



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESAMIENTO DE MUESTRAS EN LABORATORIOS CLÍNICOS

Autor: Francisco Javier Caballero Fedriani

Director: Pedro Sánchez Martín

Madrid

Junio de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Francisco Javier Caballero Fedriani DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: MEJORA DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESAMIENTO DE MUESTRAS EN LABORATORIOS CLÍNICOS, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

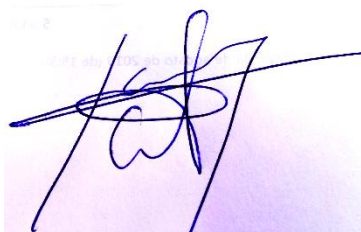
6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 27 de Agosto de 2019

ACEPTA



Fdo.: Francisco Javier Caballero Fedriani



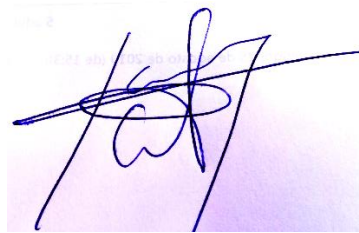
Fdo.: Pedro Sánchez Martín

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**MEJORA DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESAMIENTO DE MUESTRAS EN
LABORATORIOS CLÍNICOS**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2018/2019 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Francisco Javier Caballero Fedriani

Fecha: 27/ 08/ 2019



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Pedro Sánchez Martín

Fecha: 27/ 08/ 2019



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESAMIENTO DE MUESTRAS EN LABORATORIOS CLÍNICOS

Autor: Francisco Javier Caballero Fedriani

Director: Pedro Sánchez Martín

Madrid

Junio de 2019

Resumen

1. Introducción

El análisis clínico es una de las partes vitales dentro de la cadena de diagnóstico y tratamiento, en constante interacción con las consultas de hospitales y centros sanitarios. Según las cifras, los datos obtenidos de los laboratorios están implicados en el 65% de las decisiones críticas del sector, y suponen un 10% de los gastos de un centro médico.

A pesar de su importancia a veces se tiene la idea errónea de que los laboratorios de análisis clínico son procesos manuales, cuando en la industria son líneas de producción altamente automatizadas y de elevada complejidad operativa.

En estas líneas se reciben miles de muestras al día, se clasifican, se derivan y transportan a las pruebas pertinentes. Esta agrupación de procesos industriales suele estar dirigida por persona ajeno al mundo de la gestión de operaciones. Muchas veces en estos sistemas pasan desapercibidas la variabilidad y sus consecuencias.

Como resultado, se tienen líneas con una capacidad teórica que nunca se alcanza, problemas con los tiempos de entrega, y estrangulamientos. Y a veces, se achacan estos problemas a la falta de capacidad de procesamiento, pasando desapercibidas estas políticas de operación.

Por lo tanto, en este trabajo se realizará el modelado de un laboratorio de análisis clínico, semejante a los que existen actualmente en la industria médica, que actualmente presenta dificultades para alcanzar la productividad esperada.

Mediante la simulación se reproducirá la situación actual del sistema, con la intención de realizar un diagnóstico, detectando las causas de la baja productividad del sistema, así como se analizarán distintos escenarios implementando medidas para la mejora del funcionamiento del laboratorio, midiendo su impacto y viabilidad.

2. Metodología

Para el análisis del laboratorio en cuestión se utilizará un software de simulación llamado Rockwell Arena. Esta herramienta es apropiada por las características del sistema a simular, siendo este discreto, estocástico y dinámico.

Para el análisis completo de un sistema real, la metodología seguida es:

- Descripción del problema y del sistema en su totalidad, con su consiguiente recogida de información.
- Construcción de un modelo de simulación, desde la forma conceptual hasta el desarrollo completo en el software de simulación.
- Validación del modelo, con comportamientos dinámicos similares a los del sistema real.

- Diseño de los KPIs e indicadores para medir el desempeño del sistema en los distintos escenarios estudiados.
- Análisis de los resultados obtenidos, tras las distintas variaciones diseñadas. Evaluación e iteración de todo del proceso.

3. Resultados

Para el análisis se parte de un caso base de operación del laboratorio, este parte de una capacidad teórica de procesamiento de 12385 muestras a la semana. En el caso base, las muestras se procesan de manera equitativa entre las líneas, la carga de trabajo se reparte de forma homogénea.

En este primer caso, se introducen en el sistema 12000 muestras para ser procesadas, de las que procesa 10600, y el resto permanece como WIP que se procesaría durante el siguiente día. Se consigue una utilización elevada de las líneas y se detecta una interacción entre las líneas que puede provocar pérdidas de productividad.

Para probar el sistema en condiciones adversas, se introduce en el modelo la llegada de unas pruebas que solo se realizan una vez al día todas en la misma línea, es decir se aumenta la variabilidad en el sistema, saturando una de las líneas al introducir un lote de gran tamaño con prioridad sobre las muestras ordinarias. Se introducen 1050 muestras inter-día semanales.

Para compensar, se reduce el número de muestras ordinarias que llegan, el total de muestras que se introducen en el sistema se mantiene en 12000. Pero frente a esta perturbación, por el cambio en la distribución del tipo de muestras y de su llegada, la productividad se reduce en torno a un 20%, siendo capaz el sistema de procesar solo 8400 muestras. Este caso de estudio es el Escenario 0, que es comparado con distintas medidas que pretenden compensar esta caída de productividad.

El problema reside en el diseño del transporte del sistema, ya que, si una de las líneas se satura y se llena el buffer de inicio de las máquinas, el transporte se bloquea ya que las muestras con esa línea de destino se quedan esperando su sitio en el tramo común, cortando el flujo de muestras a las otras líneas, estrangulando el sistema.

Se analizan los siguientes escenarios:

- **Escenario 1:** *Reducción del tamaño del lote inter-día introducido.* En vez de introducir 150 muestras inter-día de golpe, se prueba a dividir este lote en partes más pequeñas, que el operario introduce poco a poco para reducir la variabilidad introducida en el sistema.
- **Escenario 2:** *Vaciado de la línea previo a la introducción del lote de pruebas inter-día.* Para evitar que la línea sature, se corta el flujo de muestras entrantes, para que pueda procesar el inventario y aceptar el lote entrante.
- **Escenario 3:** *Combinación de los Escenarios 1 y 2*

- **Escenario 4:** *Modificación de la disposición del sistema de transporte.* Se pasa del transporte con tramos comunes y separadores, a un transporte en estrella, que alimenta de forma independiente a las tres líneas de análisis.
- **Escenario 5:** *Variación del tamaño de las bandejas de salida y los racks de muestras urgentes.* Se modifica el tamaño de los diferentes lotes en el sistema, para estudiar su impacto sobre el sistema, si da mayor fluidez a las muestras.
- **Escenario 6:** *Implantación de un sistema de control de inventario en las líneas.* Finalmente se desarrolla una lógica previa al transporte que controla el inventario en las líneas de manera que se evita el bloqueo del transporte, se establece un nivel de inventario objetivo.

Escenario	Descripción del escenario	Pruebas Procesadas	Tiempo en el sistema (horas)
Escenario 0	Caso base con pruebas inter-día	8.422	30,86
Escenario 1	Reducción del tamaño del lote de muestras inter-día	8.688	28,01
Escenario 2	Vaciado previo de la línea	8.912	25,68
Escenario 3	Combinación escenarios 1 y 2	9.285	22,04
Escenario 4	Modificación de la disposición del transporte	10.145	20,48
Escenario 5	Variación del tamaño de los racks de salida y urgentes	8.690	27,69
Escenario 6	Sistema de Control de Inventario en las líneas	10.236	19,77

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos

Con las distintas medidas propuestas se consigue mejorar el desempeño del sistema, paliando la caída de productividad que se tenía en caso base. Al reducir el tamaño de los lotes la saturación es menor, por lo que se procesan más muestras. Combinado con el vaciado previo de la línea la pérdida de capacidad se reduce a la mitad.

Sin embargo, el problema no es solucionado de raíz, son medidas que ayudan, pero no cambian el funcionamiento del sistema frente a la perturbación. Es al cambiar la distribución del transporte, o al implantar el sistema de control de inventario cuando se consigue que la productividad sea la misma que antes de la introducción de las muestras inter-día.

Con las dos medidas se consigue elevar el cuello de botella del sistema que es la interrelación de las líneas, que se estrangulan entre sí. La mejora que se obtiene es de pasar a trabajar a un 75% de la capacidad teórica del sistema, a en torno a un 90%.

4. Conclusiones

El análisis de la situación inicial del laboratorio y de los diferentes escenarios analizados y presentados, permiten extraer dos cosas: Un diagnóstico del problema inicial que se tiene en la operación de este sistema, y una propuesta de solución que surge entre las analizadas como la solución más razonable y de mayor impacto.

Existe una fuerte interrelación entre las líneas, debido al transporte que queda bloqueado cuando alguna de ellas satura. Al bloquearse el transporte se produce un estrangulamiento de las líneas que no estaban saturadas, para las que queda interrumpido el flujo de muestras y se pierde productividad.

Además, debido a medidas como la de introducir un lote completo de muestras inter-día en el sistema para ser procesadas, saturando una línea directamente, se produce una perturbación para la que el sistema no tiene respuesta posible. Si se opera al máximo nivel de inventario en la línea cualquier anomalía provoca bloqueos.

Se recomienda como solución óptima, modificar el software del sistema, introduciendo el programa necesario para realizar un control de inventario en curso de las líneas, y una asignación en función de la ocupación.

Esta medida, resulta económicamente ventajosa, ya que la inversión es limitada, el desarrollo del software no es excesivamente complejo, y no habría que tocar la disposición física del laboratorio. No implica cambios en el comportamiento de los operarios, y el laboratorio no tendría que detener su operación por lo que no se deja de satisfacer a la demanda existente.

Se produce un incremento de la producción importante, aumentando el número de muestras procesadas por encima del 20%. Un incremento así consigue que se alcance la productividad que se esperaba, por tanto, cesen las reclamaciones de los clientes al respecto, y un importante aumento de los ingresos del laboratorio.

Con el nuevo sistema el tiempo de las muestras en el sistema es inferior a las 24 horas, así que el laboratorio permanece competitivo para satisfacer las exigencias de los servicios de urgencias de los hospitales.

En los escenarios simulados, se muestra el efecto de la variabilidad sobre un sistema dinámico. Se ha comprobado que un sistema que funciona manteniendo niveles de inventario en curso controlados, reduciendo los tiempos sin valor añadido y elevando los cuellos de botella, absorben mejor esta variabilidad, reaccionan antes y están preparados para operar en condiciones más desfavorables.

Finalmente, se ha visto la importancia del diseño y del rediseño en un sistema productivo, la búsqueda constante de mejoras hace que se detecten problemas de diseño y se mejore la productividad, lo que supone una ventaja competitiva.

Abstract

1. Introduction

Clinical analysis is one of the vital steps of the diagnosis and treatment cycle, in constant interaction with hospitals and health centers consultations. According to the figures, data obtained from the laboratories are involved in 65% of the critical decisions in the sector, and clinical analysis accounts for 10% of the budget of a medical center.

Despite its importance, there is a common and mistaken image that pictures clinical laboratories as manual processes, when in fact, they are highly automated production lines involving substantial operative complexity.

These lines receive thousands of samples every day, they are classified, processed and transported to be tested. This set of industrial processes are usually run by professionals from outside the world of operations management. Often in these systems the effects of variability go unnoticed.

As a result, there is a facility with diverse production lines where the theoretical capacity is never reached, delays on delivery and suffocations in the system. And sometimes, the lack of capacity or the reduced number of machines is blamed as responsible, when operative measures are the ones that should be blamed.

Therefore, in this project a clinical analysis laboratory will be modelled, a system based on real industrial laboratories, that currently suffer from productivity losses and fail to meet demand.

By using simulation, the current situation of the system will be reproduced, with the intention of conducting a diagnosis, identifying the causes for low productivity and different scenarios will be analyzed, implementing measures to boost performance in the laboratory, measuring their impact and viability.

2. Methodology

To analyze the laboratory mentioned before, the software created by Rockwell called Arena is the tool chosen. This tool is appropriate due to the system characteristics, it is a discrete, stochastic and dynamic system.

For the complete analysis of a real system, the methodology is the following:

- Full description of the problem and the system, for which data collection is the first step.
- Development of a simulation model, from the conceptual form to the full model in the simulation software.
- Validation of the model, comparing dynamic behaviors with those of the real system.

