



## **CAPITULO 4: HIPÓTESIS, MODELADO Y DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN**

### **4.1. Introducción**

En el presente capítulo se define es el modelo teórico considerado y cuáles son las hipótesis establecidas.

Posteriormente, se profundiza en la elección de los factores que influyen en el desempeño del sistema. Así como, de los posibles valores de los factores que afectan al modelo, para que se contemplen los escenarios de interés al objeto del estudio. En base a ello, se determina el número de experimentos total que se ha de realizar.

Además, se expone el modelo en Arena, en el cual se han realizado las simulaciones.

Por último se presenta, cómo se han determinado los parámetros del horizonte de simulación y número de réplicas, antes de comenzar a realizar las simulaciones. Y cómo se han realizado la batería de experimentos considerada, a partir de la herramienta de optimización Optquest de Arena.

### **4.2. El modelo teórico y las hipótesis**

Una línea de producción, se puede definir, como el conjunto de elementos mecánicos, humanos y de control dispuestos de forma que se hacen posibles, los procesos necesarios para transformar una materia prima inicial en un producto final. El estudio de una línea de fabricación, requiere de una simplificación de las variables que la definen. La línea que se considera en el presente proyecto, se presenta como la disposición de un cierto número de estaciones, dónde se realizarán las operaciones correspondientes, que suponen un tiempo determinado al conjunto. Cada una de ellas, excepto la primera, estará precedida por un buffer ó almacén intermedio. En ellos las piezas se retienen a la espera de su procesado en la siguiente estación. La línea termina con el abastecimiento a otra línea, empresa ó cliente.

Por tanto, esta línea, en caso de que su producto sea diseñado para continuar su elaboración, formará parte de un sistema situado en el entorno de una línea mayor.

El control de la producción en una línea de fabricación, consiste en el ajuste de los parámetros que la definen, para la consecución de unos objetivos concretos.

Los experimentos realizados, se han diseñado con el objetivo de analizar el funcionamiento de los sistemas de control de la producción Kanban y Conwip simples, en una línea de fabricación ante escenarios en los que existe reprocesado. Además, de estudiar el comportamiento de los sistemas, en el caso de la existencia de fallos en las máquinas, con o sin reprocesado.

Se han modelado cinco estaciones de trabajo, el número ha sido escogido observando los estudios previos realizados, por ser un número ni muy elevado ni muy reducido.

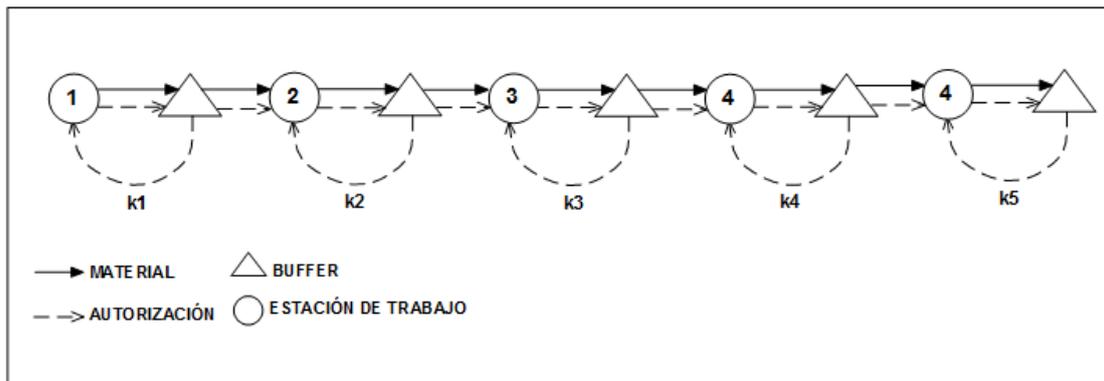


Figura 31. Sistema Kanban simple sin reprocesado

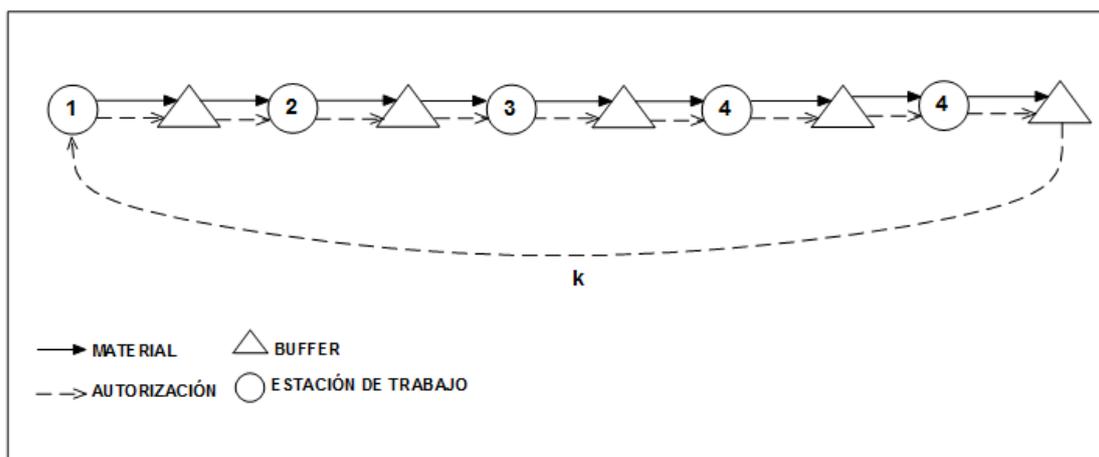


Figura 32. Sistema Conwip simple sin reprocesado

Además de que la mayor parte de los estudios de reprocesado solo se han centrado en la aplicación de una máquina [58] [59] [60], aunque existen algunas aplicaciones de tres máquinas [28].

Se ha considerado que la línea está equilibrada respecto a los tiempos de proceso. Este equilibrio se ve alterado por la consideración de la existencia de fenómenos adversos, como son la aparición de fallos en la máquina que inducen la parada de la misma y la necesidad de un reprocesado de las piezas.

En concreto el reprocesado se considera en la estación central (estación 3). De este modo, será modelada, para representar los casos reales en los que pueda existir un determinado porcentaje de piezas defectuosas y por tanto que hay reprocesar de nuevo en la estación. Los niveles de reprocesado, se estudian de acuerdo a un parámetro denominado PR. Se ha establecido, que podrá tomar los valores de  $PR: \{0\%, 4\%, 8\%\}$ .

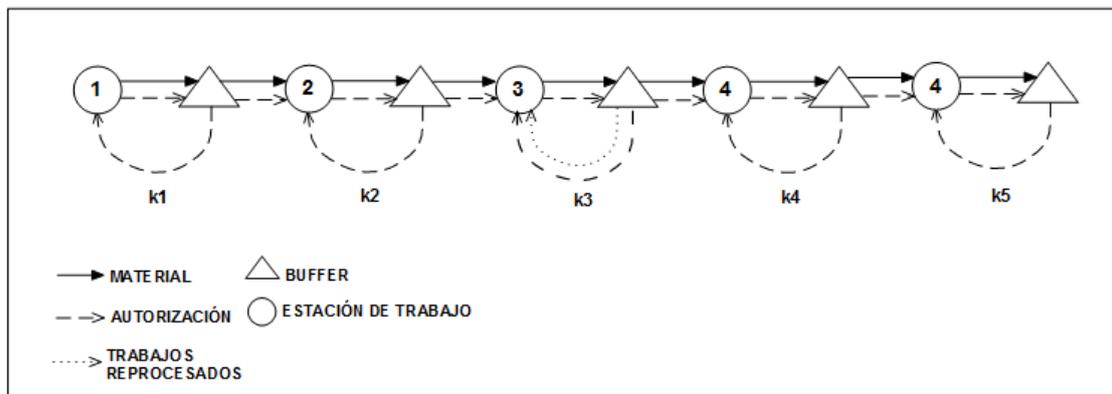


Figura 33. Sistema Kanban bajo reprocesado

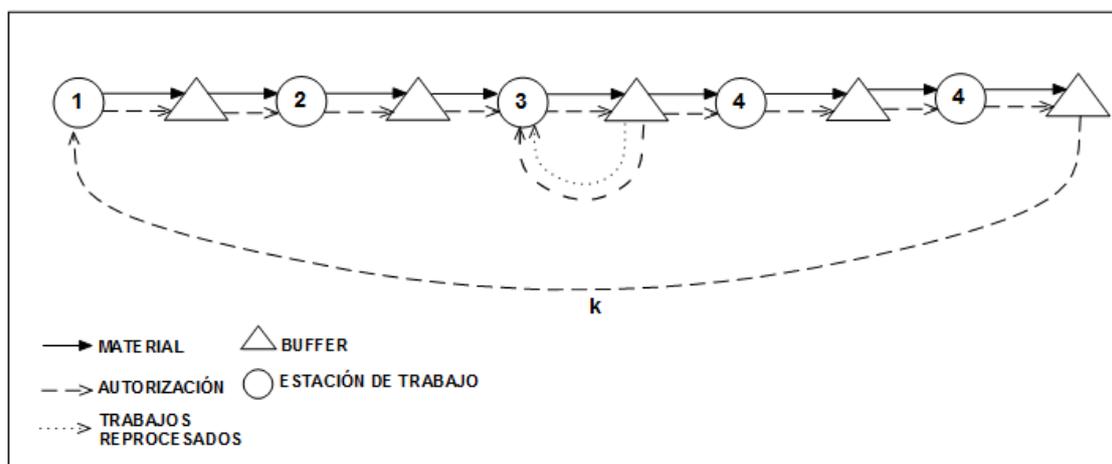


Figura 34. Sistema Conwip bajo reprocesado

Además, se considera el caso de que la máquina falle y haya que repararla antes de continuar con la producción. Se considera la existencia de dos tipos de fallo (A y B), en función del tiempo medio de aparición del fallo en la máquina (MBTF) y del tiempo de reparación de la misma (MTTR).

En el modelo del presente proyecto, el fallo de la máquina, se considera en la estación central (estación 3). Por tanto, esta estación de trabajo será el cuello de botella de la línea de producción.

Por otra parte, se considera el tiempo de proceso no determinista, para acercar el modelo a un sistema cercano a la realidad. En este aspecto, se han considerado situaciones diferentes respecto a la variación de los tiempos de proceso. De esta forma, se amplía la gama de situaciones analizadas en el estudio.

En la experimentación realizada, se han considerado diversos coeficientes de variación (cv). Según Hopp y Spearman [20], los sistemas con un cv cercanos a cero son habituales en sistemas altamente automatizados. Mientras que los sistemas con un coeficiente de variación mayor que la unidad suelen ser poco realistas. Por tanto, para abordar todas las posibles situaciones, se han estudiado diferentes niveles de dispersión para varios valores de cv,  $cv: \{0.1, 0.5, 0.9\}$ .

El tiempo de proceso de la estación  $i$  ( $p_i$ ) se genera, para un determinado cv, de acuerdo a una distribución gamma  $\Gamma(k, \theta)$ , partiendo de un valor medio del tiempo de proceso



$\bar{p}_i$ . Los parámetros de una distribución Gamma, es decir, el factor de escala ( $k$ ) y el factor de escala ( $\theta$ ) se determinan en función de los parámetros  $cv$  y  $\bar{p}_i$ . Por tanto, el

tiempo de proceso de la estación  $i$ ,  $p_i$ , se genera de acuerdo a una distribución  $\Gamma(1/cv^2, cv^2 * \bar{p}_i)$ .

El valor inicial considerado para  $\bar{p}_i$  será el igual para todas las estaciones, puesto que el sistema bajo estudio, se considera inicialmente equilibrado. En valor que se considera inicialmente es  $\bar{p}_i = 3, \forall i = 1, \dots, 5$ .

Para comparar los sistemas Kanban y Conwip ante las mismas situaciones se ha decidido establecer dos tasas de salida mínimas de salida.

Se compararán los sistemas en base al TH y al WIP obtenido.

En el siguiente apartado se describen con mayor detalle, cada una de las variables a las que se asignará un determinado valor, así como sus posibles valores y se determina el número de experimentos a realizar.

### 4.3. Variables y número de experimentos

Las variables que se consideran, para realizar los experimentos son:

- Tipo de sistema. Kanban ó Conwip.
- Throughput mínimo (THmin).

El Throughput, se define como la capacidad del proceso. La capacidad es una declaración de la tasa de producción, se mide como la salida del proceso por unidad de tiempo. [61]

$$TH = \frac{\text{Tasa salida de piezas}}{t}$$

En el presente proyecto, se compararán ambos sistemas bajo unas condiciones de TH mínimo del 80% y 70%.

- Disponibilidad de las máquinas (D). Es uno de los tres factores necesarios para determinar la Eficiencia General de los Equipos, Overall Equipment Effectiveness (OEE).

$$OEE = \text{Disponibilidad} * \text{Rendimiento} * \text{Calidad}$$

La disponibilidad mide las pérdidas de disponibilidad del equipo debido a paradas no programadas.

$$D = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo neto disponible}} \times 100$$



Siendo:

$$(t_{operativo} = t_{neto\ disponible} - t_{paradas\ de\ línea}),$$

el tiempo operativo es el tiempo que la máquina está produciendo y

$$(t_{neto\ disponible} = t_{extra} + t_{total\ programado} + t_{paro\ permitido}) [62]$$

el tiempo neto disponible, el tiempo que la máquina podría haber estado produciendo.

La disponibilidad, dependerá en primer término de la existencia de fallos ó no en el sistema.

Se estudiará el caso de la inexistencia de fallos, donde la disponibilidad de las máquinas es del 100%. En el caso de existencia de fallos en las máquinas, el valor de la disponibilidad dependerá del tiempo medio entre fallos (MTBF) y del tiempo medio de reparación (MTTR).

