo.altran.es/el-ciclo-de-deming-la-gestion-y-mejora-de-procesos/>

Garzas, J. (Noviembre de 2011). *javiergarzas.com*. Recuperado el Abril de 2019, de <https://www.javiergarzas.com/2011/11/kanban.html>

IMTI. (2018). *IMTI*. Recuperado el Octubre de 2018, de https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjvnpnJyPvdAhUHbBoKHeOhBsMQjh6BAgBEAM&url=https%3A%2F%2Fslideplayer.es%2Fslide%2F8903129%2F&psig=AOvVaw3_Uli0zmhtM43MKxSyjo8U&ust=1539250359121830

Lean Kata. (s.f.). *Lean Kata*. Recuperado el 13 de Mayo de 2019, de <http://www.leankata.es>

LeanManufacturing10. (2018). *LeanManufacturing10*. Recuperado el Octubre de 2018, de <https://leanmanufacturing10.com/toc>

Liptzis, L. V. (13 de Agosto de 2007). *ActionGroup*. Recuperado el Octubre de 2018, de <http://www.actiongroup.com.ar/el-tpm-en-las-areas-administrativas/>

Lorenzo, C. M. (SF). *Diccionario Empresarial*. Recuperado el 01 de Octubre de 2018, de http://diccionarioempresarial.wolterskluwer.es/Content/Documento.aspx?params=H4sIAAAAAAAAAEAMtMSbF1jTAAASNTc2NTtbLUouLM_DxbIwMDS0NDQ3OQQGZapUt-ckhlQaptWmJOcSoAJmb5qzUAAAA=WKE

- López, B. S. (2016). *Ingeniería Industrial Online*. Recuperado el Septiembre de 2018, de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/gestion-y-control-de-calidad/metodologia-de-las-5s/>
- López, B. S. (2016). *IngenieríaIndustrialOnline*. Recuperado el Octubre de 2018, de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/lean-manufacturing/mantenimiento-productivo-total-tpm/>
- López, C. (11 de Octubre de 2001). *Gestiopolis*. Recuperado el Septiembre de 2018, de <https://www.gestiopolis.com/5s-seiri-seiton-seiso-seiketsu-y-shitsuke-base-de-la-mejora-continua/>
- Martín, J. (4 de Diciembre de 2017). *Cerem*. Recuperado el Octubre de 2018, de <https://www.cerem.es/blog/conoce-tus-fallos-con-un-amfe>
- Miguel, J. (27 de Noviembre de 2013). *Altacunda*. Recuperado el Septiembre de 2018, de <https://altacuncta.wordpress.com/2013/11/27/7-consejos-para-hacer-pdca-o-pdsa-y-obtener-beneficios/>
- Perez, J. J. (2015). *Cefire*. Recuperado el Octubre de 2018, de <http://cefire.edu.gva.es/course/view.php?id=11396§ion=4>
- Promodel. (s.f.). *Promodel*. Recuperado el 5 de Octubre de 2018, de <http://promodel.com.mx/promodel/>
- Ramirez, G. (20 de Febrero de 2014). *softwaresdesimulacion.blogspot.com*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2018, de <http://softwaresdesimulacion.blogspot.com/2014/02/softwares-de-simulacion.html>
- Rother, M. (2017). *Toyota Kata: El método que ayudó a miles de empresas a optimizar la gestión de sus negocios*. Barcelona: PROFIT Editorial.

Diseño, modelado y construcción de una réplica de exploración de escenarios de la aplicación didáctica LKT

Tarifa, E. E. (s.f.). *Teoría de Modelos y Simulación*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2018, de https://www.econ.unicen.edu.ar/attachments/1051_TecnicasIISimulacion.pdf

Universidad de Valladolid (UVA). (s.f.). *Manual básico de Witness*. Valladolid.

Vico, A. (s.f.). *Be Fullness*. Recuperado el 9 de mayo de 2019, de <https://befullness.com/que-es-el-coaching/>