- Design the KPIs to measure the performance of the system and their variation among different scenarios.
- Analysis of the results obtained of the different scenarios and improvement measures. Evaluate and iterate the whole process.

3. Results

The analysis starts by establishing a base case of the operation of the laboratory. In this case the theoretical capacity rises to 12385 samples a week. The samples are processed equally by the three lines, the workload is homogeneously distributed.

In this base case, the system introduces 12000 samples to be processed, of which 10600 comes as output, and the rest remains as WIP which will be process the next week. The level of utilization in the lines, and there is a strong interaction between lines that could cause productivity losses.

In order to test the system in adverse conditions, a new arrival is introduced to the model. There are some samples which must be processed in some specific tests that are only conducted once a day, in the same line. The variability in the system increases, saturating one of the lines introducing 150 special samples a week.

To test the effect in a compensated manner, the number of normal samples that arrives is reduced, so that the total entering the system remains at 12000. But as a response to this change in the distribution of the samples and their type, productivity falls around a 20%, being capable only to process 8400 samples a week. This case is called Scenario 0, and it is the case with which different scenarios are compared, to try measures to compensate this productivity fall.

The problem lies in the design of the transport system, due to this design, if one of the lines collapses, and the buffer before it is full, then the transport is blocked by samples that waits their place in the line standing in the common segment, interrupting the sample flow to the other lines.

The following scenarios are analyzed:

- **Scenario 1:** *Reduction of the batch size of the special samples introduced in the system.* Instead of introducing 150 special samples at once, the batch is divided in smaller batches before being introduced by the operator, to reduce the variability introduced in the system.
- **Scenario 2:** *Vaciado de la línea previo a la introducción del lote de pruebas inter-día.* To avoid the overflow of the line caused by the arrive of the batch of special samples, the flow of samples heading the line is interrupted, so that the queue is processes and the line is able to accept the incoming batch.
- **Scenario 3:** *Combining Scenarios 1 and 2*
- **Scenario 4:** *Modification of the layout of the transport system.* The transport

changes from a sequential distribution with shared segments, to a star distribution which feeds the three lines independently.

- **Scenario 5:** *Changes in the size of the output and urgent samples batches.* The size of the batches in the system is modified, to study its impact in the system.
- **Scenario 6:** *Inventory control system.* A software that controls the stock level in the production lines avoids the overflow and the transport system avoids the blockage.

In every scenario proposed, the performance of the system improves, reducing the productivity fall that was noticed in the Scenario 0. Reducing the size of the batches introduced the overflow last for a shorter period of time, increasing the number of samples processed. Combining the reduction of the batch with the order to empty the line before the arrival of the special samples, the capacity loss is reduced by a half.

However, the root cause of the problem has not been tackled, these measures help but they do not change the behavior of the system when facing a disruption. It is changing the transport layout or using the inventory control system when productivity is restored to the level of the base case.

With the two measures the bottleneck of the system, which was the codependence between the different lines, is relieved. The improvement obtained goes from working at a 75% of the theoretical capacity to working around 90%.

4. Conclusions

The analysis of the initial situation of the laboratory and of the different scenarios presented, allows to extract two different outputs: Firstly, a diagnosis of the initial problem regarding the operation of the system, and also, the proposal of a solution that rise among all the analysed as the most convenient, the one with greater effect.

The diagnosis: There is a strong relation between the lines. This dependence is caused by the transport system which blocks right after one of the lines gets overflowed. When the transport is blocked, the adjacent queues are left without input to process and productivity is lost.

In addition, due to operative measures as introducing a complete batch of special samples to be processed, a line gets overflowed. There is a disruption for which the system has no possible contingency. If it operates at the highest inventory level allowed, in any line, a small change can cause a blockage.

As the optimum solution, it is recommended to modify the software of the system, introducing a program necessary to establish an inventory control system, which limits the size of the queues in the lines and reassigns the destination line regarding current utilization.

This measure requires limited investment, as software development is not excessively complex, and the physical distribution of the facility wouldn't need to be modified. It doesn't imply changes in the behaviour of the operators and the laboratory wouldn't have to stop its normal operations.

There is a significant increase in productivity, rising the number of processed samples over 20%. Such an increase achieves the target productivity, so that clients' complains cease, and the total revenue of the laboratory increases.

With the changes in the system, the total time that the samples are in the system is below 24 hours, so the laboratory remains competitive to satisfy the demands of the hospitals' emergency services.

In the simulated scenarios, the effect of variability in a dynamic system is highlighted. It has been proved that a system that operates around specific and controlled inventory levels, have reduced non-value-added time and absorb better variability, being able to respond faster and better to unfavorable working conditions.

Finally, it has been noticed the importance of correct design and continuous redesign in a productive system. The continuous search of improvements finds hidden problems and increases productivity, obtaining a competitive advantage.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al profesor Pedro Sánchez Martín, director de este proyecto, por su tiempo y dedicación a lo largo de todo el año. Su visión y conocimiento ha sido clave a la hora de desarrollar todo el trabajo, así como sus consejos para estructurar y presentar el análisis realizado.

Agradecer también a Ignacio Tornos, codirector del proyecto, por compartir su conocimiento sobre el tipo de sistema estudiado, desde su experiencia validando el trabajo realizado y comprobando la coherencia de los resultados. Agradecerle su tiempo y su disponibilidad.

También me gustaría agradecer a mi familia y amigos, que me apoyan cada día en mi vida académica y personal, por estar siempre a mi lado.

Índice

1.	Planteamiento del proyecto	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Motivación	2
1.3.	Estado de la cuestión	3
1.4.	Objetivos	4
2.	Metodología de trabajo	5
2.1.	Introducción a la Simulación	5
2.2.	Ventajas e inconvenientes de la Simulación	6
2.3.	Metodología asociada a la Simulación	7
3.	Descripción del sistema	9
3.1.	Contexto del laboratorio de análisis clínico	9
3.2.	Dinámica del sistema	10
3.3.	Datos de partida	12
4.	Casos de estudio – Análisis de Resultados	13
4.1.	Situación inicial, caso base	13
1.	Resultados Caso Base (Sin pruebas inter-día)	13
2.	Desarrollo del Escenario 0 (Con pruebas inter-día)	16
4.2.	Propuesta de escenarios de mejora	19
1.	Escenario 1: Reducción del tamaño del lote de muestras inter-día	19
2.	Escenario 2: Vaciado previo de la línea	22
3.	Escenario 3: Combinación de Escenarios 1 y 2	26
4.	Escenario 4: Modificación de la disposición del transporte	28
5.	Comparación del Caso Base con el Escenario 4 sin muestras inter-día	31
6.	Escenario 5: Variación del tamaño de los racks Urgentes y de Salida	33
7.	Escenario 6: Sistema de Control de Inventario en las líneas	37
8.	Tabla resumen de los resultados obtenidos	40
5.	Conclusiones	41
5.1.	Conclusiones sobre la metodología	41
5.2.	Conclusiones sobre los resultados	42
5.3.	Recomendaciones para futuros estudios	44
6.	Descripción del Modelo de Simulación	45
6.1.	Introducción al software de simulación Arena	45
1.	Principales módulos del programa	47

2.	Módulos avanzados del programa	48
6.2.	Esquema general del modelo en Arena.....	50
1.	Zona 1: Preatálisis y Distribuidor automático.....	51
2.	Zona 2: Transporte de pruebas urgentes	52
3.	Zona 3: Transporte de pruebas ordinarias	52
4.	Zona 4: Lógica para lanzar el rack de transporte	53
5.	Zona 5: Pruebas Inter-día	54
6.	Zona 6: Líneas de análisis	54
6.3.	Desarrollo del modelo en Arena en detalle.....	56
1.	Modelo Base sin pruebas Inter-día	56
2.	Transformación del modelo, Escenario 0	68
3.	Cambios en el modelo para el Escenario 2.....	70
4.	Cambios realizados en el modelo para el Escenario 3.....	73
5.	Cambios en el modelo para adaptar el transporte al Escenario 4	74
6.	Cambios realizados en el modelo para el Escenario 6.....	75
7.	Bibliografía.....	78
8.	Anexos	79
8.1.	Modelo Base (Caso Base, Escenario 0 y Escenario 1)	1
8.2.	Modelo modificado para los Escenarios 2 y 3	2
8.3.	Modelo Escenario 4	3
8.4.	Modelo Escenario 6	4

Índice Figuras

Figura 1. Metodología resolución de problemas aplicando Simulación [5].....	8
Figura 2. Esquema del proceso.....	11
Figura 3. Evolución de las colas en el escenario base	15
Figura 4. Evolución cola de inicio del transporte caso base.....	15
Figura 5. Evolución de las colas simulación Escenario 0	17
Figura 6. Evolución cola de Inicio del transporte Escenario 0.....	17
Figura 7. Resultados caso óptimo Escenario 1 (1).....	20
Figura 8. Resultados caso óptimo Escenario 1 (2).....	20
Figura 9. Evolución Colas pruebas ordinarias Escenario 1	20
Figura 10. Evolución Colas de las Líneas Escenario 2	24
Figura 11. Evolución de cola inicio del transporte Escenario 2.....	24
Figura 12. Evolución de las colas en las líneas Escenario 3.....	27
Figura 13. Evolución de cola de espera al transporte Escenario 3.....	27
Figura 14. Cambio en la distribución del transporte.....	28
Figura 15. Evolución de las colas Escenario 4.....	29
Figura 16. Evolución colas de espera al transporte.....	30
Figura 17. Evolución de las colas Caso Base sin Inter-día.....	32
Figura 18. Evolución de las colas Escenario 4 sin Inter-día	32
Figura 19. Evolución de las colas Escenario 5.....	36
Figura 20: Evolución de las colas Escenario 6.1.....	39
Figura 21. Evolución de las colas Escenario 6.3.....	39
Figura 22. Evolución de la cola al inicio del transporte Escenario 6	40
Figura 23. Clasificación tipos de sistemas [5]	45
Figura 24. Interfaz Software Arena	46
Figura 25. Panel configuración parámetros de Simulación.....	49
Figura 26: Bloques de la Zona 1 del modelo de simulación en Arena	51
Figura 27. Bloques de la Zona 2 del Modelo de Simulación en Arena	52
Figura 28; Bloques de la Zona 3 del modelo de Simulación.....	52
Figura 29. Bloques Zona 4 del modelo de Simulación.....	53
Figura 30. Bloques de la Zona 5 del modelo de Simulación.....	54
Figura 31. Zona 6 del modelo de Simulación, líneas de análisis	54
Figura 32. Módulos "Create" y "Assign" Llegada muestras.....	56
Figura 33. Parámetros módulo "Create Muestra"	56
Figura 34. Parámetros módulo "Assign Inicial"	57
Figura 35. Módulo distribuidor automático, asignación de Línea.....	58
Figura 36. Módulo Decide Línea, condiciones.....	58
Figura 37. Distribuidor automático, selección de urgentes	59
Figura 38. Condición previa a salir del sistema	59
Figura 39. Módulos transporte muestras urgentes.....	60
Figura 40. Parámetros Transporter Operario 1	60

Figura 41. Módulo preparar lote para transporte.....	61
Figura 42. Lógica detrás del lote variable.....	61
Figura 43. Comprobación para lanzar el lote al transporte	61
Figura 44. Distribución transporte	62
Figura 45. Módulos del sistema de transporte	62
Figura 46. Detalles módulos Access, Convey, Exit.....	63
Figura 47. Módulos Línea 1	63
Figura 48. Detalles Operación Línea 1	64
Figura 49. Horario de operación y mantenimiento L1	64
Figura 50. Capacidad de las líneas por hora	65
Figura 51. Detalle buffer de salida de pruebas	65
Figura 52. Transporte de pruebas de salida	66
Figura 53. Módulos usados para medir la utilización de los operarios.....	66
Figura 54. Salida de las muestras del sistema	66
Figura 55. Panel control parámetros simulación	67
Figura 56. Módulos pruebas inter-día	68
Figura 57. Parámetros creación pruebas Inter día	68
Figura 58. Módulo Assign Pruebas Inter día.....	69
Figura 59. Modificación del modelo para el Escenario 2	71
Figura 60. Detalles de la condición para mandar muestras a la L1.....	72
Figura 61. Ajustes del modelo para el Escenario 3.....	73
Figura 62. Módulos del nuevo modelo de transporte.....	74
Figura 63. Módulos del sistema de control de inventario en curso.....	75
Figura 64. Lógica de reasignación de líneas	76
Figura 65: Módulo Decide previo a la entrada al transporte	77