La disponibilidad a partir de estas dos variables se define como:

$$Disponibilidad = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF}$$

Los patrones de averías que se han considerado son:

<b>PATRÓN DE AVERÍAS</b>	<b>Tipo A</b>	MTBF	100 min.
		MTTR	11,11 min.
	<b>Tipo B</b>	MTBF	1000 min.
		MTTR	111,11 min.

Tabla 11. Patrones de averías consideradas en el modelo

Las unidades de tiempo que se van a considerar para el desarrollo del modelo son los minutos.

- Porcentaje de reprocesado (PR). Se refiere al número de piezas que habrán de ser reprocesadas por defectos en su fabricación. Para la experimentación, se ha considerado la no necesidad de reprocesado PR=0% y la necesidad de reprocesar un 4% o un 8% de las piezas fabricadas. Estos porcentajes son inferiores a un 10%, ya que en la realidad no suelen superar este valor.
- Coeficiente de variación (cv). Es un parámetro para estimar el efecto de la variabilidad en la corriente y en los tiempos de proceso efectivos. Tomará valores entre 0 y 1. A medida que disminuimos este coeficiente, el escenario será más determinista. Sin embargo si lo aumentamos su comportamiento, se puede representar mediante una distribución exponencial. Este ratio se representa mediante la desviación estándar



dividida entre la media. Se ha determinado que sistemas con un coeficiente de variación cercano a cero son habituales en sistemas con un alto nivel de automatización [20].

$$cv = \frac{\sigma}{\mu}$$

Para abordar la mayor cantidad de situaciones posibles se, se han estudiado diferentes niveles de dispersión, para los valores del coeficiente de variación  $cv = \{0.1, 0.5, 0.9\}$ .

Por otra parte, resulta interesante explicar con algo más de profundidad la distribución escogida para generar el tiempo de proceso.

La distribución Gamma es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros  $k$  y  $\theta$ .

Una variable aleatoria Gamma,  $X$ , supone valores en la mitad positiva de la curva  $S = [0, \infty)$ . La distribución Gamma se denota por  $\Gamma(k, \theta)$ , donde  $k > 0$  es el factor de forma y  $\theta > 0$  es el factor de escala.

La función de densidad es de la siguiente forma:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{k-1} * e^{-\frac{x}{\theta}}}{\theta^k * \Gamma(k)} & \text{para } x > 0. \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Donde  $\Gamma$  es la función Gamma:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} y^{k-1} * e^{-y} * dy$$

Las correspondientes medias y varianzas se dan por las fórmulas:

$$E[X] = \mu = k * \theta$$

$$V[X] = \sigma^2 = k * \theta^2$$

Sabiendo que:

$$cv = \frac{\sigma}{\mu}$$

Se sustituyen los valores de las ecuaciones anteriores y se tiene:

$$cv = \frac{\sqrt{k * \theta^2}}{k * \theta} = \frac{\sqrt{k} * \theta}{k * \theta} = \frac{\sqrt{k}}{k}$$

Para hallar el valor de los parámetros  $k$  en función de  $cv$ , es necesario despejar  $k$  de la anterior ecuación. Para ello elevan ambos términos de la igualdad al cuadrado.



$$cv^2 = \frac{k}{k^2} = \frac{k}{k * k} = \frac{1}{k}$$

Si se despeja k, se tiene:

$$k = \frac{1}{cv^2}$$

El factor de escala  $\theta$ , se calcula teniendo en cuenta que el tiempo medio de proceso para la estación i será  $\bar{p}_i = \mu$ . Luego:

$$\bar{p}_i = \mu = k * \theta$$

Sabiendo el valor de k en función de cv se sustituye en la anterior ecuación y se despeja  $\theta$ .

$$\bar{p}_i = \frac{1}{cv^2} * \theta$$

$$\theta = cv^2 * \bar{p}_i$$

De este modo, como se comentó al comienzo del apartado 3.1., el tiempo de proceso de la estación i,  $p_i$ , se genera de acuerdo a una distribución  $\Gamma(1/cv^2, cv^2 * \bar{p}_i)$ .

Es necesario destacar en el presente proyecto, ya que se ha hecho uso de la herramienta específica Arena v.12 para realizar las simulaciones, que en este programa los parámetros están en orden inverso [63].

En la tabla 12, se presenta un resumen de los parámetros que intervienen en el experimento y los valores que pueden tomar.

Parámetro	Niveles		
Sistema	Conwip	Kanban	
TH min (%)	70	80	
Disponibilidad de las máquinas (%)	100	90_tipoA	90_tipoB
PR (%)	0	4	8
cv	0,1	0,5	0,9

Tabla 12. Parámetros que intervienen en los experimentos

El diseño experimental llevado a cabo es un diseño factorial completo, ya que el número total de combinaciones no es demasiado alto para su procesamiento. Es decir, se van a considerar todas las posibles combinaciones de factores a sus distintos niveles. Esto equivale al producto del número de niveles de cada uno de los factores respetivamente. La ventaja de este tipo de diseño, es que se evalúan todas las posibilidades.

El número total de experimentos a realizar con k factores, en los que cada iésimo factor dispusiera de  $m_i$  niveles, viene dado por la siguiente expresión [42]:



$$n = \prod_{i=1}^k m_i$$

En el modelo del presente proyecto, existen dos posibilidades para el tipo de sistema y dentro de cada uno, dos posibilidades para cada TH. Lo que significa que existen dos factores con dos niveles.

Por otra parte, dentro de cada nivel anterior, existen tres posibilidades de disponibilidad y dentro de cada una tres posibilidades para el porcentaje de reprocesado y a su vez, tres posibilidades para cada coeficiente de variación propuesto. Lo que suponen tres factores, con tres niveles cada uno. Por tanto, el número total de experimentos será de:

$$N^{\circ} \text{experimentos} = 2 * 2 * 2 * 3 * 3 * 3 = 2^2 * 3^3 = 108 \text{ experimentos.}$$

De los cuales, 54 escenarios de optimización corresponden a cada uno de los sistemas estudiados.

#### 4.4. Modelado en Arena v.12

Para la simulación se ha empleado un único modelo en Arena para ambos sistemas. Mediante la selección del valor de la variable sistema, el modelo servirá para simular tanto el sistema Kanban como el Conwip.

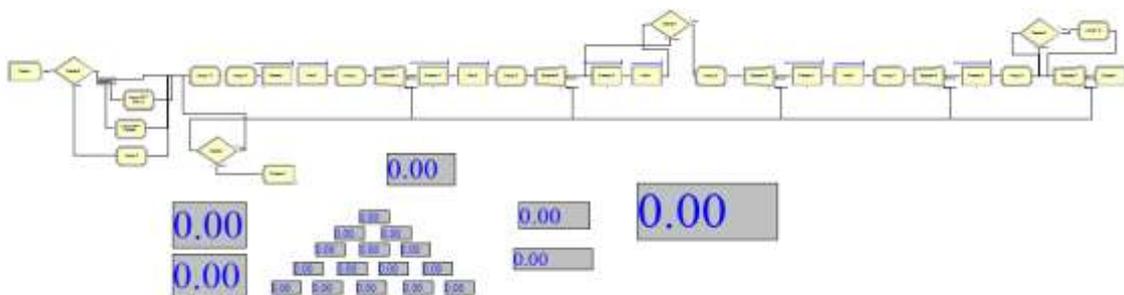


Figura 35. Modelo Arena empleado en la simulación de los sistemas Kanban y Conwip.

Los recuadros que aparecen en la parte inferior del modelo, se pueden crear a partir del botón Variable, de la barra de herramientas Animate. Y controlan la evolución de distintas variables seleccionadas durante la simulación.

A continuación se explica, por partes, el funcionamiento del modelo empleado para la realización de las simulaciones.

Es necesario aclarar que se explicará el funcionamiento del modelo en relación a la construcción en Arena, considerando que el modelo que se ha empleado se empleará para simular los sistemas Kanban y Conwip simple. Las variables relacionadas con las tarjetas del sistema que intervienen serán:  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$ ,  $K_{44}$ ,  $K_{55}$  y  $K_{15}$ .



Por ello las condiciones impuestas con las variables relativas al número de tarjetas  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$ ,  $K_{44}$  y  $K_{55}$  en los almacenes intermedios y la asignación de valores a estas variables en los módulos Assign, corresponden únicamente al funcionamiento del sistema Kanban y no intervendrán mientras se simule el sistema Conwip. En el caso del sistema Conwip,  $K_{15}$  es la única variable relativa al número de tarjetas que interviene en su funcionamiento.

En la siguiente figura, se representa la primera parte del modelo, cuyo cometido será la creación de entidades, en este caso tarjetas, y la elección del tipo de sistema que se desea simular.

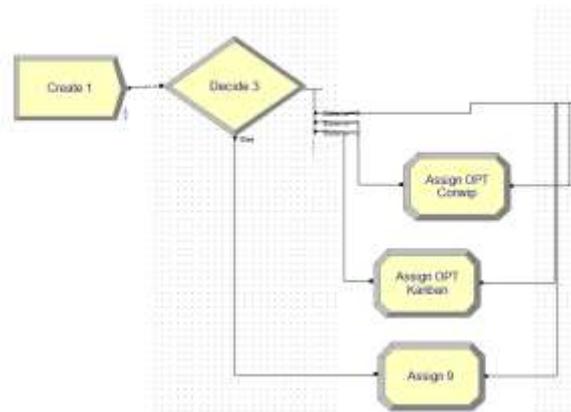


Figura 36. Modelo de simulación I

Los valores de los parámetros tomados en el módulo Create, se presentan en la siguiente figura.

Figura 37. Ventana módulo Create

En este modelo, se supone que se crea una entidad, que es la que circulará por todo el sistema simulando el funcionamiento de las tarjetas y que se irá duplicando en los módulos Separate.



En el módulo Decide, en función del valor que se le asigne a la variable Sistema, se deriva la entidad por un camino u otro. El valor de los datos introducidos en el primer módulo decide, Decide 3, son los siguientes:

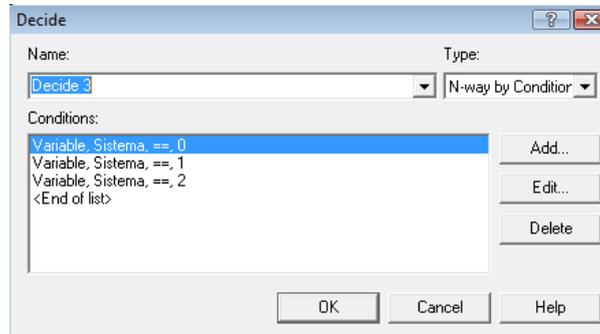


Figura 38. Ventana módulo Decide 3

El tipo de condición que se ha seleccionado es de N-way by Condition. Es decir, existen varias salidas en función de si se cumple o no una condición. En este caso, si la variable Sistema es igual a 1, el sistema que se implementa es el sistema Conwip y si Sistema es igual a 2 el sistema que se implementa es Kanban. Cada salida del módulo decide estará dirigida al Assign correspondiente, que determinará el funcionamiento del sistema a simular.

En el caso que se está estudiando, solo sería necesario utilizar dos módulos Assign tras este primer módulo Decide, ya que sólo se van a estudiar el sistema Kanban y Conwip simple.

En el módulo Assign la asignación de las variables, se realiza pulsando el botón Add y especificando en la ventana correspondiente el tipo de variable, el nombre y el valor. A lo largo de todo el modelo, las variables que se van a definir serán Type=Variable.

El módulo Assign Opt Conwip, contiene las variables del sistema correspondientes al número de tarjetas. A estas variables se les asigna un valor inicial N. Excepto a la variable  $K_{15}$ . El valor de N que se asignará en el módulo de datos Variable del menú Basic Process. N será lo suficientemente alto, para que las variables que tomen este valor no intervengan en el proceso. El valor que se asignó a N fue de 100.

De este modo la única variable significativa será  $K_{15}$ , la cual dominará el funcionamiento del sistema. Esto se corresponde con la característica de no limitar el tamaño de los buffers individuales que posee el sistema Conwip.

En el caso de Assign Opt Kanban, las variables  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$ ,  $K_{44}$  y  $K_{55}$  son las que no toman un valor inicial N. Ya que estas serán las variables que determinen el funcionamiento del sistema.

Para este modelo, para el sistema Kanban, es como si existiera una tarjeta entre estaciones de trabajo que autoriza al material para ser arrastrado de la estación aguas arriba a la estación aguas abajo del proceso productivo, para su procesado y posterior entrega al buffer de la siguiente estación. Por ejemplo la tarjeta  $K_{11}$  autorizaría a la



materia prima necesaria para el procesado en la estación 1, enviando una orden en la cola anterior a la estación 1, autorizando el procesado en la estación 1 y la entrega en la estación 2.

La siguiente figura corresponde a la primera estación de trabajo del modelo.

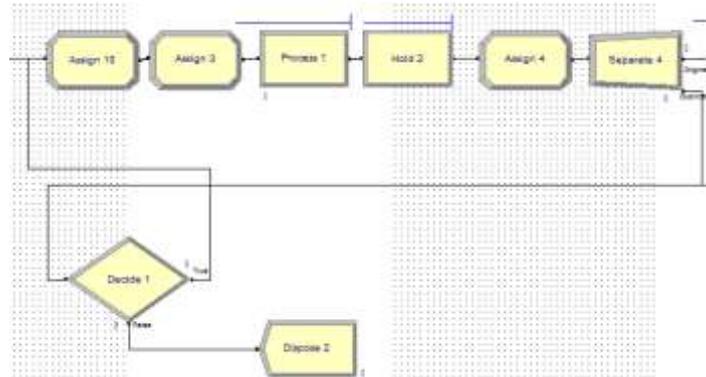


Figura 39. Modelo de simulación II

El módulo Assign10, se definen otras variables y se le asignan valores a las mismas.

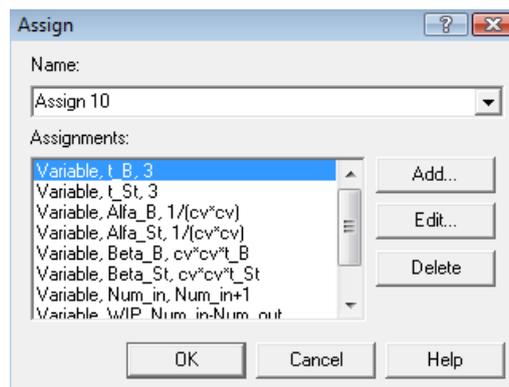


Figura 40. Ventana módulo Assign 10

Las variables  $t_B$  y  $t_{St}$  corresponden al tiempo del cuello de botella y de la estación de trabajo respectivamente. Se les asigna un valor de 3. Las variables Alfa y Beta corresponden a los parámetros de la distribución Gamma que sigue el tiempo de proceso. Alfa\_B, corresponde al parámetro alfa de la distribución gamma en el caso de existir reprocesado. El parámetro Beta\_B, el parámetro beta en el mismo caso anterior. Mientras las variables Alfa\_St y Beta\_St, corresponden a los parámetros alfa y beta respectivamente, en el caso de no considerar el reprocesado.

Por otra parte la variable Num\_in, supone el número de entidades que entran al proceso, en este caso se suma 1 ya que actúa como contador del número de unidades.



Por último, la variable WIP ó tiempo de proceso, cuyo valor es la diferencia entre el número de entidades que entran al proceso y el número de entidades que salen.

El módulo Assign10 está conectado a Assign3, en el que se definen una serie de variables. La variable WIP\_ave se refiere al valor medio del work in process. El valor que se le asigna a esta variable es el de DAVG (WIP Value). La función DAVG graba la media de la expresión del Dstat (tiempo continuo), del principio al fin de la aplicación. Y WIP value es la variable cuyo valor es el del WIP obtenido. Por otra parte se asignan los valores de  $K_{15}=K_{15}-1$  y  $K_{11}=K_{11}-1$ .

El módulo Process 1, representa la estación de trabajo primera de la línea de producción que se está estudiando.

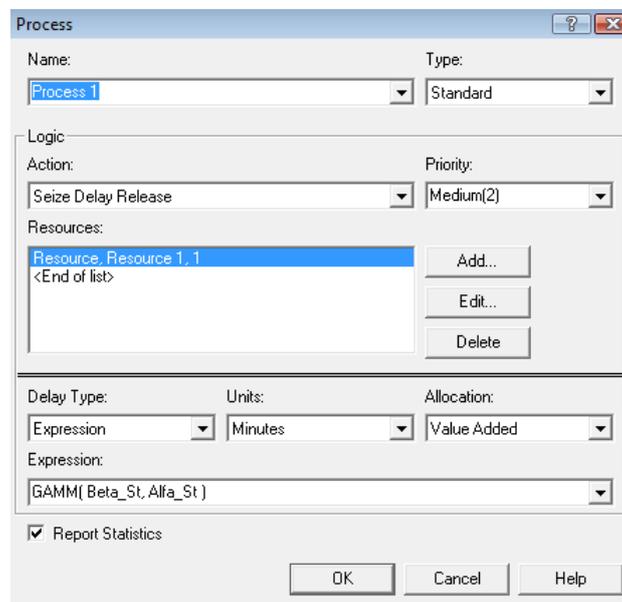


Figura 41. Ventana módulo Process

La lógica de la acción que se ha escogido es Seize Delay Release. Esto significa que Seize Delay Release indica que se asignará un recurso seguido por un retardo y luego, se liberará el recurso reservado.

La prioridad que se asignará a todas los módulos Process será Medium.

El recurso utilizado para procesar la entidad recibe el nombre de Resource 1 y el número de recursos es 1. Para cada uno de los siguientes módulos Process, se define un recurso diferente. Que se denominarán Resource 2, Resource 3, Resource 4 y Resource5.

La distribución de probabilidad escogida para generar el tiempo de proceso, se introduce en el campo Expression. En este caso sigue una distribución gamma con parámetros Beta\_St y Alfa\_St. Los valores de estas variables se mantienen para todos los Process menos para Process 3.



El módulo Hold, mantiene el artículo en espera antes de pasar a la siguiente estación de trabajo. En este módulo espera la entidad hasta que se cumple una condición. En el caso del módulo Hold 2 la condición es que  $K_{22} > 0$ .

El módulo Assign, contiene una serie de variables a las que se les asignan unos valores. En el caso de Assign 4, lo que ocurre es que se suma uno al valor de  $K_{11}$  y se resta uno a  $K_{22}$ .

El siguiente módulo es Separate 4, que replica la entidad entrante en múltiples entidades. La opción Duplicate original, toma la entidad original y realiza un número de copias. En este caso, el número de réplicas que se hace es de uno.

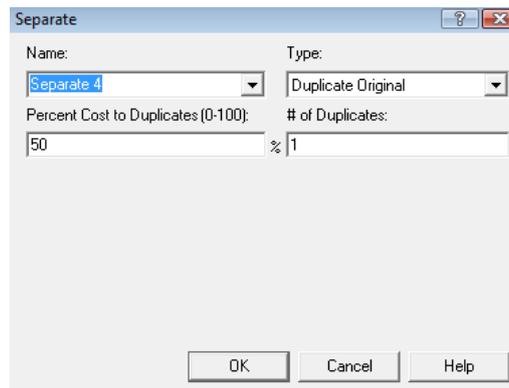


Figura 42. Ventana módulo Separate

Posteriormente la entidad duplicada llega al módulo Decide 1 donde se determinará, si la entidad termina su recorrido en el sistema o vuelve de nuevo al inicio de la primera estación de trabajo.

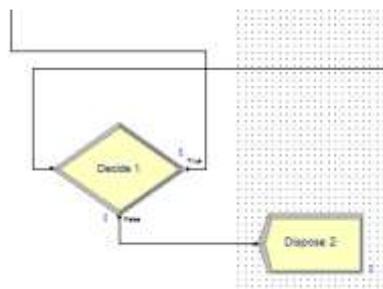


Figura 43. Bucle Decide

Esto se implementa en el módulo Decide, considerando que si  $K_{11}$  es mayor que cero, entonces el camino que toma es el de verdadero y de nuevo pasa al módulo Assign10, volviendo al bucle. Si la condición no se cumple finaliza el recorrido de la entidad en el modelo de simulación. Para el sistema Conwip, si  $K_{15}$  es mayor que cero, entonces la entidad volvería de nuevo a la línea y si no finalizaría en Dispose 2. Por tanto, se elige la opción de 2-way by Condition, que supone dos caminos uno verdadero y uno falso dependiendo del valor de una condición. El valor de la expresión de la condición que se introduce en el módulo Decide 1 es  $K_{11} * K_{15} > 0$ .

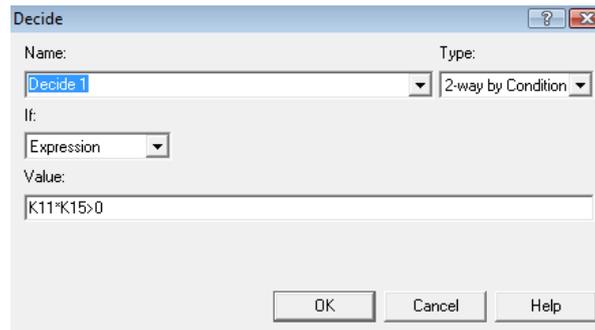


Figura 44. Ventana módulo Decide 1

La entidad origen de la que se duplicó, continúa circulando por la línea de producción hacia la siguiente estación de trabajo, que se pueden observar en la siguiente figura.

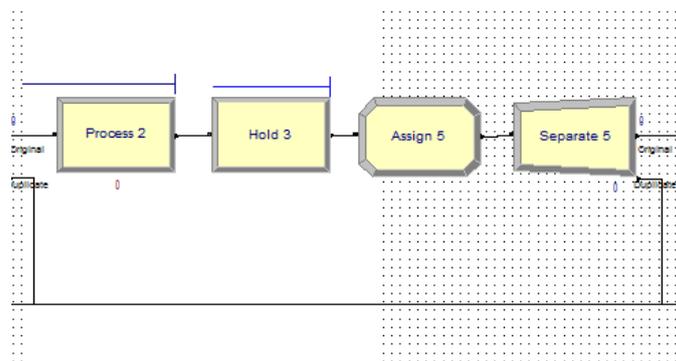


Figura 45. Modelo de simulación III

En funcionamiento del modelo para la segunda estación de trabajo es similar al de la primera. Simplemente el Hold3, la condición que se debe cumplir para que se liberen las entidades de la cola es que  $K_{33} > 0$ . Una vez se cumpla esta condición, se sumará una unidad a  $K_{22}$  y se restará una unidad a  $K_{33}$  en el módulo Assign5. En Separate se vuelve a realizar la misma operación de duplicado de la entidad que en la estación anterior. Y la entidad duplicada pasará por el módulo Decide 1 para abandonar o de nuevo volver al sistema.

En caso de la tercera estación, es un caso particular, donde se va a considerar la existencia de posibles fallos en la máquina y un determinado porcentaje de reprocesado.

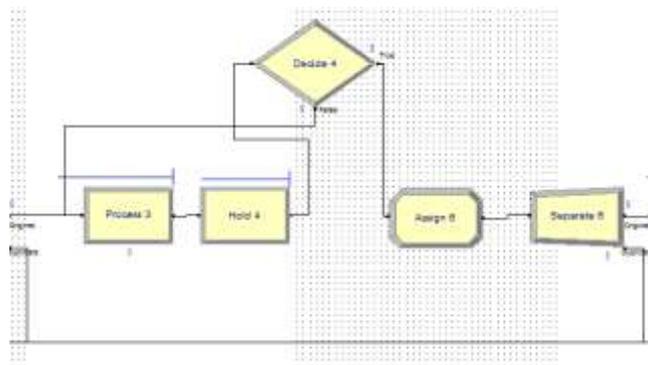


Figura 46. Modelo de simulación IV



Los módulos Process 3 y Hold 4 funcionan de forma análoga a las anteriores estaciones. La diferencia en el módulo de Process 3, reside en que la distribución que determina los tiempos de proceso, es una distribución gamma pero de parámetros Alfa\_B y Beta\_B. Y la condición en Hold 4 para que se liberen las entidades es que  $K_{44} > 0$ .

Detrás del módulo Hold4, se encuentra el módulo Decide 4, cuyo objetivo es el de modelar la posible existencia de piezas que sea necesario reprocesar. Cuando una entidad llega a este módulo, seguirá un camino u otro dependiendo de que se cumpla

una determinada condición. Un determinado porcentaje de entidades habrá de salir de este módulo por la rama True y una vez se cumpla este porcentaje, la siguiente entidad pasaría de nuevo al inicio de la estación de trabajo para ser reprocesada. El porcentaje que se ha de cumplir es de  $100 - p_R$ , siendo  $p_R$  el porcentaje de reprocesado considerado.

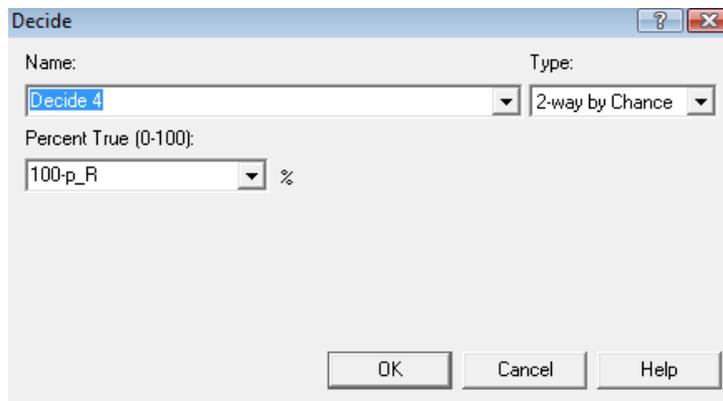


Figura 47. Ventana módulo Decide 4

En el caso de necesitar que el modelo represente la existencia de fallos en la máquina, habrá que modificarlo respecto al original. El modelado de fallos se realiza en la estación 3. Para llevarlo a cabo se siguen los siguientes pasos:

1º Se selecciona Advanced Process>Failure y se crea un nuevo fallo, haciendo doble clic sobre el espacio en blanco de la ventana de la vista de hoja de cálculo.

Failure - Advanced Process							
	Name	Type	Up Time	Up Time Units	Down Time	Down Time Units	Uptime in this State only
1	Failure 1	Time	EXPO(t_fallos)	Minutes	EXPO(t_repara)	Minutes	

Double-click here to add a new row.

Figura 48. Modelar un fallo en Arena I

El fallo aparecerá transcurrido un periodo de tiempo. El tiempo normal de operación o Uptime sigue una distribución exponencial, cuyo parámetro principal es la tasa de fallos. Por otra parte, el tiempo de reparación de la máquina se determina por una distribución exponencial, con parámetro el tiempo de reparación.

2º Seleccionar en el panel Basic Process>Resource. Se selecciona en el campo de Failures del recurso 3, correspondiente a la estación 3 la regla de fallo correspondiente. Se ha considerado como la adecuada la regla de Preempt. De este modo, comienza el



tiempo de baja o downtime suspendiendo el recurso inmediatamente después de la llegada del fallo, cuando se termina downtime se continuará con el procesado de esa entidad.