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos.....	iv
Tabla 2. Cálculo capacidad teórica sistema	13
Tabla 3. Resultados sin pruebas inter-día (1)	14
Tabla 4. Resultados sin pruebas inter-día (2)	14
Tabla 5. Input Escenario Base Sin Inter día	14
Tabla 6. Tiempos Escenario Base sin Inter día.....	14
Tabla 7. Utilización de las líneas Escenario Base sin Inter día	14
Tabla 8. Detalles colas Escenario Base sin Inter día	15
Tabla 9. Comparación resultados base (1)	16
Tabla 10. Comparación resultados base (2)	16
Tabla 11. Input/Output Escenario 0	18
Tabla 12. Tiempos Escenario 0	18
Tabla 13. Utilización de los recursos Escenario 0.....	18
Tabla 14. Detalles de las colas Escenario 0.....	18
Tabla 15. Input/Output Caso Óptimo Escenario 1	21
Tabla 16. Utilización Líneas Caso Óptimo Escenario 1	21
Tabla 17. Análisis Escenario 2 (1)	22
Tabla 18. Análisis Escenario 2 (2)	23
Tabla 19. Resultados Caso Óptimo Escenario 2 (1)	23
Tabla 20. Resultados Caso Óptimo Escenario 2 (2)	23
Tabla 21. Input/Output Caso Óptimo Escenario 2	25
Tabla 22. Tiempos Caso Óptimo Escenario 2	25
Tabla 23. Utilización Líneas Caso Óptimo Escenario 2	25
Tabla 24. Resultados Caso Óptimo Escenario 3 (1)	26
Tabla 25. Resultados Caso Óptimo Escenario 3 (2)	26
Tabla 26. Input/Output Caso Óptimo Escenario 3	28
Tabla 27. Tiempos Caso Óptimo Escenario 3	28
Tabla 28. Utilización Recursos Caso Óptimo Escenario 3.....	28
Tabla 29. Comparación Resultados Escenario 0 y Escenario 4.....	29
Tabla 30. Input/Output Escenario 4	30

Tabla 31. Tiempos Escenario 4	30
Tabla 32. Comparación Caso Base y Escenario 4, resultados (1)	31
Tabla 33. Comparación Caso Base y Escenario 4, resultados (2)	31
Tabla 34. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los lotes de salida (1)	33
Tabla 35. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los lotes de salida (2)	33
Tabla 36. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los lotes urgentes (1)	34
Tabla 37. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los urgentes (2)	34
Tabla 38. Resultados combinatorios del Escenario 5 (1).....	35
Tabla 39. Resultados combinatorios del Escenario 5 (2).....	35
Tabla 40. Resultados Escenario 6 caso óptimo (1)	38
Tabla 41. Resultados Escenario 6 caso óptimo (2)	38
Tabla 42. Tabla resumen de los resultados obtenidos (2)	40

1. Planteamiento del proyecto

1.1. Introducción

A pesar de la imagen tradicional de los laboratorios de análisis clínico como procesos manuales, en los que se realizan las pruebas de manera manual, en la industria son líneas de producción con un nivel de automatización elevado. En estas líneas se reciben miles de muestras al día, se clasifican, se derivan y transportan a las pruebas pertinentes. Una auténtica y compleja agrupación de procesos industriales operados por personal con formación técnica específica en el campo de la biología, ajeno al campo de la ingeniería de procesos.

En la operación de estas líneas, muchas veces pasa desapercibido el impacto de la variabilidad, y de cómo afectan las políticas de operación de la línea en esta variabilidad, y a su vez, en la productividad y eficiencia de la línea.

Como resultado, se tienen líneas con una capacidad teórica que nunca se alcanza, problemas con los tiempos de entrega, y estrangulamientos. Y a veces, se achacan estos problemas al fabricante o proveedor de la línea, pasando desapercibidas estas políticas de operación.

Por lo tanto, en este trabajo se realizará un modelado de líneas de análisis clínicos mediante técnicas de simulación. Usando la simulación como herramienta para estudiar distintas políticas de operación y distintos diseños del proceso para ver su impacto en los indicadores de calidad relativos al tiempo total de procesamiento y volumen de procesamiento diario de muestras.

Durante este estudio se simularán diferentes escenarios, que, partiendo del diagnóstico de los problemas detectados en el sistema, propongan medidas para la mejor operación del laboratorio, midiendo su efecto y su impacto.

Este documento pretende ser un análisis completo de un sistema real, utilizando la simulación que permita desde la teoría probar distintas variaciones, que podrían ayudar a mejorar la realidad.

1.2. Motivación

Existen dos principales motivaciones para la propuesta de este trabajo. La primera, parte del ámbito académico, de la oportunidad de aplicar a un proceso complejo y real, los conceptos y conocimientos teóricos adquiridos en el área de organización de procesos y mejora de la producción.

Esto engloba la aplicación de medidas para reducir la variabilidad, el control de procesos mediante indicadores KPIs, o la identificación de cuellos de botella e implementación de mejoras continuas. La simulación a este efecto aporta una herramienta intuitiva, flexible, que permite distintos escenarios, y un análisis rápido y completo en un grado de detalle variable, que va desde el mayor impacto hasta un mayor detalle.

La segunda motivación parte de un ámbito empresarial, de la necesidad de explicar a los responsables de la operación de estas líneas de análisis clínico, cómo impacta, y cuál debe ser el proceso de toma de decisiones operativas. Para esta explicación se necesita una forma intuitiva, visual y clara de mostrar los resultados. Y aquí otra vez, parece adecuada la simulación.

Se debe tener en cuenta que la operación de estas líneas de análisis no suele ser el negocio principal de los proveedores, sino la venta de los reactivos necesarios para las pruebas. Pero esta implementación se puede convertir en un problema, sí debido a una mala operación por parte del cliente de estas líneas, el cliente reclama a estos proveedores un extra en la capacidad que se le ha prometido al cliente, ya que no se alcanza el output deseado.

Por ello es necesario realizar un diagnóstico para ver dónde residen las causas, sobre las que se deberá actuar, responsables de que no se alcance el output que se debería alcanzar.

1.3. Estado de la cuestión

Actualmente, en el sector sanitario, el laboratorio de análisis clínico es una de partes vitales en el proceso de diagnóstico y tratamiento, en constante interacción con las consultas de hospitales y centros sanitarios.

En cifras, como muestra Laquanda T.Leaven en su estudio, [1] los datos obtenidos de los laboratorios suponen un 65% de las decisiones críticas del sector, y un 10% de los gastos de un centro médico. Por tanto, la mejora en la eficiencia de estos procesos, así como el aumento de la competitividad en costes es una prioridad para las empresas del sector.

El aumento de la eficiencia se suele enfocar a la asignación de nuevos recursos, perdiendo de vista el verdadero responsable del output, el flujo del proceso. En el estudio mencionado, [1] se propone el control de calidad, la metodología lean y la simulación.

Por otra parte, Hamrock [2] analiza las herramientas disponibles para la toma de decisiones críticas de operación en organizaciones sanitarias, y su solución se basa de DES (Discrete Event Simulation), de manera que se analiza el impacto de las decisiones de operación antes de su implementación, por tanto, se le da un respaldo objetivo, a decisiones que de otra forma se sustentan simplemente en el buen hacer del encargado del sistema. Durante el estudio se presenta la aplicación a flujos de pacientes, distribución de recursos, e utilización de laboratorios y farmacias.

Siguiendo en el ámbito sanitario, se podría extraer el método utilizado por la Universidad Técnica de Estambul para mejorar los servicios de Urgencias[3]. Para mejorar tiempos de espera, estrangulamientos del sistema y mejorar la eficiencia (panorama similar al problema a estudiar), se utiliza el Value Stream Map para analizar las diferentes etapas del proceso, proponer cambios en las políticas de operación, y mediante simulación (DES) estudiar el impacto de estas.

La línea de estudio en este trabajo será similar a las seguidas en la literatura, un análisis del proceso, y mediante simulación estudiar el impacto de las políticas de operación, aplicadas a un sistema concreto, que se describirá posteriormente a lo largo de esta memoria.

1.4. Objetivos

Los objetivos que se persiguen con este trabajo siguen una estructura incremental, en primer lugar, se pretende la comprensión del sistema a estudiar en su totalidad, con sus interacciones y dinámicas, de manera que se pueda realizar una modelización para el diagnóstico del mismo.

Una vez se ha definido y validado el modelo con datos extraídos empíricamente del laboratorio de análisis clínico se procede al análisis de la situación actual y la respuesta del sistema a distintos cambios. Con este análisis se pretende:

- Establecer indicadores de comportamiento del laboratorio clínico relacionados con:
 - Tiempo de respuesta
 - Tiempos de espera
 - Unidades en espera y proceso
 - Bloqueos y paradas
- Analizar las políticas de gestión y operación del laboratorio clínico de análisis que:
 - Mejoren la capacidad de análisis del laboratorio.
 - Mejoren el tiempo de respuesta de los análisis urgentes
 - Permitan la planificación de acciones de mantenimiento que impacten lo menor posible en la capacidad productiva y tiempo de respuesta asegurando la calidad del proceso.
 - Faciliten la incorporación de muestras urgentes interfiriendo en menor medida el funcionamiento del laboratorio clínico
- Diseñar el proceso del laboratorio clínico que:
 - Facilite el transporte a los módulos de análisis
 - Reduzca los bloqueos por saturación de módulos o líneas de transporte
 - Robustezca el funcionamiento del laboratorio en cuanto al volumen de procesamiento

2. Metodología de trabajo

Para el análisis del sistema que se lleva a cabo en este trabajo, se ha decidido emplear la simulación, es decir el análisis mediante un modelo que representa hasta cierto punto la realidad del laboratorio de análisis clínico, basándose en hipótesis que requieren validación.

2.1. Introducción a la Simulación

La **Simulación** consiste en experimentar, partiendo de un modelo o una serie de hipótesis de trabajo, citando a R.E Shannon, en su definición formal de la misma se describe como:

"**La simulación** es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experimentos con el mismo con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o de evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema". [4]

La simulación si se realiza de forma adecuada, esto quiere decir con un modelo correctamente validado por datos empíricos, y con una complejidad suficiente para el análisis deseado, es una herramienta potente a la hora de proponer cambios, y prever su impacto, sin necesidad de una implementación costosa, o irrealizable sin garantías.

La Simulación por ordenador se utiliza en la industria como apoyo a la toma de decisiones, por su versatilidad a la hora de manejar el tiempo de simulación y los distintos parámetros que afectan al estado del sistema. Existen dos tipos diferentes de simulación, en relación con cómo se maneja el avance del tiempo dentro del programa de simulación:

- Si al correr el modelo se avanza el tiempo de simulación a incrementos constantes de tiempo, en los que se examinan todas las variables que forman el modelo de forma periódica, en este caso se estará hablando de Simulación continua.
- Si por el contrario el tiempo de simulación no avanza de forma regular, sino que supedita su avance a cambios de estado en el sistema, en este caso se estará hablando de simulación discreta. Este es el caso en cuestión. Se analiza el estado del Sistema, y los diferentes cambios que se van produciendo.

2.2. Ventajas e inconvenientes de la Simulación

Se decide utilizar la simulación por ordenador debido a las múltiples ventajas que tiene sobre la experimentación directa sobre el sistema, que la hacen más apropiada para un estudio teórico desarrollado en terreno académico.

Las principales ventajas son:

- **Coste:** El coste de un análisis por simulación es en general mucho menor al de la experimentación directa, ya que solo se requiere de un software de simulación y no de realizar modificaciones en el sistema productivo.
- **Tiempo:** A pesar del tiempo que lleva la realización de un modelo que describa la realidad del sistema de forma útil y adecuada, una vez se ha desarrollado se pueden simular semanas, meses o años de operación en cuestión de minutos.
- **Realización de replicas:** En un experimento real, el tener la posibilidad de realizar distintas repeticiones o réplicas de un experimento en las mismas condiciones, es complejo en la realidad y lo permite la simulación.
- **Seguridad:** En un modelo de simulación se pueden reproducir condiciones que afectarían de forma considerable a la seguridad de material y operarios, sin riesgo ninguno, para prever el impacto o posibles planes de contingencia para riesgos operativos.

Por otro lado, al utilizar la simulación como herramienta de análisis se debe tener en cuenta la necesidad de constante validación de las hipótesis de trabajo con datos experimentales.

Incluso con esta validación, existe un salto entre la simulación y la realidad, por eso la implementación y revisión del modelo deben formar parte del ciclo de trabajo.

Otro problema potencial es el encontrar el nivel adecuado de complejidad al realizar el modelo, ya que un modelo demasiado simple pierde utilidad y falla al prever dinámicas en el sistema que se darían en la realidad, y sin embargo un modelo demasiado complejo puede requerir demasiado tiempo de desarrollo e incluso confusión al identificar las relaciones causa efecto de los parámetros que se quieren variar.

2.3. Metodología asociada a la Simulación

La metodología de trabajo a emplear para este proyecto sigue la estructura clásica relativa a un proceso de análisis de simulación para la toma de decisiones. Esta estructura se compone de las siguientes fases [5] (traducida del original):

1. Formular del problema: Descripción de la situación inicial en detalle, comprensión del modelo.

- Definir el problema
- Definir el sistema
- Establecer indicadores de desempeño
- Construir modelo conceptual
- Documentar suposiciones en el modelo

2. Construcción del modelo de Simulación: Reproducción de la realidad en un nivel de detalle suficiente para representar las dinámicas reales.

- Traducción del Modelo
- Selección de parámetros de Simulación
- Verificación
- Validación

3. Diseño experimental y análisis: Estudio de los diferentes experimentos, partiendo de distintas hipótesis a validar.

- Ejecuciones preliminares
- Experimentos finales
- Análisis de los resultados

4. Evaluar e iterar: Evaluación de los resultados obtenidos y su consistencia, iteración de cambios.

- Documentación
- Manual del modelo
- Manual del Usuario

5. Implementación: Se escapa del alcance de este trabajo, aun así, sería el paso siguiente natural al análisis realizado, la implementación en el sistema real y el control del impacto.

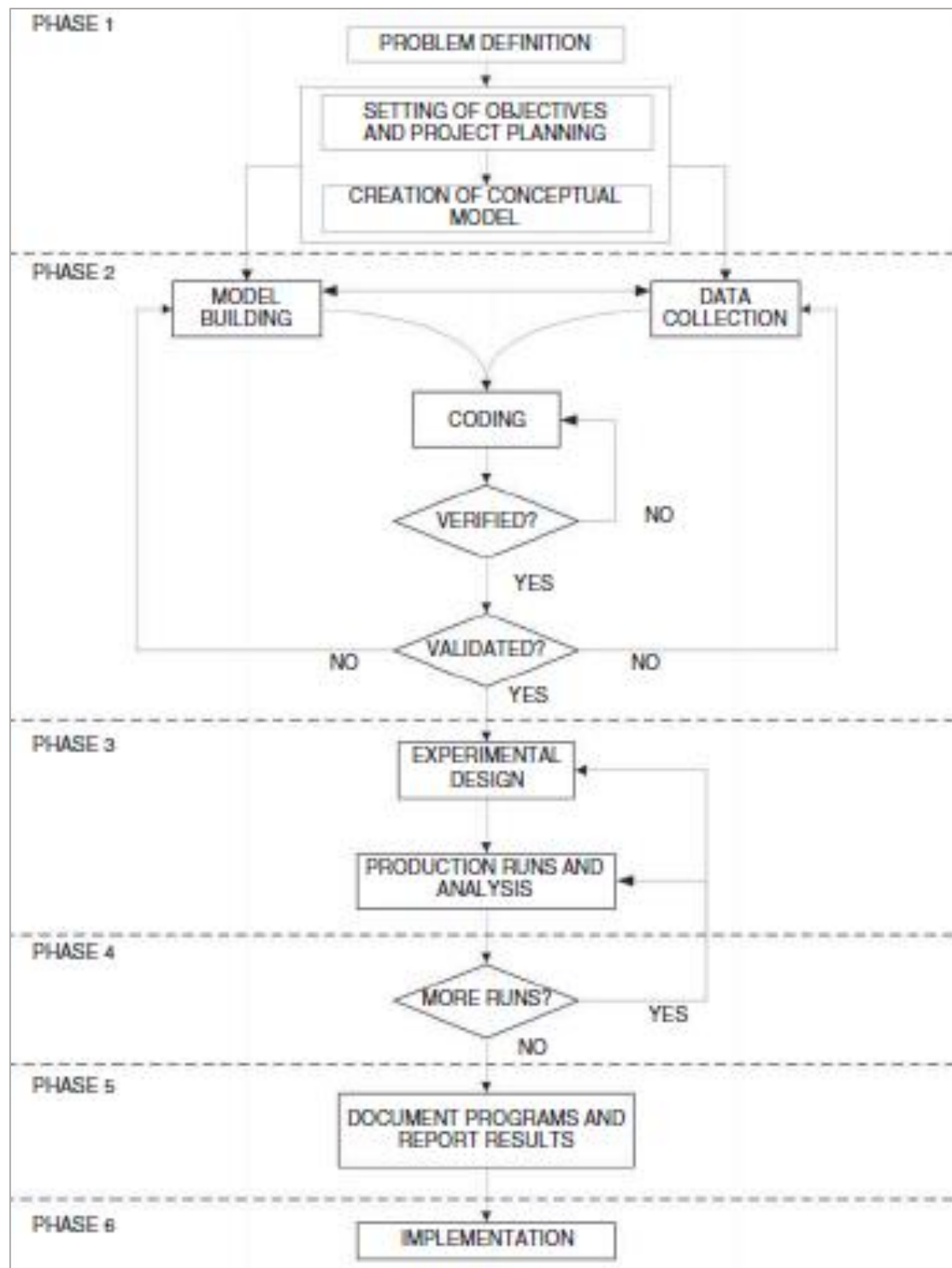


Figura 1. Metodología resolución de problemas aplicando Simulación [5]

3. Descripción del sistema

3.1. Contexto del laboratorio de análisis clínico

El sistema estudiado consiste en un laboratorio de análisis clínico. El laboratorio es una línea de procesamiento compleja y automatizada, que va cambiando el tipo de pruebas que se realizan en función a las necesidades de la demanda. El laboratorio acepta muestras y opera durante todo el día en distintos turnos.

Las muestras que llegan al laboratorio pueden venir de distintas fuentes, de los distintos hospitales a los que sirve el laboratorio ya sea de sus servicios normales o del servicio de urgencias, y de otras clínicas o centros de análisis.

El laboratorio tiene distintas zonas, una vez que las muestras llegan, lo hacen al servicio de Pre-analítica, donde se reciben y clasifican. De allí ya pasan a lo que sería el cerebro de este sistema, la unidad de distribución automática. En la unidad de distribución automática se tiene la información de las muestras, y se deciden los próximos pasos de la muestra.

Por otro lado, está el transporte, que va desde la distribución automática hasta las distintas líneas de análisis. Existen tres líneas en el sistema, las dos primeras líneas (Líneas 1 y 2) se encargan de las pruebas bioquímicas, mientras que la Línea 3 realiza pruebas hemodinámicas. Estas líneas tienen diferentes máquinas para cada prueba específica, y un buffer interno donde se almacenan las muestras que están a punto de ser analizadas.

De las líneas salen las muestras analizadas, que son recogidas por los operarios y manualmente llevadas en racks (bandejas de muestras), de vuelta al distribuidor automático.

Del distribuidor automático la muestra sale a la Muestroteca, que sería el almacén interno, donde se guardan las muestras por si hubiese algún error e hiciese falta repetir la prueba, o acceder a los resultados.

En el laboratorio trabajan tres operarios, uno encargado de cada línea, responsables de la operación de la línea y de la revisión manual de cualquier muestra cuyo resultado sea anormal.

3.2. Dinámica del sistema

Los laboratorios a pesar de operar de forma continuada a lo largo del día reciben la mayor parte de las pruebas a las 10 de la mañana, cuando empiezan las consultas en los distintos hospitales que mandan las muestras y las pruebas a realizar al laboratorio. Por tanto, hay que lidiar con una demanda acumulada en su mayor parte a unas horas concretas, con una tasa de llegada mucho menor el resto del día.

Las muestras que se reciben del servicio de urgencias de los hospitales tienen prioridad sobre las provenientes de consultas rutinarias, y los límites respecto a fechas de entrega son estrictos. Las pruebas recibidas se han de completar a lo largo del día. Las pruebas urgentes representan alrededor de un 10% del total.

Por otro lado, están las muestras a las que se les realizan pruebas poco comunes, en un día en concreto de la semana. Por ejemplo, si las pruebas del sida se realizan los miércoles, este día estas pruebas tendrán prioridad, ya que si no deberán esperar al miércoles de la semana que viene. Para realizar estas pruebas se debe adaptar la línea, y cambiar los reactivos, este es el principal motivo para realizarlas solo de forma periódica.

Las muestras serían el input del sistema. Todas se clasifican en el módulo de Pre-Analítica, pero desde aquí se hace distinción, las pruebas urgentes o las pruebas que no son diarias (inter-día), irán directamente desde pre-analítica, hasta la línea correspondiente, transportada por el operario de esa línea de forma manual.

Las pruebas ordinarias parten del distribuidor automático, donde se comprueba a qué línea debe ir cada muestra, o el número de pruebas pendientes que faltan por realizar a cada muestra, si se han realizado todas las pruebas a la muestra, esta es enviada a la muestroteca para ser almacenada.

El transporte de muestras ordinarias se hace de forma automatizada, se agrupan las muestras en función de la línea de destino en racks de transporte de 5 muestras, si pasan 3 minutos y el rack está incompleto, es transportado incompleto.

El transporte tiene un primer tramo común, desde el distribuidor automático al primer separador, en este separador salen dos tramos: el tramo de entrada a la línea 1, y el tramo hacia el segundo separador. Y allí finalmente se divide entre la línea 1 y 2.

Una vez que las muestras llegan a las líneas existen distintas prioridades para ser procesadas, las muestras urgentes o inter-día, entran directamente a la línea y paran la entrada de muestras ordinarias, para ser procesadas en primer lugar.

En las líneas existe un buffer interno desde donde las muestras salen, se extrae una gota de sangre de la muestra, que se manda a la máquina donde se realiza la prueba,

se le realiza la prueba y avanza la muestra a la siguiente máquina, hasta que no le queda ninguna prueba más que realizar en esa línea, de manera que avanza hasta el rack de salida.

Los racks de salida (bandejas metálicas con rejillas para situar las muestras) tienen capacidad de 100 muestras cada uno, y se tienen cuatro bandejas, de manera que se siguen llenando mientras el operario toma la bandeja llena y la devuelve al distribuidor automático desde donde van a la siguiente línea o a ser congeladas y conservadas.

En el esquema existen dos tipos de flujos de muestras, se pueden apreciar en la figura siguiente los flujos automáticos (línea continua), y los manuales (línea discontinua).

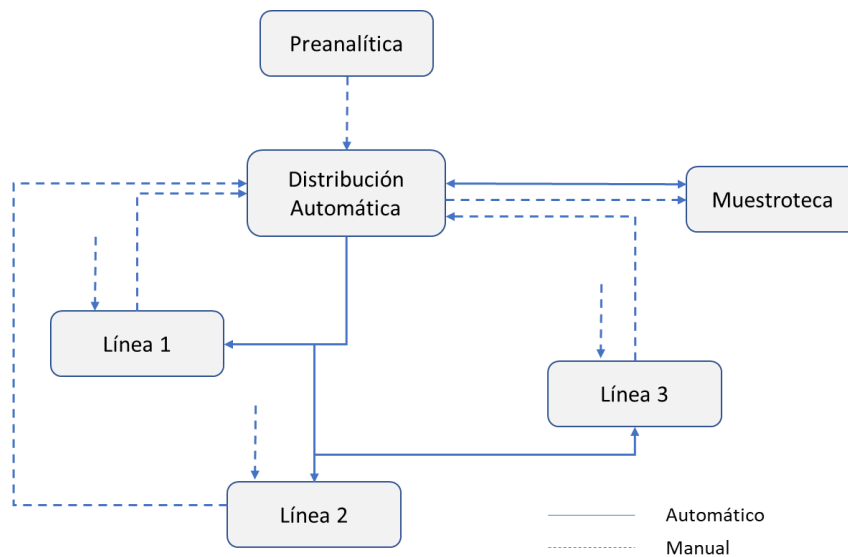


Figura 2. Esquema del proceso

Para las pruebas se utilizan reactivos y máquinas específicos, por lo que, una vez establecida la distribución de las distintas pruebas en las líneas no se puede cambiar la configuración, se puede alterar alguna máquina en concreto para realizar otro tipo de pruebas, pero no alterar la distribución y orden.