Resource - Basic Process									
	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics
1	Resource 2	Fixed Capacity	1	0	0	0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Resource 3	Fixed Capacity	1	0	0	0		1 rows	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Resource 4	Fixed Capacity	1	0	0	0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Resource 5	Fixed Capacity	1	0	0	0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Resource 1	Fixed Capacity	1	0	0	0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

Failures	
Failure Name	Failure Rule
1. Failure 1	Preempt

Double-click here to add a new row.

Figura 49. Modelar un fallo en Arena II

En módulo siguiente es Assign 6, el cual asigna los valores de  $K_{33}=K_{33}+1$  y  $K_{44}=K_{44}-1$ . A continuación el módulo Separate 6 que realiza la misma función que los anteriores módulos Separate.

En la figura siguiente se observa cómo se ha modelado la cuarta estación de trabajo. Presenta una estructura similar a las dos primeras. Los módulos que se han empleado son similares. Sólo variarán los valores que se les ha asignado a las variables en módulo Assign y la condición de permanencia en la cola dentro de Hold 5. En este caso, en Assign 7,  $K_{44}=K_{44}+1$  y  $K_{55}=K_{55}-1$ . Por otra parte en Hold 5 la condición de permanencia será que  $K_{55}>0$ .

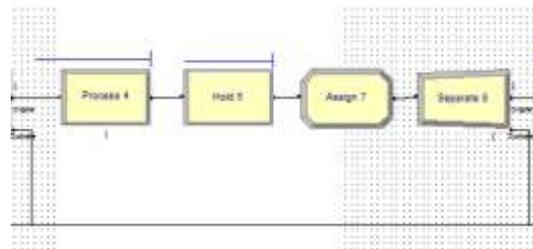


Figura 50. Modelo de simulación V

La quinta estación de trabajo se presenta en la siguiente figura.

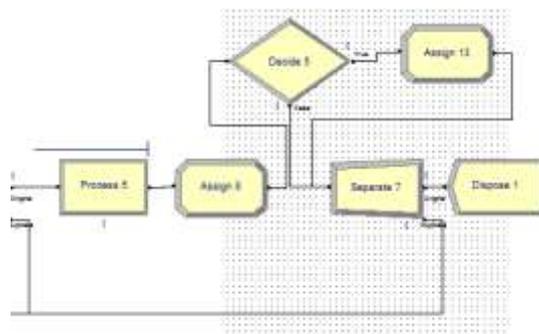


Figura 51. Modelo de simulación VI



En esta estación se pretende registrar el valor de la tasa de salida de las piezas.

El módulo Assign 8, funciona de manera similar a los anteriores, pero los valores asignados para las variables de las tarjetas en este caso son de  $K_{55}=K_{55}+1$  y  $K_{15}=K_{15}+1$ . Además al ser la última estación de trabajo, se han de definir dos variables nuevas. La variable Num\_out que representa el número de piezas que salen del sistema. A esta variable se le asigna un valor  $Num\_out=Num\_out+1$  al pasar por este punto del modelo. La otra variable es WIP, work in process, que será la diferencia entre el número de unidades que entran y las que salen. Esto queda expresado en el módulo Assign 8 como  $WIP = Num_{in} - Num_{out}$ .

En el módulo Decide 5, se define la condición de  $TNOW > 1$ . TNOW es el tiempo de la simulación actual. Es una función, que permite grabar el valor real del tiempo, grabado a medida que progresa la simulación. Mientras que el tiempo de simulación sea mayor que 1 entonces se asignará un valor de TH, en base a TNOW y WIP. Este valor se le asigna en el módulo Assign 13. En él se define la variable TH y se asigna un valor que se determina mediante una simple regla de tres. La tasa de salida que se asignó es de 1/3, 1 pieza cada 3 unidades de tiempo, lo que correspondería a un TH de un 100%. Si la tasa salida fuese de  $\frac{Num\_out}{TNOW}$  el TH alcanzado es de un x%.

De este modo:

$$x = \frac{\frac{Num\_out}{TNOW} * 100}{\frac{1}{3}} = 300 * \frac{Num\_out}{TNOW}$$

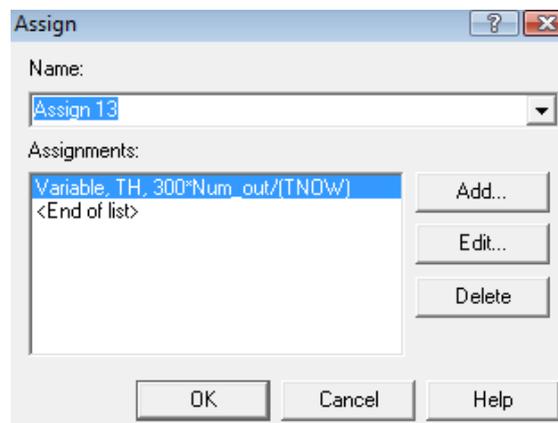


Figura 52. Ventana módulo Assign 13

A continuación el módulo Decide 5 si la condición es falsa y el módulo Assign 13 derivan en el módulo Separate 7. De nuevo este módulo duplica la entidad original. La entidad original termina su recorrido en Dispose 1. La réplica, continuará hasta Decide 1, donde si cumple la condición entrará de nuevo en el bucle y si no abandonará el sistema en el módulo Dispose 2. Éste último recorrido toma sentido para el sistema Conwip.



#### 4.5. Determinación de los parámetros de simulación

Como se explicó en el apartado 1.1.2 y 1.1.3, los sistemas Kanban y Conwip ejercen el control del flujo de piezas mediante tarjetas. El sistema Conwip sólo necesita definir,  $k$ , el número de tarjetas a emplear en el sistema global, realizando el control de manera conjunta. Sin embargo, el sistema Kanban realiza el control individual en cada estación y necesita definir un número de tarjetas para cada estación, siendo el parámetro de control, un vector  $\bar{k}: \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ , siendo  $n$  el número de estaciones en la línea.

Además el funcionamiento de ambos sistemas varía dependiendo del número de tarjetas asignado al sistema. Para comparar de forma exhaustiva el funcionamiento de los dos sistemas, se hace necesario explorar todas las posibles soluciones. En el caso de Conwip el espacio de soluciones será  $N_{\max}$ , número de tarjetas máximo. Mientras que en el caso de Kanban, para un sistema con  $n$  estaciones de trabajo, el espacio de soluciones será  $n^{N_{\max}}$ .

Debido a que el espacio de simulaciones del sistema Kanban es muy elevado, se hace necesario determinar un número de réplicas y horizonte de simulación razonable. De este modo, se asegura, que los resultados de la experimentación tengan la suficiente fiabilidad y a la vez se optimiza el tiempo de simulación.

Por tanto, parece conveniente emplear un método de optimización. Por ello, antes de comenzar a realizar las simulaciones, se van a determinar los parámetros óptimos necesarios para la simulación: el horizonte temporal ( $H$ ) y el número de réplicas ( $N$ ). En este apartado se describe el modo en que se han determinado éstos parámetros.

Se ha decidido realizar el análisis previo, mediante el uso de las herramientas Arena v.12 y el paquete Optquest perteneciente al mismo software.

Como criterio inicial no se considera el tiempo de calentamiento. Pero el efecto del transitorio si se tiene en cuenta, escogiendo un valor del horizonte de simulación mayor al obtenido.

La metodología de determinación, consta de dos fases:

- A. Determinar el horizonte de simulación ( $H$ ).
- B. Conocido  $H$ , determinar el número de réplicas ( $N$ ).

Antes de comenzar, se ha seleccionado una batería de posibles escenarios, dentro de los que se utilizarán para las simulaciones del proyecto. Este conjunto de escenarios en deberán abarcar, las situaciones más desfavorables de cada sistema, con la finalidad de obtener unos parámetros que sean fiables en todas las posibles configuraciones de los escenarios del proyecto.

La batería consta de 3 configuraciones posibles para cada uno de los sistemas, en este caso, Kanban y Conwip. Lo que supone 6 escenarios de simulación.

Las tres configuraciones, para cada sistema, son las siguientes:



ESCENARIO	DISPONIBILIDAD	THmin (%)	cv	pR(%)
1	100	80	0.9	8
2	80_TipoA (MTBF=100;MTTR=11,11)	80	0.9	8
3	80_Tipo B (MTBF=1000;MTTR=111,11)	80	0.9	8

Tabla 13. Determinación parámetros simulación. Configuraciones sistemas

Conwip, se comporta de manera más desfavorable, para Throughput elevado con coeficiente de variación elevado y porcentaje de reprocesado elevado.

Del mismo modo, Kanban, se comporta de manera más desfavorable cuanto mayor es el porcentaje de reprocesado y mayor el coeficiente de variación, alejándose del modelo determinista.

Se simulan en Optquest, las tres situaciones de simulación para los dos sistemas. Es decir se realizan 6 simulaciones. Se han realizado 500 simulaciones en Optquest, el programa en algunos casos detendrá la simulación antes de las 500 simulaciones, cuando considere que el resultado es lo suficientemente exacto. El parámetro de horizonte de simulación inicial será de 100000 y el número de réplicas inicial 60.

A continuación se exponen los resultados obtenidos con Optquest:

- Conwip sin fallos cv=0.9; PR =8%; TH=80%.

Best Solutions Optimal solution found.

Select	Simulation	Objective Value	Status	cv	K15	p_R	Sistema
<input checked="" type="checkbox"/>	20	14,998338	Feasible	0,900000	15	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	14	15,998133	Feasible	0,900000	16	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	15	16,997919	Feasible	0,900000	17	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	26	17,997695	Feasible	0,900000	18	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	18	18,997462	Feasible	0,900000	19	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	7	19,997220	Feasible	0,900000	20	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	27	20,996968	Feasible	0,900000	21	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	31	21,996707	Feasible	0,900000	22	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	28	22,996437	Feasible	0,900000	23	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	22	23,996155	Feasible	0,900000	24	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	38	24,995862	Feasible	0,900000	25	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	34	25,995559	Feasible	0,900000	26	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	8	26,995246	Feasible	0,900000	27	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	32	27,994920	Feasible	0,900000	28	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	11	28,994585	Feasible	0,900000	29	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	36	29,994239	Feasible	0,900000	30	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	25	30,993884	Feasible	0,900000	31	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	33	31,993520	Feasible	0,900000	32	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	37	32,993147	Feasible	0,900000	33	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	12	34,992377	Feasible	0,900000	35	8,000000	1
<input checked="" type="checkbox"/>	35	35,991978	Feasible	0,900000	36	8,000000	1

Figura 53. Resultados Conwip determinación parámetros simulación I (a)

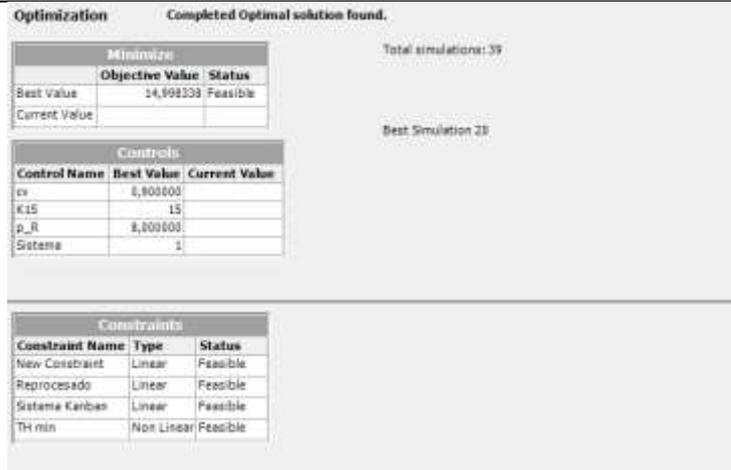
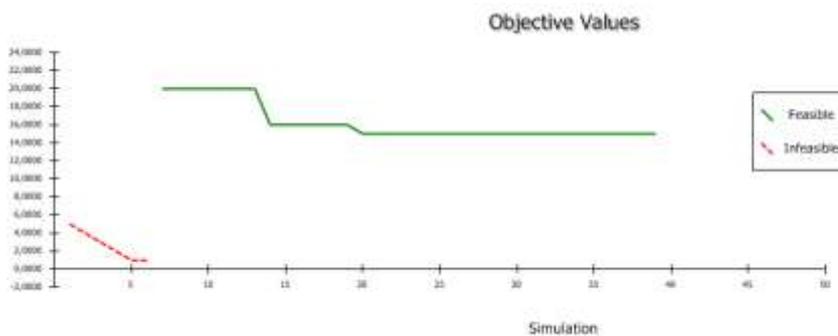


Figura 54. Resultados Conwip determinación parámetros simulación I (b)



Gráfica 1. Resultados Conwip determinación parámetros simulación I

- Conwip con fallo tipo A; MTBF=100min. ; MTTR=11,11min.; cv=0.9;PR=8%; TH=80%.

Best Solutions Optimal solution found.