Los resultados de las pruebas se remiten a modo de informe, se puede detectar de forma automática si existen incoherencias en las pruebas, es decir don niveles de algún parámetro incompatibles entre sí.

3.3. Datos de partida

Flujo diario que se recibe en estos laboratorios es de entre 5000 y 8000 tubos de muestras diarias. A cada tubo se le aplican de media entre 4 y 5 pruebas durante el análisis. La llegada de las muestras es desorganizada, debido a la variedad en la procedencia (Transporte lejano, urgencias escalonadas).

Los tiempos de las diferentes pruebas varían, entre pruebas lentas de alrededor de 10 minutos, y pruebas rápidas de alrededor de 4.5 minutos. Para las pruebas no realizadas diariamente se cambia el reactivo utilizado, por lo que se requiere un tiempo de set up al cambiar de prueba.

El transporte de tubos de muestras automático a las líneas de análisis es unidireccional, sigue una política FIFO (no permite adelantos). Para el transporte se forman racks de 5 tubos, que esperan hasta un máximo de 3 minutos para salir, pasado este tiempo se envían, aunque no esté completo el rack. Los tiempos de transporte en cada tramo de la cinta serán de 5 segundos con distribución triangular.

Se realiza un mantenimiento diario de las líneas. Este mantenimiento dura aproximadamente 60 minutos. El mantenimiento se realiza de forma prefijada y no optimizada, es decir, no se tiene en cuenta el estado real de las líneas para modificar la hora de mantenimiento, y no tiene que ser simultáneo en las diferentes líneas.

Si una línea está llena o parada, deja de aceptar racks del transporte, que a medida que se va saturando, se va deteniendo escalonadamente, hasta que se libere y vuelva a avanzar. Por cada tramo de transporte solo hay un rack simultáneamente, es decir hasta que no sale de ese tramo el rack no se deja entrar a la siguiente. Esto puede producir ahogamientos, y falta de alimentación a las otras líneas en caso de saturación.

Se tiene la posibilidad de dar la señal de parar el envío de tubos destinados a una línea concreta si ésta se encuentra saturada. Es necesario reactivar el envío a la línea si se ha dado la orden anterior, una vez que esta se encuentra liberada.

Los operarios solo trasladan un rack en cada viaje, y se encargan de recoger e insertar en la línea los lotes de muestras urgentes o inter-día, así como de extraer las bandejas de muestras analizadas.

4. Casos de estudio – Análisis de Resultados

En esta sección se detalla el grueso del análisis realizado desde la representación de la realidad al diseño de diferentes medidas que permitan la mejora de la productividad del sistema, y la medida de su impacto.

4.1. Situación inicial, caso base

Se comienza con una situación base de operación, con la que se compararán las distintas medidas aplicadas, para diagnosticar los problemas del sistema productivo, y los puntos a mejorar, para hacer más robusto el sistema e incrementar la productividad.

1. Resultados Caso Base (Sin pruebas inter-día)

Para analizar la situación de partida conviene dar un paso atrás, para evaluar el sistema lo primero es realizar unos cálculos teóricos, de los que se extraiga un número teórico y por tanto ideal, de cuál es la capacidad del sistema.

Cálculos teóricos	
Líneas	3
Capacidad	10 Máquinas
Tiempo procesamiento medio	6 min
Nº pruebas por muestra	4
Tiempo operativo	23 h
Máx nº de pruebas procesadas	12.385 pruebas/ semana
	1.769 Pruebas/día

Tabla 2. Cálculo capacidad teórica sistema

Dado que partimos de 3 líneas con 10 máquinas cada una, y estas líneas están operativas 23 horas al día (por el mantenimiento), se obtiene el tiempo de producción disponible. Por otro lado, se tiene que, en promedio, las muestras realizan 3.9 pruebas de duración media de 6 minutos, es decir, cada muestra tiene un tiempo medio de procesamiento de 24 minutos.

Por lo que, la producción máxima que puede alcanzar el sistema tal y como está modelado es de 1769 pruebas al día, o 12385 a la semana. Esta cifra está por debajo de lo que se estimaba inicialmente, pero tras validar estas hipótesis de trabajo, parece razonable para el caso estudiado.

Sin embargo, esta cifra sería en un sistema determinista sin tener en cuenta la variabilidad, la realidad no alcanza esta cifra, no sería descabellado considerar una reducción de entre un 10 y un 15% de la capacidad al pasar al sistema real.

Al simular obtenemos los siguientes datos del sistema, acerca de la utilización, número de pruebas procesadas y tiempo en horas.

Escenario	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3
Caso Base Sin Interdía	10.667	0,95	0,95	0,94

Tabla 3. Resultados sin pruebas inter-día (1)

Escenario	Total Time	NW Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Caso Base Sin Interdía	13,36	119,36	2,63	161,68	135,34	80,79

Tabla 4. Resultados sin pruebas inter-día (2)

Se puede observar que el número máximo obtenido (la utilización del tiempo disponible es del 99%), es 10667 pruebas semanales, es decir un 13.87% menos de lo que teóricamente puede procesar.

El sistema al operar a un nivel de utilización elevado, presentan un nivel de inventario elevado. El tiempo máximo de espera en el sistema está en el transporte, con un 20% del tiempo total. Estos puntos atraen gran parte de la atención en el análisis, ya que serán claves para reducir el tiempo medio en el sistema.

A continuación, se presentan los detalles del escenario de partida:

Input	Output		
Nº pruebas entran	12.000	Nº Pruebas salen	10.667
Tiempo entre llegadas (s)	48		

Tabla 5. Input Escenario Base Sin Inter día

Tiempos	Medio	Máximo
Tiempo medio en el sistema	13,36	35,48
Tiempo espera transporte	2,63	7,31

Tabla 6. Tiempos Escenario Base sin Inter día

Utilización	Inst. Utiliz.	Scheduled
Línea 1	0,95	0,99
Línea 2	0,95	0,99
Línea 3	0,94	0,98

Tabla 7. Utilización de las líneas Escenario Base sin Inter día

Colas	Numero en cola		Tiempo espera (h)	
	Medio	Máximo	Medio	Máximo
Entrada Línea 1	161,68	208,00	2,03	3,54
Entrada Línea 2	135,34	205,00	1,71	3,52
Entrada Línea 3	80,79	202,00	1,02	2,52
Inicio Transporte	119,36	346,00	2,63	7,31
Prepar Lote transporte	4,32	13,00	0,03	1,46
Batch Salida L1	49,30	100,00	0,93	4,62
Batch Salida L2	50,18	100,00	0,95	3,53
Batch Salida L3	50,04	100,00	0,95	3,52

Tabla 8. Detalles colas Escenario Base sin Inter día

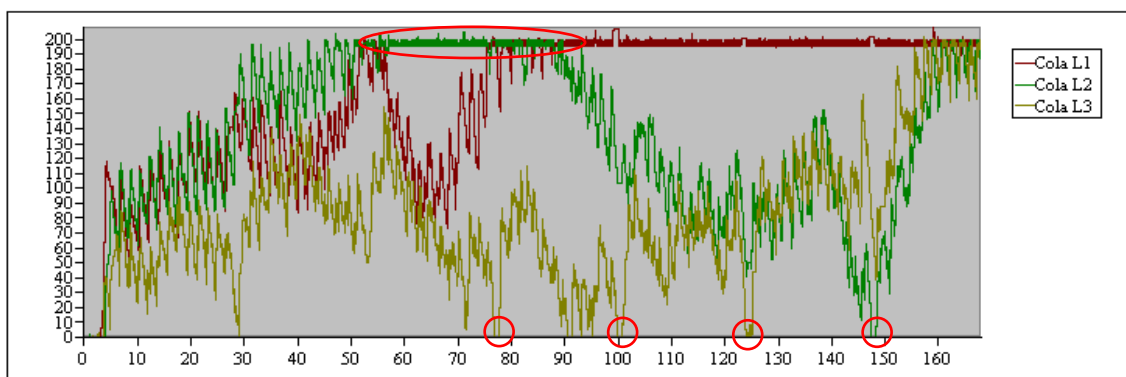


Figura 3. Evolución de las colas en el escenario base

En la Figura 3. Evolución de las colas en el escenario base, se observa en la parte superior del gráfico el momento en el que las colas alcanzan su límite de inventario, y se muestra la interacción en las líneas, como caen las otras líneas ya que parece que el transporte se “ahoga”. En la parte inferior se han señalado los momentos en los que las colas de las líneas 2 y 3 caen a cero, donde se pierde productividad.

De todas formas, parece que el transporte no se bloquea del todo, solo parcialmente como se ve en las oscilaciones en las colas que van entrando nuevas muestras, aunque de forma intermitente.

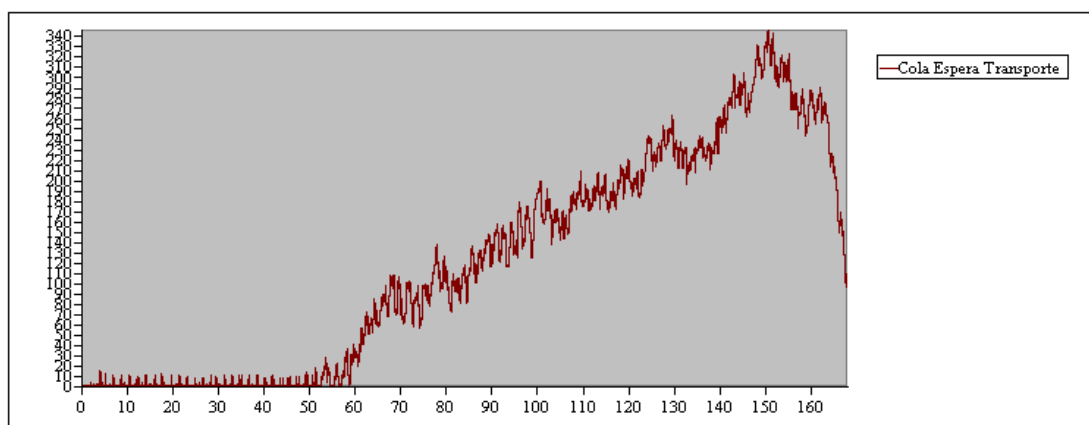


Figura 4. Evolución cola de inicio del transporte caso base

En el incremento de las colas de transporte se ve la relación con los momentos en los que las líneas se saturan, dejando intuir que la interrelación de las líneas puede suponer un problema frente alguna causa de variabilidad importante que el sistema no esté preparado para absorber.

2. Desarrollo del Escenario 0 (Con pruebas inter-día)

Hasta ahora, el modelo no representaba la realidad completa, al dejar de lado las pruebas que se realizan un día concreto, y cuya prioridad es similar a la de las pruebas urgentes. La adición de estas pruebas inter-día al modelo, incrementa la variabilidad.

Se añaden lotes de 150 muestras cada 24 horas, de manera que se simula un tipo de prueba específica cada día de la semana, en total 1050 muestras semanales.

Las muestras con pruebas inter-día son extraídas de golpe de la muestroteca dónde se almacenan, y los operarios una vez al día las introducen de golpe en la línea correspondiente. Esto tiene el efecto de saturar la máquina en la que se introduzcan, ya que se está introduciendo trabajo suficiente como para que la línea no pueda aceptar más muestras en un par de horas.

Esto bloquea el transporte, que a su vez bloquea las otras líneas, tirando la productividad a niveles inferiores.

En principio si no se tuviese en cuenta la variabilidad el sistema no debería cambiar mucho su comportamiento, introducir estas nuevas muestras ya que se ha reducido consecuentemente la otra entrada, de 12000 pruebas a 10950. Pero la realidad es que al aumentar tanto la variabilidad los resultados empeoran considerablemente al pasar al que será considerado el Escenario 0, con el que se comparen las medidas a cuantificar.

Escenario	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3
Caso Base Sin Interdía	10.667	0,95	0,95	0,94
Escenario 0	8.422	0,95	0,74	0,74
Variación	-21,05%	0,00%	-22,11%	-21,28%

Tabla 9. Comparación resultados base (1)

Escenario	Total Time	NW Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Caso Base Sin Interdía	13,36	119,36	2,63	161,68	135,34	80,79
Escenario 0	30,86	657,92	16,68	189,93	33,29	36,10
Variación	130,90%	451,21%	534,37%	17,47%	-75,40%	-55,32%

Tabla 10. Comparación resultados base (2)

El número de muestras procesadas decrece un 21,05%, que, si lo comparamos con la capacidad teórica, es una pérdida de más del 30%. Y no solo se reduce el output

del sistema, sino que se dispara el tiempo total en el sistema, y especialmente el tiempo total en el transporte.

En la Tabla 10. Comparación resultados base (2) se puede observar que el tiempo de espera al transporte se dispara un 535%, esto hace que no puedan llegar muestras a las líneas 2 y 3, donde la utilización y el tamaño de las colas caen considerablemente.

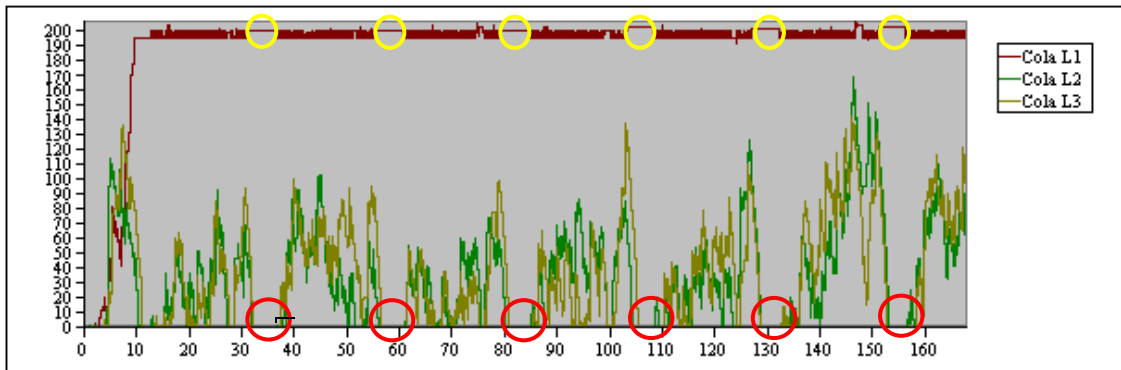


Figura 5. Evolución de las colas simulación Escenario 0

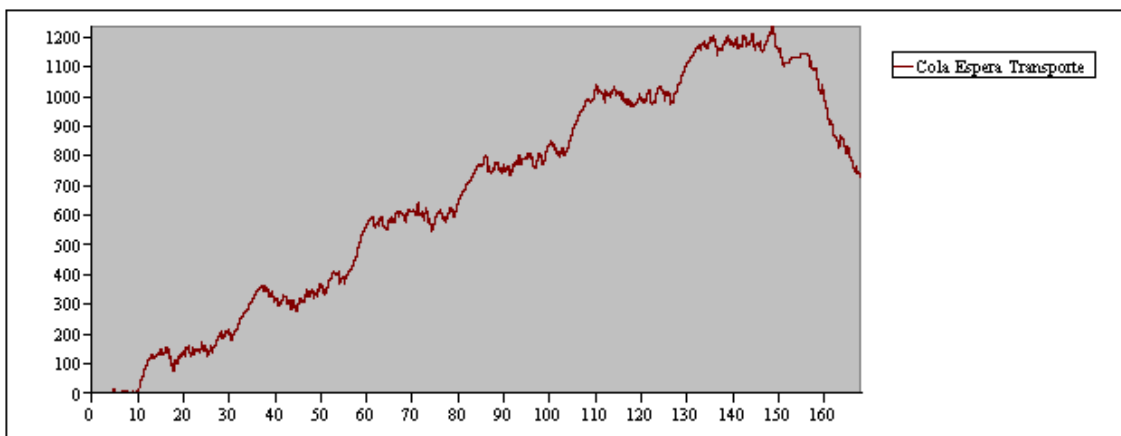


Figura 6. Evolución cola de Inicio del transporte Escenario 0

En las figuras anteriores se observa el efecto, al llegar las pruebas inter-día a la Línea 1, la cola alcanza su máximo que se mantiene durante un par de horas seguidas, el efecto es el bloqueo que sigue del transporte, y con un ligero retraso se vacía la cola de las otras líneas, a las que han dejado de llegarles muestras que procesar.

Se muestran señalados en amarillo en la parte superior los momentos de bloqueo, y sus consecuencias señaladas en rojo, las colas de las líneas 2 y 3 caen a 0 lo que supone una pérdida de productividad de varias horas.

En la cola del transporte el efecto es una subida a cada llegada de muestras inter-día, que se va incrementando por no haber podido procesar las anteriores, y que se consigue reducir tras haber procesado estos lotes. Este es el Escenario 0, el que se

pretende mejorar, para que el sistema absorba el cambio sin reducir drásticamente la productividad. Los resultados en detalle del Escenario son:

Input	Output		
Nº pruebas entran	12.000	Nº Pruebas salen	8.422
Tiempo entre llegadas (s)	48		
Cuántas mando cada vez	150		
Cada cuanto	24 h		

Tabla 11. Input/Output Escenario 0

Tiempos	Medio	Máximo
Tiempo medio en el sistema	30,86	91,88
Tiempo espera transporte	16,68	33,30

Tabla 12. Tiempos Escenario 0

Utilización	Inst. Utiliz.	Scheduled	Transporter	Utilización
Línea 1	0,95	0,99	Operario 1	6,02%
Línea 2	0,74	0,77	Operario 2	4,60%
Línea 3	0,74	0,77	Operario 3	4,80%

Tabla 13. Utilización de los recursos Escenario 0

Colas	Numero en cola		Tiempo espera (h)	
	Medio	Máximo	Medio	Máximo
Entrada Línea 1	189,93	206,00	3,13	8,32
Entrada Línea 2	33,29	169,00	0,55	3,14
Entrada Línea 3	36,10	143,00	0,59	1,79
Inicio Transporte	657,92	1.233,00	16,68	33,30
Prepar Lote transporte	4,38	13,00	0,03	4,31
Batch Salida L1	48,76	100,00	1,04	4,67
Batch Salida L2	48,18	100,00	1,18	6,65
Batch Salida L3	50,23	100,00	1,24	6,10

Tabla 14. Detalles de las colas Escenario 0

Las muestras se pasan de media 33 horas en el sistema hasta que son procesadas, de este tiempo más del 50% es esperando al transporte. La línea 1 está operando a su máxima capacidad, pero las otras están siendo desaprovechadas, por la pérdida de productividad. El problema parece que reside en la interacción entre las líneas, que se agrava, al someter a estrés al sistema, estrés que no es capaz de procesar.

4.2. Propuesta de escenarios de mejora

En esta sección se detallan las diferentes medidas adoptadas para la mejora del sistema, el procedimiento será seleccionar los parámetros a modificar, los KPIs para encontrar el caso óptimo, y el análisis detallado del mejor para cada medida aplicada.

Para el análisis se utilizará el Process Analyzer, aplicación que permite simular cambiando unos parámetros concretos distintos escenarios creados con el Software Arena.

Los KPIs seleccionados para comparar los distintos escenarios son:

- El número de muestras procesadas por el Sistema
- Utilización de las líneas de análisis clínico
- Tiempo total de una muestra en el sistema
- Tiempo de espera al primer tramo de transporte
- Número de muestras esperando al primer tramo de transporte
- Tamaño de las colas en las líneas de análisis clínico

1. Escenario 1: Reducción del tamaño del lote de muestras inter-día

Para mejorar los resultados del sistema mostrados en el Escenario 0, la primera medida que se toma es reducir el tamaño de los lotes de pruebas inter-día que se introducen en el sistema. Esto significa, que el operario en vez de meter las muestras a las que se les realizan las pruebas especiales del día en cuestión, de golpe y olvidarse, debe dividir estas muestras en lotes y en varias ocasiones a lo largo de su turno introducirlas en la línea.

La idea es que, al introducir un lote menor, el tiempo que se bloquea esta máquina y el transporte es menor, se disminuye la variabilidad introducida al separarla más en el tiempo. Por otro lado, el operario debe seguir operando la línea, no se puede ocupar solo de introducir estas muestras, debe seguir trasladando las pruebas urgentes y ordinarias y revisando errores. Se busca por tanto un compromiso para encontrar un tamaño de lote óptimo.

Los parámetros para este escenario son dos:

- Tamaño del lote de muestras inter-día
- Cada cuanto se introduce el lote

Estos dos parámetros están relacionados, ya que para que el número final de muestras inter-día, será proporcional al tamaño del lote, para que en total cada 24 horas se introduzcan 150 muestras en el sistema.

A medida que se reduce el tamaño del lote de muestras inter-día, el número de muestras que el sistema es capaz de procesar va aumentando, como se tenía previsto. Aun así, cuando este efecto se lleva al extremo, la utilización del operario 1 se dispara, y el efecto se anula, deja de ser conveniente disminuir más allá de diez muestras el tamaño del lote.

En el caso óptimo para este escenario 1, el operario debe dividir las 150 muestras que llegan al sistema en quince lotes de 10 que se introducirán en el sistema cada 90 minutos, es decir cada hora y media.

Parece razonable el esfuerzo extra que se le pide al operario, y el efecto sobre el sistema es disminuir el bloqueo producido por la interrelación entre las líneas causada por el tramo de transporte. Aun así, la mejora del sistema es reducida, y aunque ayuda al desempeño esta política de operación, se debe buscar alguna medida adicional que permita robustecer de manera efectiva el sistema.

Escenario	Cuantas	Cada Cuanto	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3
Caso Base	150	24	8.422	0,95	0,74	0,74
Escenario 1 Óptimo	10	1,5	8.688	0,95	0,76	0,76
Variación			3,16%	0,32%	2,57%	2,70%

Figura 7. Resultados caso óptimo Escenario 1 (1)

Escenario	Cuantas	Cada Cuanto	Total Time	NW Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Caso Base	150	24	30,86	657,92	16,68	189,93	33,29	36,10
Escenario 1 Óptimo	10	1,5	28,01	610,07	15,20	187,32	19,17	25,60
Variación			-9,22%	-7,27%	-8,88%	-1,37%	-42,40%	-29,08%

Figura 8. Resultados caso óptimo Escenario 1 (2)

En el mejor de los casos el output del sistema se incrementa en un 3%, y la utilización se incrementa ligeramente. Donde cambia la dinámica del sistema es cuando se mira el tiempo que pasa la muestra en el laboratorio de análisis, este tiempo disminuye casi un 10%, debido en gran parte a la reducción del tiempo de espera a transporte.

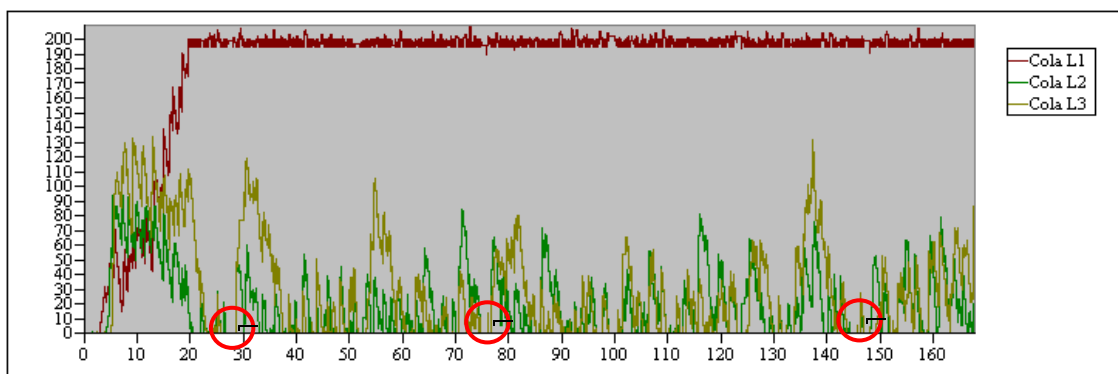


Figura 9. Evolución Colas pruebas ordinarias Escenario 1

La respuesta del sistema parece indicar lo que ya se veía en el Escenario 0, la Línea 1 al tener que procesar las pruebas inter-día se satura, interfiriendo con el transporte a las otras líneas.

En este caso el efecto es menor, y las pérdidas de producción más limitadas y de menor duración (señaladas en rojo en Figura 9. Evolución Colas pruebas ordinarias Escenario 1), dado que, al reducir el tamaño del lote, sea reducido el impacto sobre el sistema, pero a pesar de que siguen entrando pruebas al sistema, el transporte está parcialmente bloqueado y la utilización de las líneas 2 y 3 lo demuestran.