Select	Simulation	Objective Value	Status	cv	K15	p_R	Sistema	t_fallos	t_repara
<input checked="" type="checkbox"/>	17	23,998125	Feasible	8,800000	24	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	16	24,995832	Feasible	8,800000	25	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	18	25,995529	Feasible	8,800000	26	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	32	26,995215	Feasible	8,800000	27	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	10	28,994855	Feasible	8,800000	29	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	37	29,994206	Feasible	8,800000	30	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	15	30,993855	Feasible	8,800000	31	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	26	31,993490	Feasible	8,800000	32	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	11	32,993116	Feasible	8,800000	33	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	12	33,992732	Feasible	8,800000	34	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	24	35,991934	Feasible	8,800000	36	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	20	36,991521	Feasible	8,800000	37	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	36	37,991096	Feasible	8,800000	38	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	8	39,990215	Feasible	8,800000	40	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	5	1,000000	Infeasible	8,800000	1	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	4	1,999967	Infeasible	8,800000	2	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2,999916	Infeasible	8,800000	3	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	2	3,999853	Infeasible	8,800000	4	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4,999778	Infeasible	8,800000	5	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	6	5,999689	Infeasible	8,800000	6	8,800000	1	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	13	6,999586	Infeasible	8,800000	7	8,800000	1	100,000000	11,110000

Figura 55. Resultados Conwip determinación parámetros simulación II (a)

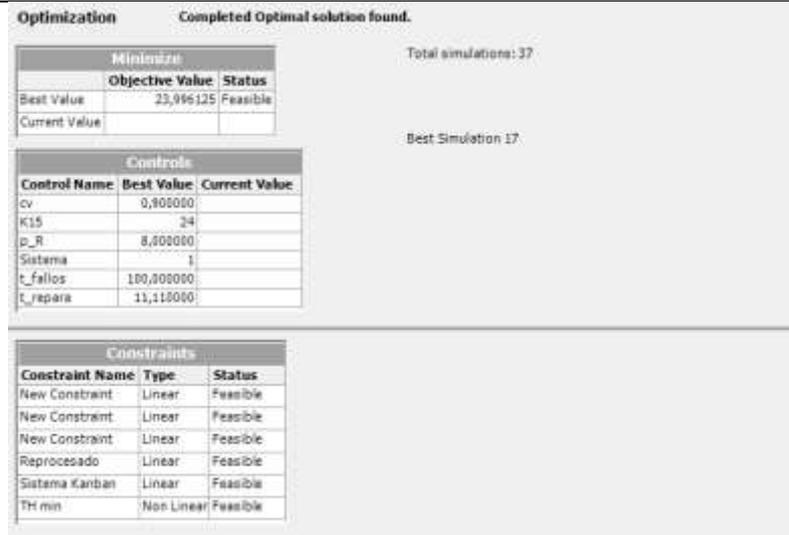
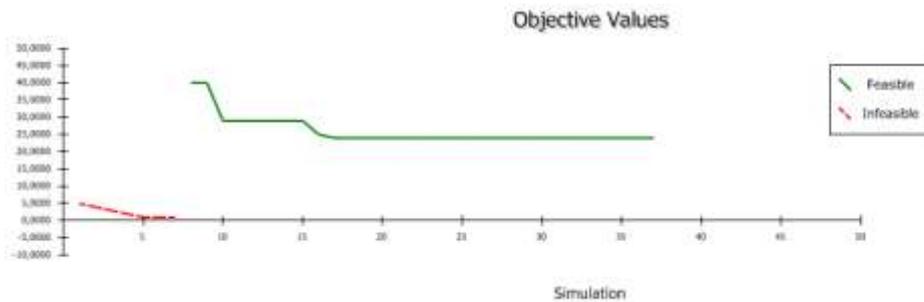


Figura 56. Resultados Conwip determinación parámetros simulación II (b)



Gráfica 2. Resultados Conwip determinación parámetros simulación II



- Conwip con fallo tipo B; MTBF=1000min.; MTTR=111,11min.; cv=0.9; P\_R=8%; TH=80%.

Best Solutions      Optimal solution found.

Select	Simulation	Objective Value	Status	cv	K15	p_R	Sistema	t_fallos	t_repara
<input checked="" type="checkbox"/>	17	30,99418	Feasible	0,900000	31	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	13	31,993663	Feasible	0,900000	32	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	12	32,993301	Feasible	0,900000	33	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	11	33,992927	Feasible	0,900000	34	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	14	34,992543	Feasible	0,900000	35	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	24	35,992149	Feasible	0,900000	36	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	20	36,991746	Feasible	0,900000	37	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	38	37,991330	Feasible	0,900000	38	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	35	38,990905	Feasible	0,900000	39	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	8	39,990470	Feasible	0,900000	40	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	5	1,000000	Infeasible	0,900000	1	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	4	1,999967	Infeasible	0,900000	2	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2,999916	Infeasible	0,900000	3	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	2	3,999854	Infeasible	0,900000	4	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4,999780	Infeasible	0,900000	5	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	6	5,999692	Infeasible	0,900000	6	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	15	6,999590	Infeasible	0,900000	7	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	33	7,999473	Infeasible	0,900000	8	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	40	8,999346	Infeasible	0,900000	9	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	9	9,999208	Infeasible	0,900000	10	8,000000	1	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	23	10,999061	Infeasible	0,900000	11	8,000000	1	1000,000000	111,110000

Figura 57. Resultados Conwip determinación parámetros simulación III(a)

Optimization      Completed Optimal solution found.

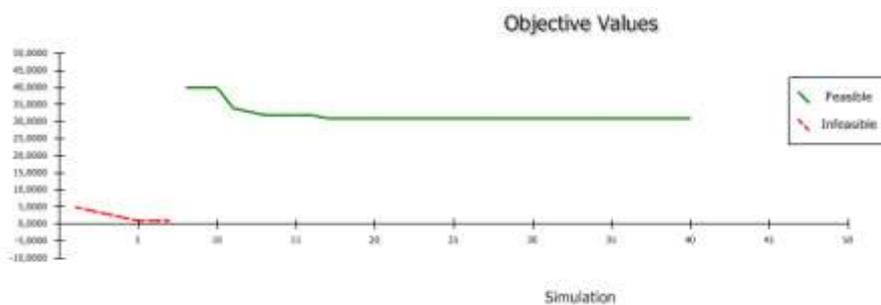
Minimize		
Objective Value	Status	
Best Value	30,99418	Feasible
Current Value		

Total simulations: 40  
Best Simulation 17

Controls		
Control Name	Best Value	Current Value
cv	0,900000	
K15	31	
p_R	8,000000	
Sistema	1	
t_fallos	1000,000000	
t_repara	111,110000	

Constraints		
Constraint Name	Type	Status
New Constraint	Linear	Feasible
New Constraint	Linear	Feasible
New Constraint	Linear	Feasible
Reprocesado	Linear	Feasible
Sistema Kanban	Linear	Feasible
TH min	Non Linear	Feasible

Figura 58. Resultados Conwip determinación parámetros simulación III(b)



Gráfica 3. Resultados Conwip determinación parámetros simulación III



- Kanban sin fallos;  $cv = 0.9$ ;  $PR = 8\%$ ;  $TH = 80\%$ .

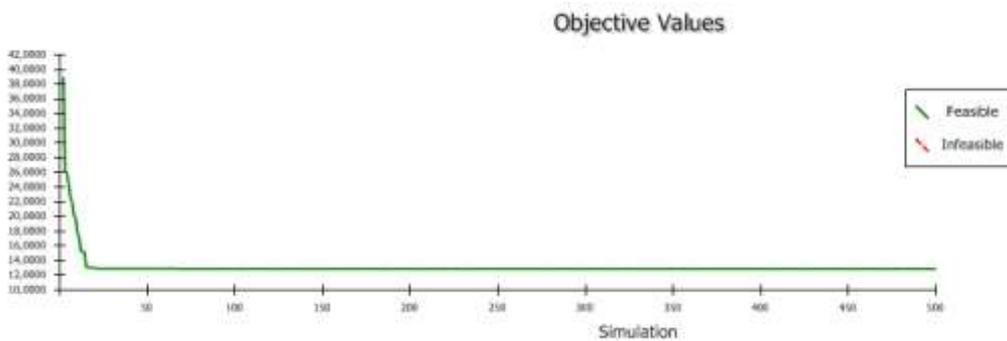
**Best Solutions**

Select	Simulation	Objective Value	Status	cv	K11	K22	K33	K44	K55	p_R	Sistema
<input checked="" type="checkbox"/>	68	12,863267	Feasible	0,900000	2	2	8	5	7	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	71	12,872242	Feasible	0,900000	2	2	8	5	6	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	241	12,904007	Feasible	0,900000	2	2	8	5	9	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	21	12,905238	Feasible	0,900000	2	2	8	5	12	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	28	12,908195	Feasible	0,900000	2	2	8	5	13	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	365	12,919695	Feasible	0,900000	2	2	8	5	10	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	469	12,934612	Feasible	0,900000	2	2	8	5	25	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	26	12,962386	Feasible	0,900000	2	2	8	6	11	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	27	12,970111	Feasible	0,900000	2	2	8	6	14	8,000000	2
<input checked="" type="checkbox"/>	20	12,993368	Feasible	0,900000	2	2	8	6	12	8,000000	2

Figura 59. Resultados Kanban determinación parámetros simulación I (a)



Figura 60. Resultados Kanban determinación parámetros simulación I (b)



Gráfica 4. Resultados Kanban determinación parámetros simulación I



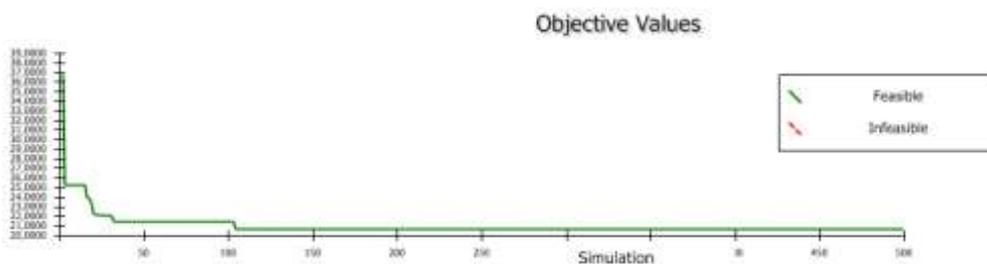
- Kanban con fallo tipo A; MTBF=100 min.; MTTR=11,11 min.; cv=0.9; PR=8%; TH=80%.

Best Solutions													
Select	Simulation	Objective Value	Status	cv	K11	K22	K33	K44	K55	p_R	Sistema	t_fallos	t_repara
<input checked="" type="checkbox"/>	188	20,673999	Feasible	0,900000	3	3	12	8	5	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	105	20,685117	Feasible	0,900000	3	3	12	8	5	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	104	20,714674	Feasible	0,900000	3	3	12	8	7	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	315	20,736679	Feasible	0,900000	3	3	12	9	5	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	316	20,778632	Feasible	0,900000	3	3	12	10	5	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	110	20,779177	Feasible	0,900000	3	3	12	8	8	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	116	20,886636	Feasible	0,900000	1	5	13	10	5	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	32	21,467297	Feasible	0,900000	4	2	13	8	5	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	54	21,496070	Feasible	0,900000	4	2	13	9	5	8,000000	2	100,000000	11,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	289	21,644066	Feasible	0,900000	1	5	14	11	3	8,000000	2	100,000000	11,110000

Figura 61. Resultados Kanban determinación parámetros simulación II (a)

Optimization			Completed
Minimize			Total simulations: 499
	Objective Value	Status	
Best Value	20,673999	Feasible	
Current Value			
Controls			Best Simulation 108
Control Name	Best Value	Current Value	
cv	0,900000		
K11	3		
K22	3		
K33	12		
K44	8		
K55	5		
p_R	8,000000		
Sistema	2		
t_fallos	100,000000		
t_repara	11,110000		

Figura 62. Resultados Kanban determinación parámetros simulación II (b)



Gráfica 5. Resultados Kanban determinación parámetros simulación II



- Kanban con fallo tipo B; MTBF=1000 min.; MTTR=111,11 min.; cv=0.9; PR=8%; TH=80%.

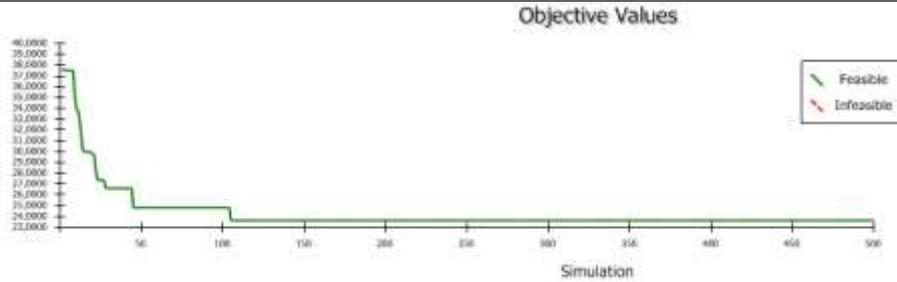
Best Solutions													
Select	Simulation	Objective Value	Status	cv	K11	K22	K33	K44	K55	p_R	Sistema	t_fallos	t_repara
<input checked="" type="checkbox"/>	145	23,652199	Feasible	0,900000	2	10	6	14	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	239	23,776338	Feasible	0,900000	1	13	8	14	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	487	23,841966	Feasible	0,900000	2	10	8	17	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	347	23,842889	Feasible	0,900000	2	10	8	20	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	279	24,777056	Feasible	0,900000	1	10	8	18	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	45	24,807825	Feasible	0,900000	2	10	7	15	24	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	152	24,832628	Feasible	0,900000	2	10	7	15	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	316	24,858152	Feasible	0,900000	2	10	7	20	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	141	25,309883	Feasible	0,900000	1	10	10	10	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	183	25,391818	Feasible	0,900000	2	10	8	12	16	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	187	25,412259	Feasible	0,900000	3	10	8	14	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	47	25,857281	Feasible	0,900000	2	10	8	15	24	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	181	25,747893	Feasible	0,900000	3	10	8	20	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	418	25,917838	Feasible	0,900000	2	10	8	20	32	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	129	25,917948	Feasible	0,900000	2	13	8	20	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	393	26,144810	Feasible	0,900000	5	5	10	20	13	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	160	26,232073	Feasible	0,900000	1	10	11	11	14	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	147	26,462940	Feasible	0,900000	3	10	7	15	29	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	210	26,569500	Feasible	0,900000	3	10	7	20	25	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	412	26,584787	Feasible	0,900000	1	9	13	10	23	8,000000	2	1000,000000	111,110000
<input checked="" type="checkbox"/>	28	26,605812	Feasible	0,900000	6	3	13	10	18	8,000000	2	1000,000000	111,110000