Para comprender mejor el caso presentado como óptimo del escenario 1, se desglosan algunos datos extraídos de los resultados de la Simulación:

Input		Output	
Nº pruebas entran	12.000	Nº Pruebas salen	8.688
Tiempo entre llegadas (s)	48		
Vacía antes	10		
Bloquea durante	1,5 h		

Tabla 15. Input/Output Caso Óptimo Escenario 1

Utilización	Inst. Utiliz.	Scheduled	Transporter	Utilización
Línea 1	0,95	0,99	Operario 1	9,40%
Línea 2	0,76	0,79	Operario 2	4,80%
Línea 3	0,76	0,80	Operario 3	4,80%

Tabla 16. Utilización Líneas Caso Óptimo Escenario 1

Se debe tener en cuenta que los operarios que operan las diferentes líneas de análisis tienen tareas analíticas además de las directamente relacionadas con el funcionamiento del laboratorio, por tanto, una utilización excesivamente alta de los mismos debería ser descartada, por incompatible con la realidad.

El output del sistema aumenta tras realizar 10 repeticiones del escenario, durante una semana de duración, en 266 muestras semanales. Esto implica un incremento anual de cerca de 14000 muestras, debido simplemente a un cambio en la forma de trabajo de los operarios, a un cambio en la introducción de las muestras en el sistema.

2. Escenario 2: Vaciado previo de la línea

La siguiente medida ideada para desahogar el transporte, y mitigar el efecto de contagio de la saturación de una línea de análisis a las demás, consiste en un control del número de muestras en el buffer interno de la línea 1, a la que llegarán las muestras inter-día.

Para controlar el inventario de las máquinas de la línea 1, se corta el flujo de muestras hacia la línea 1, con antelación a la hora a la que se sabe que llegarán las muestras inter-día. Es decir, se vacía la línea para que no se bloquee, durante un cierto número de horas, y se mantiene libre para procesar pruebas urgentes e inter-día durante otro número determinado de horas.

El estudio de esta medida se tomará como Escenario 2. Parece que, si se para el flujo de muestras mencionado, en el transporte solo habrá pruebas destinadas a las líneas 2 y 3 por lo que la utilización de estas aumentará, mejorando el output del sistema. Siempre que se consiga seguir alimentando la línea 1 por debajo de la capacidad del buffer interno de las máquinas (200 muestras)

Los parámetros sobre los que se actúa en este escenario son:

- El número de horas de antelación con el que se paran de enviar muestras a la línea 1.
- Durante cuantas horas se bloquea la Línea 1 tras la llegada de las pruebas inter-día.

Combinando ambos parámetros, se pretende conseguir un sistema que se adapta y se adelanta a las perturbaciones, de manera que mitiga sus efectos.

Escenario	Vacía Antes	Bloquea Durante	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3
Escenario 0	-	-	8422	0,950	0,740	0,740
Escenario 2.1	2,00	1,00	8843	0,952	0,796	0,800
Escenario 2.2	2,00	2,00	8591	0,930	0,809	0,821
Escenario 2.3	1,00	1,00	8661	0,952	0,785	0,794
Escenario 2.4	3,00	1,00	8811	0,935	0,814	0,819
Escenario 2.5	2,00	1,00	8819	0,949	0,818	0,821
Escenario 2.6	2,00	2,00	8677	0,927	0,819	0,814
Escenario 2.7	1,00	1,00	8700	0,952	0,795	0,794
Escenario 2.8	3,00	1,00	8912	0,950	0,810	0,813
Escenario 2.9	2,00	3,00	8293	0,897	0,790	0,812
Escenario 2.10	3,00	2,00	8593	0,915	0,805	0,800
Escenario 2.11	2,75	1,00	8819	0,949	0,818	0,821
Escenario 2.12	4,00	1,00	8566	0,903	0,825	0,827
Escenario 2.13	3,00	0,00	8710	0,948	0,801	0,810
Escenario 2.14	2,50	1,00	8819	0,949	0,818	0,821

Tabla 17. Análisis Escenario 2 (1)

Escenario	Vacía Antes	Bloquea Durante	NW Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Escenario 0	-	-	657,920	16,684	189,930	33,288	36,099
Escenario 2.1	2,00	1,00	502,042	12,950	164,807	86,304	80,651
Escenario 2.2	2,00	2,00	525,219	13,489	140,385	100,986	99,861
Escenario 2.3	1,00	1,00	546,217	14,014	170,341	85,011	84,642
Escenario 2.4	3,00	1,00	499,402	12,858	139,002	99,283	103,966
Escenario 2.5	2,00	1,00	483,590	12,264	155,210	90,008	100,449
Escenario 2.6	2,00	2,00	480,126	12,412	146,125	99,832	101,496
Escenario 2.7	1,00	1,00	532,206	13,544	181,401	75,980	82,389
Escenario 2.8	3,00	1,00	445,589	11,189	147,550	108,471	107,474
Escenario 2.9	2,00	3,00	512,103	13,171	144,271	84,572	108,059
Escenario 2.10	3,00	2,00	459,798	11,761	137,770	104,706	95,554
Escenario 2.11	2,75	1,00	483,590	12,264	155,210	90,008	100,449
Escenario 2.12	4,00	1,00	466,992	12,040	130,248	111,600	114,446
Escenario 2.13	3,00	0,00	493,468	12,545	155,668	91,933	101,101
Escenario 2.14	2,50	1,00	483,590	12,264	155,210	90,008	100,449

Tabla 18. Análisis Escenario 2 (2)

Tras analizar el Escenario 2, variando la antelación con la que se vacía la línea, y el tiempo durante el cual se mantiene bloqueada, se extraen los siguientes resultados:

El tiempo necesario para que se procesen las muestras de la cola, y la línea esté lista para recibir el lote de 150 muestras inter-día es de alrededor de 3 horas.

Tiene sentido si se tiene en cuenta que la cola puede ser de hasta 200 muestras con un tiempo de procesamiento de 6 minutos por prueba, 1,3 pruebas por línea y que se procesan las pruebas de 10 en 10 en la línea, ya que se tienen 10 máquinas. A esto hay que sumarle el retraso que se tiene desde que se da la orden de parar el flujo, hasta que este efectivamente para.

El mejor de los casos corresponde a el vaciado las tres horas previas a la llegada de las muestras inter-día, y reactivar el flujo una hora después de su llegada. Como se observa en las tablas anteriores, bloquear durante más de 2 horas empeora el desempeño, ya que el sistema tarda demasiado en volver a ponerse en marcha, la dinámica del transporte retrasa la reactivación de las máquinas, y se pierde productividad.

Escenario	Vacía Antes	Bloquea Durante	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3
Escenario 0	0	0	8.422	0,95	0,74	0,74
Escenario 2 Óptimo	3	2	8.912	0,95	0,81	0,81
Variación			5,82%	0,00%	9,46%	9,86%

Tabla 19. Resultados Caso Óptimo Escenario 2 (1)

Escenario	Vacía Antes	Bloquea Durante	Total Time	NQ Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Escenario 0	0	0	30,86	657,92	16,68	189,93	33,29	36,10
Escenario 2 Óptimo	3	2	25,68	445,59	11,19	147,55	108,47	107,47
Variación			-16,78%	-32,27%	-32,94%	-22,31%	225,85%	197,72%

Tabla 20. Resultados Caso Óptimo Escenario 2 (2)

Con la medida implantada, se incrementa el output del sistema en torno a un 6%, efecto es mayor que el obtenido en el Escenario 1, aunque implicaría un cambio en el software del distribuidor automático, cambiar el programa lógico que rige la automatización.

Se reduce en 5 horas el tiempo de estancia en el sistema, y se reduce en un tercio el tiempo de espera al transporte, parece que se mitiga la interrelación entre las líneas, al evitar o disminuir el estrangulamiento del transporte.

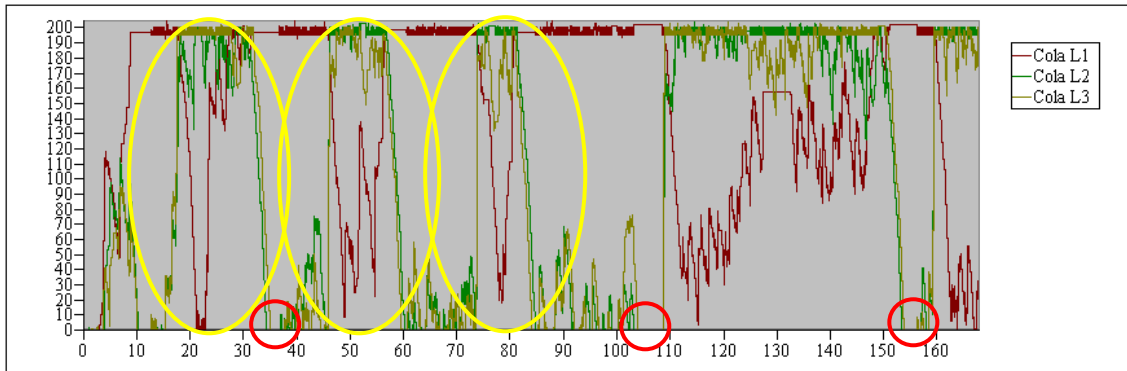


Figura 10. Evolución Colas de las Líneas Escenario 2

En la Figura 10. Evolución Colas de las Líneas Escenario 2, se ha resaltado en amarillo los momentos en los que se vacía la cola de la línea 1, previo a la llegada de los lotes inter-día que vuelven a elevar la cola rápidamente, esto evita el bloqueo y los momentos de pérdida de productividad son menores que los escenarios anteriores, aun así, no se consiguen mitigar todos estos momentos de estrangulamiento (señalados en rojo).

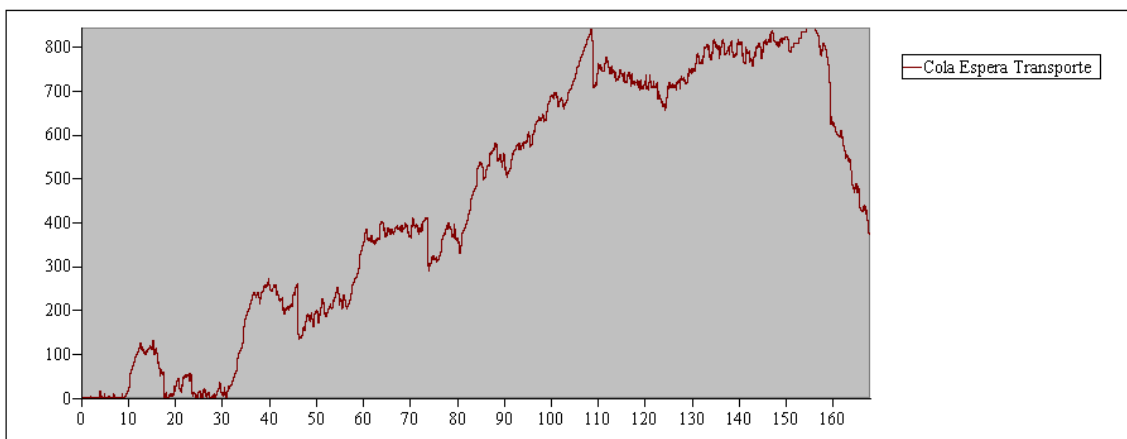


Figura 11. Evolución de cola inicio del transporte Escenario 2

La llegada de las muestras inter-día se aprecian perfectamente en los picos en la cola de espera al transporte, especialmente al inicio de la simulación, momento en el que es la dinámica dominante en el sistema.

Con esta medida se consigue un incremento en el número de muestras procesadas de 490 (+5.82%) semanales, esto significa alrededor de 25000 muestras más procesadas anualmente. Con una reducción del tiempo total en el sistema de 5 horas.

Los resultados del Escenario 2 son:

Input		Output	
Nº pruebas entran	12.000	Nº Pruebas salen	8.912
Tiempo entre llegadas (s)	48		
Vacía antes	3		
Bloquea durante	1 h		

Tabla 21. Input/Output Caso Óptimo Escenario 2

Tiempos	Medio	Máximo
Tiempo medio en el sistema	25,68	76,47
Tiempo espera transporte	11,19	24,22

Tabla 22. Tiempos Caso Óptimo Escenario 2

Utilización	Inst. Utiliz.	Scheduled	Transporter	Utilización
Línea 1	0,95	0,99	Operario 1	6,05%
Línea 2	0,81	0,84	Operario 2	4,90%
Línea 3	0,81	0,85	Operario 3	4,76%

Tabla 23. Utilización Líneas Caso Óptimo Escenario 2

3. Escenario 3: Combinación de Escenarios 1 y 2

Hasta el momento, las dos medidas propuestas para elevar el cuello de botella en el sistema que constituye la interrelación entre las líneas de operación, que hace que la capacidad real se aleje de la teórica, han ayudado a fortalecer el sistema.