Figura 63. Resultados Kanban determinación parámetros simulación III (a)

Optimization		Completed
Minimize		
Objective Value	Status	
Best Value	23,652199	Feasible
Current Value		
Controls		
Control Name	Best Value	Current Value
cv	0,900000	
K11	2	
K22	10	
K33	6	
K44	14	
K55	25	
p_R	8,000000	
Sistema	2	
t_fallos	1000,000000	
t_repara	111,110000	
Constraints		
Constraint Name	Type	Status
cv	Linear	Feasible
Reprocesado	Linear	Feasible
Sistema Kanban	Linear	Feasible
t_fallos	Linear	Feasible
t_repara	Linear	Feasible
TH min	Non Linear	Feasible

Total simulations: 500  
Best Simulation 105

Figura 64. Resultados Kanban determinación parámetros simulación III (b)



Gráfica 6. Resultados Kanban determinación parámetros simulación III

A continuación se presentan dos tablas con los resultados obtenidos para ambos sistemas:

SIMULACIÓN	K	Valores de las variables de salida
(1) Conwip Sin Fallos cv=0.9 p_R=0.8% THmin=80% Disp.=100 %	K15: 15	Entity 1.WIP: 14,9983375498702 Resource 1.Utilization: 0,799269992090525 Resource 2.Utilization: 0,798137131224186 Resource 3.Utilization: 0,867674294043019 Resource 4.Utilization: 0,797670329411064 Resource 5.Utilization: 0,798224666754471 Num_in: 26772,58333333333 Num_out: 26757,58333333333 TH: 80,2759076995674 U_B_Obj: 80 WIP Value: 14,9983375498702  Min WIP: 14,9983375498702 (Best = 14,9983375498702)
(2) Conwip (Fallo tipo A) cv=0.9 p_R=8% THmin=80% Disp=90% MTBF=100 min. MTTR=11.11min.	K15: 24	Entity 1.WIP: 23,9961252055901 Resource 1.Utilization: 0,799141504682567 Resource 2.Utilization: 0,797951806684003 Resource 3.Utilization: 0,867108761716554 Resource 4.Utilization: 0,797863057839506 Resource 5.Utilization: 0,798750486661245 Num_in: 26778,01666666667 Num_out: 26754,01666666667 TH: 80,2655325569864 U_B_Obj: 80 WIP Value: 23,99612520559  Min WIP: 23,9961252055901 (Best = 23,9961252055901)
(3) Conwip (Fallo tipo B) cv=0.9 p_R=8% THmin=80% Disp.=90% MTBF=1000min. MTTR=111.11min.	K15: 31	Entity 1.WIP: 30,9940181517901 Resource 1.Utilization: 0,800535131293751 Resource 2.Utilization: 0,799644806231296 Resource 3.Utilization: 0,869265363816905 Resource 4.Utilization: 0,799995429427277 Resource 5.Utilization: 0,798035561271165 Num_in: 26827,7 Num_out: 26796,7 TH: 80,401893847385 U_B_Obj: 80 WIP Value: 30,9940181517901  Min WIP: 30,9940181517901 (Best = 30,9940181517901)

Tabla 14. Resultados Conwip determinación de los parámetros de simulación



<b>SIMULACIÓN</b>	<b>K</b>	<b>Valores de las variables de salida</b>
<b>(4) Kanban Sin Fallos</b> <b>cv=0.9</b> <b>p_R=0.8%</b> <b>THmin=80%</b> <b>Disp.=100 %</b>	K11: 2 K22: 2 K33: 8 K44: 5 K55: 7	Entity 1.WIP: 12,8632668529867 Resource 1.Utilization: 0,79589656142035 Resource 2.Utilization: 0,796634577032243 Resource 3.Utilization: 0,865543872185405 Resource 4.Utilization: 0,796649297666955 Resource 5.Utilization: 0,795966687557624 Num_in: 26704,6833333333 Num_out: 26691,6833333333 TH: 80,0781251760265 U_B_Obj: 80 WIP Value: 13,3394505463525  Min WIP: 12,8632668529867(Best = 12,8632668529867)
<b>(5) Kanban (Con Fallos)</b> <b>cv=0.9</b> <b>p_R=8%</b> <b>THmin=80%</b> <b>Disp=90%</b> <b>MTBF=100 min.</b> <b>MTTR=11.11min.</b>	K11: 3 K22: 3 K33: 12 K44: 8 K55: 5	Entity 1.WIP: 20,6739993701043 Resource 1.Utilization: 0,79741592082023 Resource 2.Utilization: 0,796740772888973 Resource 3.Utilization: 0,866032397119012 Resource 4.Utilization: 0,79702992911189 Resource 5.Utilization: 0,796268334647262 Num_in: 26728,2333333333 Num_out: 26707,2333333333 TH: 80,1243754810501 U_B_Obj: 80 WIP Value: 21,1618554988493  Min WIP: 20,6739993701043(Best = 20,6739993701043)
<b>(6) Kanban (Con Fallos)</b> <b>cv=0.9</b> <b>p_R=8%</b> <b>THmin=80%</b> <b>Disp.=90%</b> <b>MTBF=1000min.</b> <b>MTTR=111.11min.</b>	K11: 2 K22: 10 K33: 6 K44: 14 K55: 25	Entity 1.WIP: 23,6521992176682 Resource 1.Utilization: 0,797127209090385 Resource 2.Utilization: 0,795226811825326 Resource 3.Utilization: 0,864179869802036 Resource 4.Utilization: 0,795895567234057 Resource 5.Utilization: 0,795289577733765 Num_in: 26695,4333333333 Num_out: 26671,0666666667 TH: 80,0194690375861 U_B_Obj: 80 WIP Value: 24,1743143340511  Min WIP: 23,6521992176682(Best = 23,6521992176682)

Tabla 15. Resultados Kanban determinación de los parámetros de simulación

#### 4.5.1. Determinación del horizonte de simulación (H)

Para el cálculo de (H), se han simulado los seis escenarios anteriormente propuestos, considerando un número de réplicas constante  $N=60$ . Para cada simulación se ha ido variando el horizonte de simulación desde un valor inicial de 100000 unidades de tiempo, hasta un valor final de 781.25 unidades. Al pasar de una simulación a la siguiente, se ha dividido H entre dos.

La simulación en Arena se realiza con los datos de k obtenidos en Optquest, en cada caso.



DISPONIBILIDAD
100
80_TipoA (MTBF=100;MTTR=11,11)
80_Tipo B (MTBF=1000;MTTR=111,11)

Tabla 16. Determinación de H. Escenarios propuestos para cada sistema

Una vez realizadas la totalidad de las simulaciones en Arena, se obtiene, para el WIP y para el TH, la media de los resultados obtenidos en los 3 escenarios para cada sistema, dado un valor constante de H. A partir de ahí y teniendo en cuenta la variabilidad máxima permitida en los intervalos de confianza correspondientes, se elegirá el valor del horizonte temporal (H).

A continuación se recogen los valores medios de los intervalos de confianza, para un nivel de significación del 95%, que se obtienen para cada tipo de sistema, tanto para el WIP como para el TH (Véase tablas 18 y 19). Además en la tabla 17, se incluyen los valores de WIP medio, TH alcanzado y utilización de la estación 3, que en el modelo considerado, será la estación cuello de botella.

De estos datos, considerando un error máximo admisible de un 1%, se obtiene un valor de H.

	H	WIP	WIP Half_ Width	TH (%)	TH Half_ Width	Utilización Cuello Botella (Estación 3) (tanto por uno)
CONWIP SIN FALLOS TH_min=80% p_R=8% cv=0.9	100000	14.9983	0,00	80.0991	0,09	0.8677
	50000	14.9967	0,00	79.9273	0,14	0.8680
	25000	14.9934	0,00	79.6316	0,20	0.8678
	12500	14.9867	0,00	79.0926	0,29	0.8681
	6250	14.9734	0,00	78.1537	0,41	0.8683
	3125	14.9468	0,00	76.3492	0,57	0.8661
	1562.5	14.8936	0,01	73.3982	0,79	0.8636
	781.25	14.7872	0,02	68.5655	1,06	0.8581



Análisis de los sistemas de control de la producción  
Kanban y Conwip bajo escenarios de reprocesado

CONWIP FALLO A TH_min=80% p_R=8% cv=0.9 MTBF=100min. MTTR=11,11min.	100000	23.9961	0,00	79.9738	0,18	0.8671
	50000	23.9923	0,00	79.6935	0,23	0.8673
	25000	23.9845	0,00	79.1505	0,30	0.8676
	12500	23.9690	0,00	78.2674	0,40	0.8678
	6250	23.9380	0,00	76.8269	0,56	0.8628
	3125	23.8760	0,01	74.5078	0,81	0.8620
	1562.5	23.7520	0,02	70.7477	1,11	0.8505
	781.25	23.5040	0,04	64.9610	1,39	0.8299
CONWIP FALLO B TH_min=80% p_R=8% cv=0.9 MTTR=1000min. MTBF=111,11min.	100000	30.9940	0,00	80.0066	0,46	0.8693
	50000	30.9880	0,00	79.5962	0,65	0.8695
	25000	30.9761	0,00	78.8443	0,92	0.8680
	12500	30.9521	0,00	77.8277	1,21	0.8596
	6250	30.9043	0,01	76.4236	1,51	0.8568
	3125	30.8086	0,01	74.4027	1,69	0.8496
	1562.5	30.6172	0,03	71.4330	1,86	0.8413
	781.25	30.2343	0,05	66.7888	1,91	0.8234
KANBAN SIN FALLOS TH_min=80% p_R=8% cv=0.9	100000	13.3395	0,04	79.9296	0,12	0.8655
	50000	13.3443	0,05	79.7801	0,18	0.8658
	25000	13.3245	0,08	79.4815	0,26	0.8661
	12500	13.2848	0,11	78.8902	0,36	0.8657
	6250	13.2520	0,15	77.8495	0,49	0.8637
	3125	13.2555	0,23	75.9473	0,63	0.8640
	1562.5	13.0740	0,33	72.7353	0,79	0.8601
	781.25	12.5938	0,42	67.6131	1,02	0.8446



KANBAN FALLO A TH <sub>min</sub> =80% p <sub>R</sub> =8% cv=0.9 MTBF=100min. MTTR=11,11min.	100000	21.1619	0,06	79.8787	0,16	0.8660
	50000	21.1365	0,07	79.6325	0,21	0.8661
	25000	21.1232	0,10	79.2369	0,30	0.8653
	12500	21.0162	0,15	78.4825	0,42	0.8639
	6250	20.9408	0,22	77.1308	0,57	0.8632
	3125	20.5579	0,33	74.6976	0,76	0.8567
	1562.5	19.9185	0,43	70.9956	0,99	0.8532
	781.25	18.5403	0,56	65.5544	1,24	0.8391
KANBAN TH <sub>min</sub> =80% p <sub>R</sub> =8% cv=0.9 MTBF=1000 MTTR=111,11	100000	24.1743	0,09	79.8354	0,40	0.8642
	50000	24.1011	0,13	79.6649	0,55	0.8639
	25000	24.1841	0,19	79.1996	0,77	0.8672
	12500	24.0356	0,24	78.1822	1,08	0.8637
	6250	24.0129	0,42	76.6631	1,43	0.8617
	3125	23.6015	0,54	74.1301	1,81	0.8584
	1562.5	22.5416	0,57	70.5068	2,18	0.8452
	781.25	20.9217	0,63	65.6895	2,07	0.8201

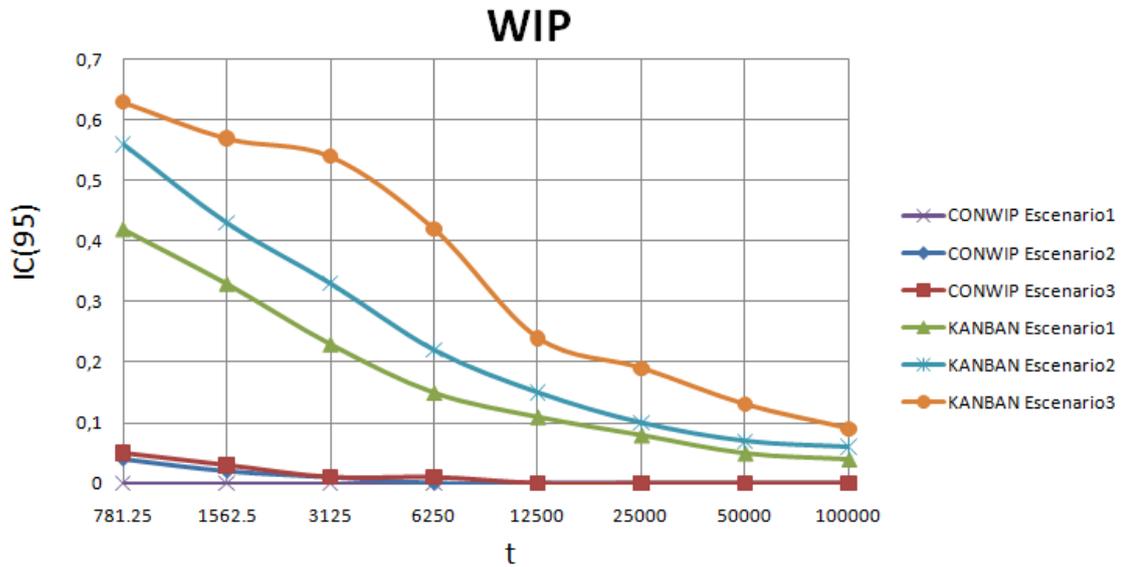
Tabla 17. Determinación de H. Valores medios de WIP, TH y utilización estación 3.

A continuación se presentan las tablas de los valores medios del intervalo de confianza, obtenidos para cada escenario, con su gráfica correspondiente para WIP y TH.

• **WIP**

H	CONWIP Escenario1	CONWIP Escenario2	CONWIP Escenario3	KANBAN Escenario1	KANBAN Escenario2	KANBAN Escenario3
<b>100000</b>	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06	0,09
<b>50000</b>	0,00	0,00	0,00	0,05	0,07	0,13
<b>25000</b>	0,00	0,00	0,00	0,08	0,10	0,19
<b>12500</b>	0,00	0,00	0,00	0,11	0,15	0,24
<b>6250</b>	0,00	0,00	0,01	0,15	0,22	0,42
<b>3125</b>	0,00	0,01	0,01	0,23	0,33	0,54
<b>1562.5</b>	0,01	0,02	0,03	0,33	0,43	0,57
<b>781.25</b>	0,02	0,04	0,05	0,42	0,56	0,63

Tabla 18. Determinación de H. Valores medios del intervalo de confianza WIP

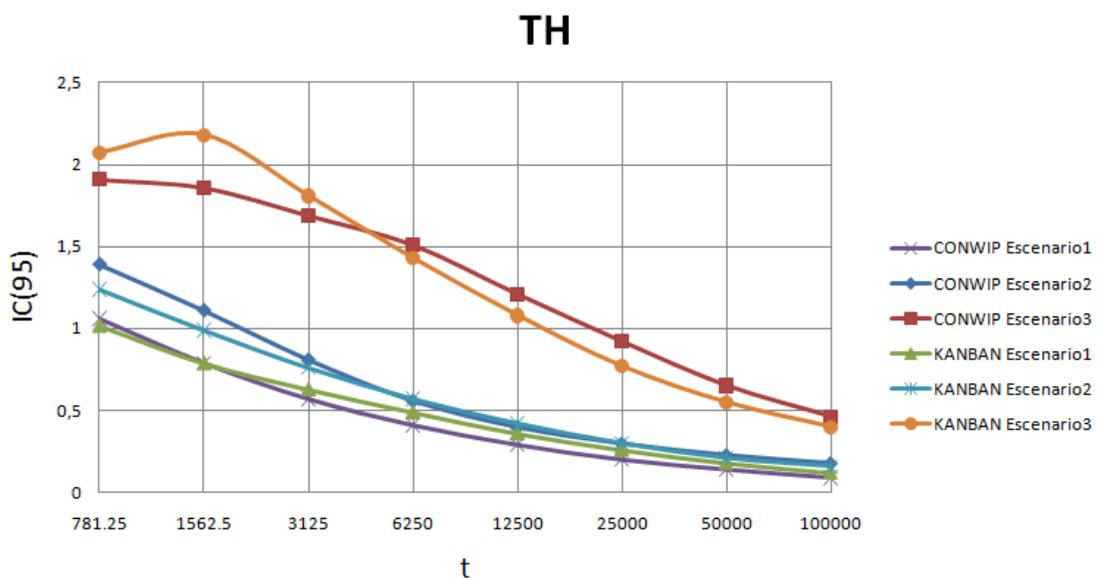


Gráfica 7. Determinación de H. Intervalos de Confianza WIP

• TH

H	CONWIP Escenario1	CONWIP Escenario2	CONWIP Escenario3	KANBAN Escenario1	KANBAN Escenario2	KANBAN Escenario3
100000	0,09	0,18	0,46	0,12	0,16	0,40
50000	0,14	0,23	0,65	0,18	0,21	0,55
25000	0,20	0,30	0,92	0,26	0,30	0,77
12500	0,29	0,40	1,21	0,36	0,42	1,08
6250	0,41	0,56	1,51	0,49	0,57	1,43
3125	0,57	0,81	1,69	0,63	0,76	1,81
1562.5	0,79	1,11	1,86	0,79	0,99	2,18
781.25	1,06	1,39	1,91	1,02	1,24	2,07

Tabla 19. Determinación de H. Valores medios del intervalo de confianza de TH



Gráfica 8. Determinación de H. Intervalos de Confianza de TH



De estos datos, se obtiene que el valor de H, el cuál ha de encontrarse entre 12500 y 25000. En concreto el horizonte de simulación que se toma será el de 25000.

#### 4.5.2. Determinación del numero de replicas

Para el cálculo del horizonte de simulación se vuelven a simular en Arena las tres situaciones de simulación, para los sistemas Kanban y Conwip. Para cada simulación se mantiene constante el valor del tiempo de horizonte de simulación  $H=25000$ , que se ha determinado en el apartado anterior, desde un valor inicial 60 hasta un valor final de 4. Al pasar de una simulación a la siguiente, N se divide por la mitad.

Una vez realizadas la totalidad de las simulaciones, se obtiene, para el WIP y para el TH, la media de los resultados obtenidos en los 3 escenarios para cada sistema, dado un valor constante del número de réplicas. A partir de ahí y teniendo en cuenta la variabilidad máxima permitida en los intervalos de confianza correspondientes, se elegirá el valor del número de réplicas(N). Los resultados obtenidos se recogen en las tablas 20, 21 y 22.

	N	WIP	WIP Half_ Width	TH (%)	TH Half_ Width	Utilización Cuello Botella (Estación 3) (tanto por uno)
CONWIP SIN FALLOS TH_min=80% p_R=8% cv=0.9	60	14.9934	0,00	79.6316	0,20	0.8678
	30	14.9936	0,00	79.7458	0,27	0.8691
	15	14.9938	0,00	79.6339	0,41	0.8702
	8	14.9936	0,00	79.4789	0,67	0.8697
	4	14.9928	0,00	79.4830	0,72	0.8670
CONWIP FALLO A TH_min=80% p_R=8% cv=0.9 MTBF=100 MTTR=11,11	60	23.9845	0,00	79.1505	0,30	0.8676
	30	23.9852	0,00	79.3167	0,45	0.8680
	15	23.9858	0,00	79.4496	0,70	0.8655
	8	23.9868	0,00	79.3965	1,10	0.8706
	4	23.9852	0,01	79.3423	1,90	0.8730
CONWIP FALLO B TH_min=80%	60	30.9761	0,00	78.8443	0,92	0.8680
	30	30.9768	0,00	79.3560	1,17	0.8724
	15	30.9774	0,00	79.4658	1,58	0.8747



Análisis de los sistemas de control de la producción  
Kanban y Conwip bajo escenarios de reprocesado

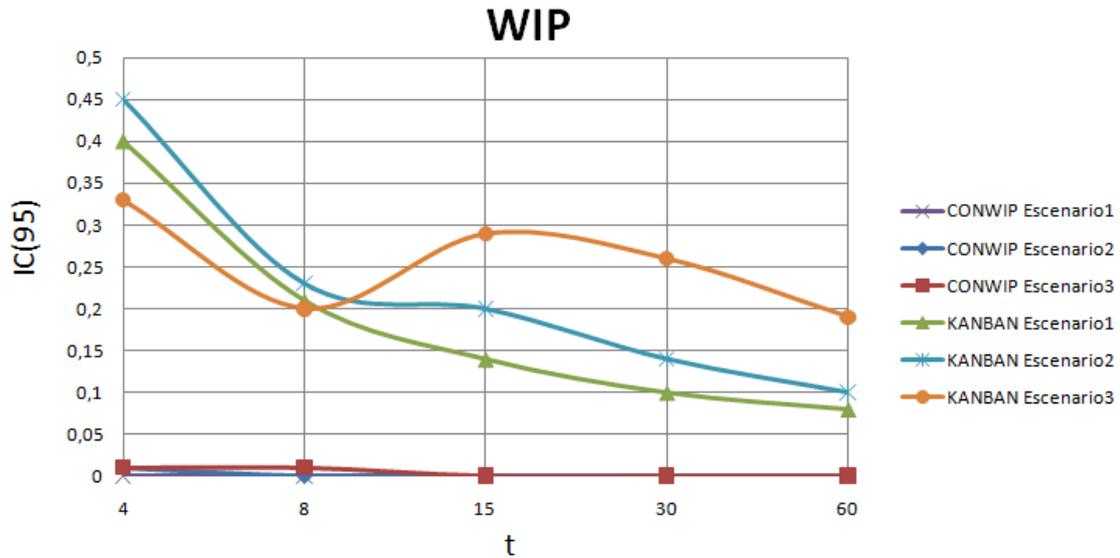
p <sub>R</sub> =8% cv=0.9 MTTR=1000 MTBF=111,11	8	30.9794	0,01	79.9410	2,41	0.8829
	4	30.9772	0,01	79.0287	4,06	0.8829
KANBAN SIN FALLOS TH <sub>min</sub> =80% p <sub>R</sub> =8% cv=0.9	60	13.3245	0,08	79.4815	0,26	0.8661
	30	13.3377	0,10	79.5307	0,36	0.8655
	15	13.4443	0,14	79.4752	0,59	0.8687
	8	13.4994	0,21	79.5651	1,03	0.8710
	4	13.3629	0,40	79.0919	1,67	0.8752
KANBAN FALLO A TH <sub>min</sub> =80% p <sub>R</sub> =8% cv=0.9 MTBF=100 MTTR=11,11	60	21.1232	0,10	79.2369	0,30	0.8653
	30	21.1364	0,14	79.4422	0,45	0.8654
	15	21.1946	0,20	79.6869	0,70	0.8678
	8	21.2520	0,23	79.9332	1,19	0.8685
	4	21.2439	0,45	80.6647	1,88	0.8718
KANBAN FALLO B TH <sub>min</sub> =80% p <sub>R</sub> =8% cv=0.9 MTBF=1000 MTTR=111,11	60	24.1841	0,19	79.1996	0,77	0.8672
	30	24.0767	0,26	78.9526	1,21	0.8653
	15	23.8646	0,29	78.2422	1,88	0.8622
	8	23.7463	0,20	77.9897	3,40	0.8641
	4	23.6498	0,33	78.2492	4,29	0.8681

Tabla 20. Determinación de N. Valores medios de WIP, TH y utilización estación 3.

• WIP

N	CONWIP Escenario1	CONWIP Escenario2	CONWIP Escenario3	KANBAN Escenario1	KANBAN Escenario2	KANBAN Escenario3
60	0,00	0,00	0,00	0,08	0,10	0,19
30	0,00	0,00	0,00	0,10	0,14	0,26
15	0,00	0,00	0,00	0,14	0,20	0,29
8	0,00	0,00	0,01	0,21	0,23	0,20
4	0,00	0,01	0,01	0,40	0,45	0,33

Tabla 21. Determinación de N. Valores medios del intervalo de confianza WIP

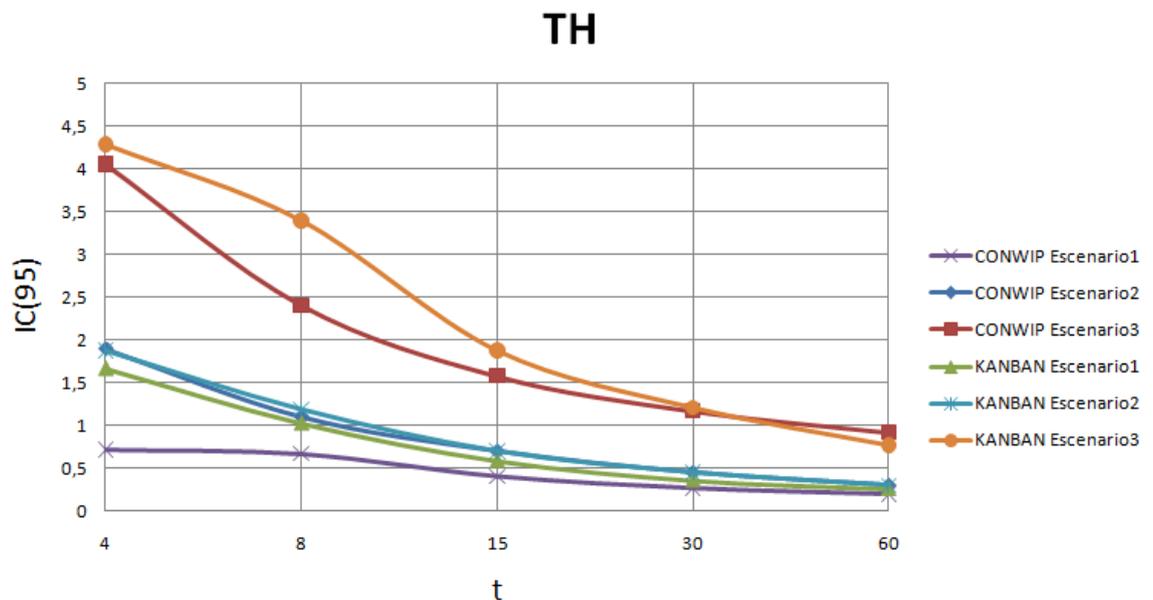


Gráfica 9. Determinación de N. Intervalos de Confianza de WIP

- TH

N	CONWIP Escenario1	CONWIP Escenario2	CONWIP Escenario3	KANBAN Escenario1	KANBAN Escenario2	KANBAN Escenario3
60	0,20	0,30	0,92	0,26	0,30	0,77
30	0,27	0,45	1,17	0,36	0,45	1,21
15	0,41	0,70	1,58	0,59	0,70	1,88
8	0,67	1,10	2,41	1,03	1,19	3,40
4	0,72	1,90	4,06	1,67	1,88	4,29

Tabla 22. Determinación de N. Valores medios del intervalo de confianza TH



Gráfica 10. Determinación de H. Intervalos de Confianza de TH



En los resultados obtenidos, se puede observar que  $N$  toma un valor aproximado de 50 réplicas.

Al ser un número muy elevado de réplicas, estar sólo las dos simulaciones más extremas fuera del 1% y al tener más relevancia el WIP, en la práctica se tomará como número de réplicas  $N=15$ .

Por tanto los parámetros de simulación finales serán de  $H=25000$  unidades de tiempo y  $N=15$  réplicas.

#### **4.6. Aplicación de Optquest al modelo de simulación de Kanban y Conwip**

Mediante la utilización del programa Optquest, lo que se pretende, es obtener las soluciones óptimas. Es decir, las soluciones cuyos valores sean los mejores para un determinado sistema y cumplan las restricciones establecidas.

Una vez abierto en Arena el sistema que se desea estudiar y escogidos los parámetros correspondientes, se procede a ejecutar Optquest, como se explicó en el apartado 3.5.5. Se procederá del mismo modo para cada uno de los escenarios escogidos para realizar la experimentación.

Previamente, es conveniente comprobar que el modelo en Arena no tiene errores. Para ello, se selecciona dentro de la opción Run en el menú principal de Arena, la función Check Model. Arena comprueba en ese momento, si existen errores en el modelo. El resultado de la comprobación lo comunica, mediante una ventana que se abre sobre la ventana principal del programa. Otra consideración que hay que tener en cuenta, es que antes de iniciar una optimización, para que se trace el gráfico en optquest que representa la evolución de la solución en el tiempo, es necesario que la opción del menú de Arena Run>Run Control>Batch Run esté desactivada.

Iniciado Optquest, el siguiente paso será crear una nueva optimización. En el presente proyecto, se han elaborado cuatro archivos de optimización diferentes, para facilitar la puesta en marcha de las simulaciones. Se ha distinguido entre sistema Kanban y sistema Conwip; y a la vez, se ha diferenciado entre el escenario que considera la existencia de fallos en la máquina y el que considera la inexistencia de los mismos.

Una vez creado el nuevo archivo de optimización, se procede a seleccionar las variables que se van a utilizar en el modelo de optimización. Es decir lo que en Optquest recibe el nombre de Controls.

A continuación en las siguientes figuras se recogen los “controls” que se han seleccionado para cada caso concreto. Además, se recogen los valores que ha asignado a cada una de las columnas de la tabla Controls Summary.

- Variables de control escogidas para el sistema Kanban sin fallos



Controls Summary									
Includ	Category	Control	Element Type	Type	Low Bound	Suggested Value	High Bound	Step	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	cv	Variable	Continuous	0	0	1	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K11	Variable	Discrete	1	5	10	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K22	Variable	Discrete	1	10	10	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K33	Variable	Discrete	1	15	20	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K44	Variable	Discrete	1	20	20	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K55	Variable	Discrete	1	25	25	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	p_R	Variable	Continuous	0	0	100	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Sistema	Variable	Integer	0	0	5	1	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_St	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Beta_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Beta_St	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K12	Variable	Continuous	15300000	17000000	18700000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K13	Variable	Continuous	15300000	17000000	18700000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K14	Variable	Continuous	23400000	26000000	28600000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K15	Variable	Discrete	1	5	40	1	

Figura 65. Variables control seleccionadas Kanban sin fallos

- Variables de control escogidas para el sistema Kanban con fallos

Controls Summary									
Includ	Category	Control	Element Type	Type	Low Bound	Suggested Value	High Bound	Step	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K11	Variable	Discrete	1	5	10	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K22	Variable	Discrete	1	10	10	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K33	Variable	Discrete	1	15	20	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K44	Variable	Discrete	1	20	20	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K55	Variable	Discrete	1	25	25	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	p_R	Variable	Continuous	0	0	100	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Sistema	Variable	Integer	0	0	5	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	t_fallos	Variable	Continuous	0	0	1000	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	t_repara	Variable	Continuous	0	0	111,11	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_St	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Beta_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Beta_St	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K12	Variable	Continuous	15300000	17000000	18700000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K13	Variable	Continuous	15300000	17000000	18700000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K14	Variable	Continuous	23400000	26000000	28600000	N/A	

Figura 66. Variables control seleccionadas Kanban con fallos

- Variables de control escogidas para el sistema Conwip sin fallos

Controls Summary									
Includ	Category	Control	Element Type	Type	Low Bound	Suggested Value	High Bound	Step	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	cv	Variable	Continuous	0	0	1	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K15	Variable	Discrete	1	5	40	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	p_R	Variable	Continuous	0	0	100	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Sistema	Variable	Integer	0	0	5	1	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_St	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Beta_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	

Figura 67. Variables control seleccionadas Conwip sin fallos



- Variables de control escogidas para el sistema Conwip con fallos

Controls Summary									
Includ	Category	Control	Element Type	Type	Low Bound	Suggested Value	High Bound	Step	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	cv	Variable	Continuous	0	0	1	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	K15	Variable	Discrete	1	5	40	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	p_R	Variable	Continuous	0	0	100	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Sistema	Variable	Integer	0	0	5	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	t_fallos	Variable	Continuous	0	0	1000	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	t_repara	Variable	Continuous	0	0	111,11	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Alfa_St	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Beta_B	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	Beta_St	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K11	Variable	Discrete	1	5	15	1	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K12	Variable	Continuous	15300000	17000000	18700000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K13	Variable	Continuous	15300000	17000000	18700000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K14	Variable	Continuous	23400000	26000000	28600000	N/A	
<input type="checkbox"/>	User Specified	K22	Variable	Discrete	1	5	15	1	

Figura 68. Variables control seleccionadas Conwip con fallos

Posteriormente, habrá que seleccionar las respuestas ó salidas del sistema. Para los sistemas estudiados las “responses” son las siguientes:

- Respuestas para el sistema Kanban sin fallos

Responses Summary					
Includ	Category	Data Type	Response	Response Type	
<input checked="" type="checkbox"/>	Entity	WIP	Entity 1.WIP	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 1.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 2.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 3.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 4.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 5.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_in	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_out	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	TH	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	U_B_Obj	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	WIP Value	DStat Average	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number In	Entity 1.NumberIn	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number Out	Entity 1.NumberOut	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	NVA Time	Entity 1.NVATime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Other Time	Entity 1.OtherTime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Total Time	Entity 1.TotalTime	Tally Value	

Figura 69. Variables de respuesta seleccionadas Kanban sin fallos



- Respuestas para el sistema Kanban con fallos

Responses Summary					
Includ	Category	Data Type	Response	Response Type	
<input checked="" type="checkbox"/>	Entity	WIP	Entity 1.WIP	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 1.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 2.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 3.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 4.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 5.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_in	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_out	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	TH	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	U_B_Obj	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	WIP Value	DStat Average	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number In	Entity 1.NumberIn	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number Out	Entity 1.NumberOut	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	NVA Time	Entity 1.NVATime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Other Time	Entity 1.OtherTime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Total Time	Entity 1.TotalTime	Tally Value	

Figura 70. Variables de respuesta seleccionadas Kanban con fallos

- Respuestas para el sistema Conwip sin fallos

Responses Summary					
Includ	Category	Data Type	Response	Response Type	
<input checked="" type="checkbox"/>	Entity	WIP	Entity 1.WIP	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 1.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 2.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 3.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 4.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 5.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_in	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_out	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	TH	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	U_B_Obj	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	WIP Value	DStat Average	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number In	Entity 1.NumberIn	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number Out	Entity 1.NumberOut	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	NVA Time	Entity 1.NVATime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Other Time	Entity 1.OtherTime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Total Time	Entity 1.TotalTime	Tally Value	

Figura 71. Variables de respuesta seleccionadas Conwip sin fallos



- Respuestas para el sistema Conwip con fallos

Responses Summary					
Includ	Category	Data Type	Response	Response Type	
<input checked="" type="checkbox"/>	Entity	WIP	Entity 1.WIP	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 1.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 2.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 3.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 4.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	Resource	Instantaneous Utilization	Resource 5.Utilization	DStat Average	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_in	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	Num_out	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	TH	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	U_B_Obj	Variable Value	
<input checked="" type="checkbox"/>	User Specified	Variable	WIP Value	DStat Average	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number In	Entity 1.NumberIn	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Number Out	Entity 1.NumberOut	Output Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	NVA Time	Entity 1.NVATime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Other Time	Entity 1.OtherTime	Tally Value	
<input type="checkbox"/>	Entity	Total Time	Entity 1.TotalTime	Tally Value	

Figura 72. Variables de respuesta seleccionadas Conwip con fallos

Una vez definida la totalidad de las variables que intervienen en el problema, el siguiente paso, será definir las restricciones. Es decir, definir las limitaciones que deben cumplir cada una de ellas y las relaciones existentes entre las distintas variables. Respecto a las restricciones, será necesario variar manualmente los valores de  $cv$ ,  $p_R$  y sistema, para probar todos los escenarios de simulación propuestos. Cómo se estudió en el apartado 4.3. del presente proyecto, los valores de las variables del sistema que se van a emplear en la simulación se presentan en la siguiente tabla.

Variables	Posibles valores
Sistema	1= Conwip 2= Kanban
$cv$	0.1 0.5 0.9
$p_R$	0 4 8
TH	70% 80%

Tabla 23. Valores de variables del sistema empleados en la simulación



- Restricciones para los sistemas sin fallos

Para los sistemas donde la disponibilidad es de un 100% o donde no existen fallos en las máquinas, las restricciones son cuatro:

RESTRICCIONES
R1. Sistema: {1, 2}
R2. cv: {1/10, 5/10, 9/10}
R3. p_R: {0, 4, 8}
R4. TH ≥ U_B_Obj

Tabla 24. Restricciones planteadas para los sistemas sin fallos

Esta última restricción, se refiere al TH mínimo. Para los sistemas que se estudian el TH será mayor o igual a un determinado porcentaje. En el modelo de Arena, este porcentaje se define en Arena con la variable U\_B\_Obj. Por tanto, antes de realizar la simulación en Optquest, ha de asegurarse que la variable U\_B\_Obj tiene asignado el valor deseado, 70 u 80 según sea el caso.

En la siguiente figura, se presenta un ejemplo de una de las tablas de Constraints Summary, para simular un escenario sin fallos en Optquest.

Constraints Summary					
	Included	Name	Type	Description	Expression
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	cv	Linear		[cv]=(1/10)
	<input checked="" type="checkbox"/>	Reprocesado	Linear		[p_R]=0
	<input checked="" type="checkbox"/>	Sistema	Linear		[Sistema]=2
	<input checked="" type="checkbox"/>	TH min	NonLinear		[TH] ≥ [U_B_Obj]

Figura 73. Ejemplo tabla Constraints Summary escenario sin fallos

- Restricciones para los sistemas con fallos

Para los sistemas donde la disponibilidad es de un 90% o donde existen fallos en las máquinas, las restricciones serán seis:

RESTRICCIONES
R1. Sistema: {1, 2}
R2. cv: {1/10, 5/10, 9/10}
R3. p_R: {0, 4, 8}
R4. TH ≥ U_B_Obj
R5. t_fallos: {100, 1000}
R6. t_repara: {1111/100, 11111/100}

Tabla 25. Restricciones planteadas para los sistemas con fallos

Se crean dos nuevas restricciones, que aseguran que el valor de las variables de fallo, tomen el valor que se desea en la simulación.



En la siguiente figura, se presenta un ejemplo de una de las tablas de Constraints Summary, para simular un escenario con fallos en Optquest.

Constraints Summary					
	Included	Name	Type	Description	Expression
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	cv	Linear		[cv]=(5/10)
	<input checked="" type="checkbox"/>	Reprocesado	Linear		[p_R]=8
	<input checked="" type="checkbox"/>	Sistema	Linear		[Sistema]=2
	<input checked="" type="checkbox"/>	t_fallos	Linear		[t_fallos]=100
	<input checked="" type="checkbox"/>	t_repara	Linear		[t_repara]=(1111/100)
	<input checked="" type="checkbox"/>	TH min	NonLinear		[TH]>= [U_B_Obj]

Figura 74. Ejemplo tabla Constraints Summary escenario sin fallos

Por último, antes de determinar las opciones de optimización, habrá que definir la función objetivo. Ésta será común para todos los escenarios que se han simulado. El objetivo de todos los sistemas será el de minimizar el inventario en proceso o WIP.

Objectives Summary						
	Select	Name	Linear	Goal	Description	Expression
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	Min WIP	NonLinear	Minimize		[Entity 1.WIP]

Figura 75. Objetivo del sistema

Las opciones de optimización que se han escogido se muestran en la figura siguiente:

**Options**

Stop Options

- Number of simulations
- Manual Stop
- Automatic Stop
- Run only suggested solutions (1)

Tolerance

The tolerance value is used to determine when two solutions are equal.

Tolerance

Replications persimulation

- Use a fixed number of replications
- Vary the number of replications
  - Minimum Replications
  - Maximum Replications
  - Percent of mean for a 95% confidence level

Solutions Log

Figura 76. Opciones de Optimización



El número de réplicas es de 15 y corresponde al valor hallado previamente mediante la determinación de los parámetros de simulación.

El valor del horizonte de simulación es una de las opciones que habrá que modificar antes de iniciar el optimizador. Por tanto, en Arena habrá que introducir el valor de 15000 unidades de tiempo en la casilla Replication Length. A la cual se accede, seleccionando el menú Run>Setup y la pestaña Replications Parameters.