Logran que el desequilibrio del sistema sea menor, y que se distribuya de forma más equitativa la utilización de las líneas, reduciendo el tiempo en el sistema.

Parece lógico intentar combinar ambos efectos, aprovechar la combinación de lotes más pequeños de pruebas inter-día, con cortes en el flujo hacia la línea saturada. Se varían los parámetros de los escenarios 1 y 2, para intentar buscar un modo de operación que incremente de forma considerable la productividad del sistema.

Al combinar la reducción de los lotes de muestras inter-día, con el control del buffer de la línea 1 en función a la hora a la que se introducen en la línea estos mismos lotes, tiene sentido esperar que haga falta vaciar la línea con menor antelación, ya que el desequilibrio ha sido menor.

Los resultados no van en este sentido, sí que mejora el output al combinar ambos efectos, pero, el mejor de los escenarios simulados se obtiene al dividir el lote de 150 muestras en dos de 75, y con un vaciado de la línea con 3 horas de antelación bloqueándola durante 2 horas.

En el Escenario 2 no se conseguía eliminar completamente los períodos sin productividad de las líneas 2 y 3, quizás por eso en este escenario con un lote menor y bloqueando durante un periodo más largo de tiempo si se logre, consiguiendo que la línea 1 siga alimentada.

Escenario	Cuantas	Cada Cuanto	Vacía Antes	bloquee Durante	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3
Caso Base	150	24	0	0	8.422	0,95	0,74	0,74
Escenario 3 Óptimo	75	12	3	2	9.285	0,95	0,86	0,86
Variación					10,25%	0,32%	16,08%	16,35%

Tabla 24. Resultados Caso Óptimo Escenario 3 (1)

Escenario	Cuantas	Cada Cuanto	Vacía Antes	bloquee Durante	Total time	NW Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Caso Base	150	24	0	0	30,86	657,92	16,68	189,93	33,29	33,29
Escenario 3 Óptimo	75	12	3	2	22,04	346,31	8,77	186,02	84,50	83,17
Variación					-28,57%	-47,36%	-47,43%	-2,06%	153,83%	149,86%

Tabla 25. Resultados Caso Óptimo Escenario 3 (2)

La capacidad del sistema aumenta en 10.25%, se incrementa la utilización de las líneas 2 y 3. El tiempo total en el sistema se reduce casi en un 30%, y el tiempo de espera al transporte se reduce en la mitad.

Se procesan 863 muestras semanales más, respecto al caso base, un incremento de 40000 muestras anuales con una modificación del software sin cambios físicos en el sistema y variando la política de operación.

Parece que el problema al añadir las muestras inter-día se reduce, la caída de la capacidad se suaviza a la mitad.

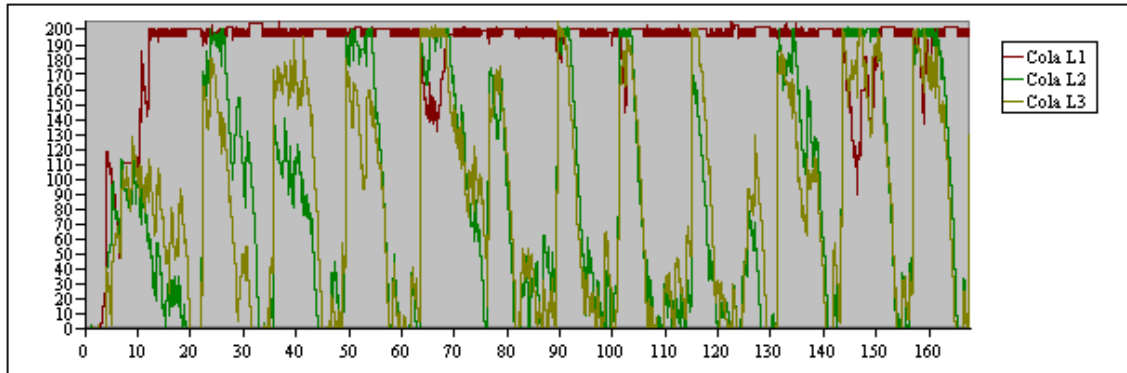


Figura 12. Evolución de las colas en las líneas Escenario 3

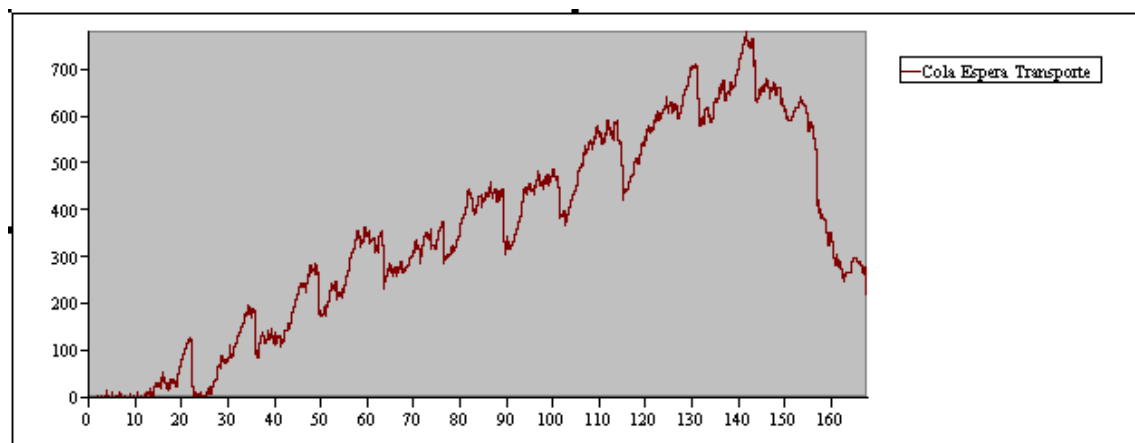


Figura 13. Evolución de cola de espera al transporte Escenario 3

La dinámica del sistema se aprecia en la evolución de las colas, se observa que en los momentos en los que se vacía la L1, entran muestras a las líneas 2 y 3, aumenta la cola en estas líneas rápidamente, lo que da material para procesar mientras la línea 1 vuelva a bloquear el transporte.

De esta forma se consigue que los períodos en los que alguna línea no recibe alimentación sean mucho más cortos e infrecuentes.

En la cola de transporte también se ve reflejado el efecto de la subida y bajada en el inventario de las líneas con la llegada de los lotes.

Los resultados del Escenario 3 son:

Input		Output	
Nº pruebas entran	12.000	Nº Pruebas salen	9.285
Tiempo entre llegadas (s)	48		
Cuántas mando cada vez	75	Vacía antes	3
Cada cuanto	12	Bloquea Durante	2

Tabla 26. Input/Output Caso Óptimo Escenario 3

Tiempos	Medio	Máximo
Tiempo medio en el sistema	22,04	63,28
Tiempo espera transporte	8,77	18,25

Tabla 27. Tiempos Caso Óptimo Escenario 3

Utilización	Inst. Utiliz.	Scheduled	Transporter	Utilización
Línea 1	0,95	0,99	Operario 1	6,31%
Línea 2	0,86	0,89	Operario 2	5,06%
Línea 3	0,86	0,90	Operario 3	5,04%

Tabla 28. Utilización Recursos Caso Óptimo Escenario 3

4. Escenario 4: Modificación de la disposición del transporte

Hasta ahora las medidas propuestas no modificaban la distribución de las líneas ni del transporte, el “layout” del sistema se mantenía, se modificaba el comportamiento de los operarios en primer lugar, y el software de distribución del sistema.

Para este escenario se analizará el impacto de cambiar de un transporte secuencial a las distintas líneas, a uno en el que se acceda a cada línea de forma independiente, a un transporte en estrella.

Se pretende eliminar la interrelación entre las líneas, convirtiéndolas en recursos independientes, solucionando el problema detectado en el diagnóstico del sistema.

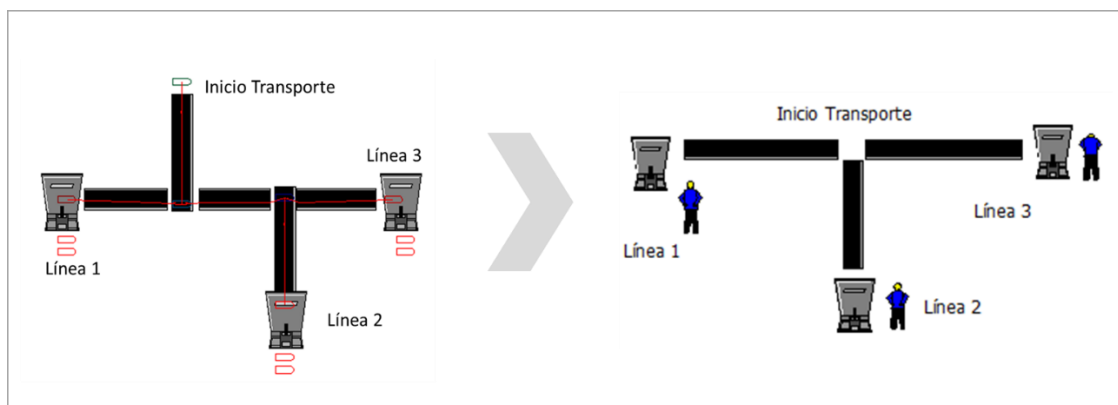


Figura 14. Cambio en la distribución del transporte

Escenario	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3	Total time	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Escenario 0	8.422	0,95	0,74	0,74	30,86	189,93	33,29	33,29
Escenario 4	10.145	0,95	0,86	0,85	20,48	190,36	48,47	38,95
Variación	20,46%	0,00%	16,22%	14,86%	-33,63%	0,23%	45,61%	17,00%

Tabla 29. Comparación Resultados Escenario 0 y Escenario 4

El sistema responde al cambio con el mayor número de muestras obtenidas hasta ahora, ya no se produce ahogamiento en el sistema.

El incremento de la capacidad en un 20.46% hace que la situación sea muy parecida a la obtenida antes de introducir el efecto de las muestras inter-día, es decir, el sistema absorbe con éxito la perturbación.

Este incremento de 1720 muestras semanales supone 90000 pruebas anuales más procesadas, al cambiar el transporte. Se reduce el tiempo en el sistema en un tercio, y se aumenta la utilización de las líneas 2 y 3.

Se debe tener en cuenta que la capacidad máxima que el sistema podría alcanzar se redujo al introducir las muestras inter-día, se pasa de una distribución equitativa entre las líneas a otra en la que la capacidad de la línea 1 se haya reducida. Ahora al sistema entran significativamente más muestras que a las otras líneas, por lo que las otras líneas de manera inevitable tienen un exceso de capacidad que no se puede aprovechar.

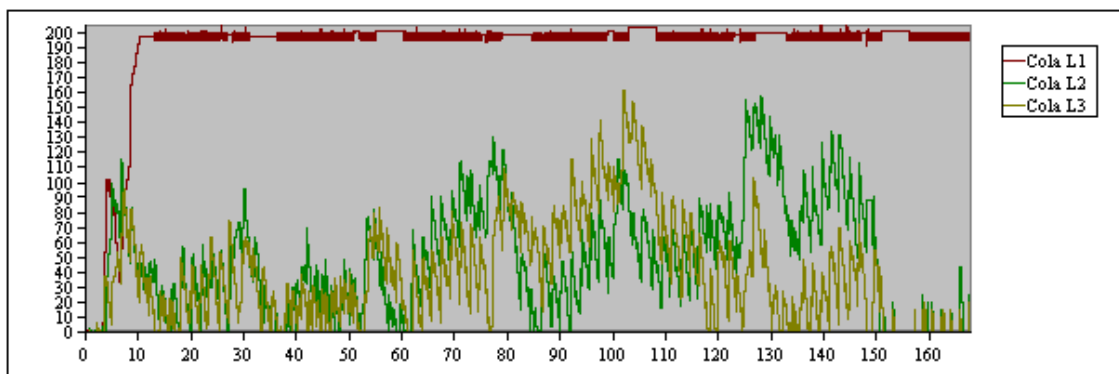


Figura 15. Evolución de las colas Escenario 4

Las líneas son ahora independientes, el efecto se aprecia en las Figura 15. Evolución de las colas Escenario 4, ya no hay relación entre la llegada del lote de muestras inter-día y la caída en las colas de las líneas adyacentes.

La interacción entre las líneas ahora está limitada a la realimentación que se produce entre ellas. Dado que las muestras pueden realizar pruebas en distintas líneas, parte de las pruebas que salen de cada una de las líneas, irán como input de las otras.

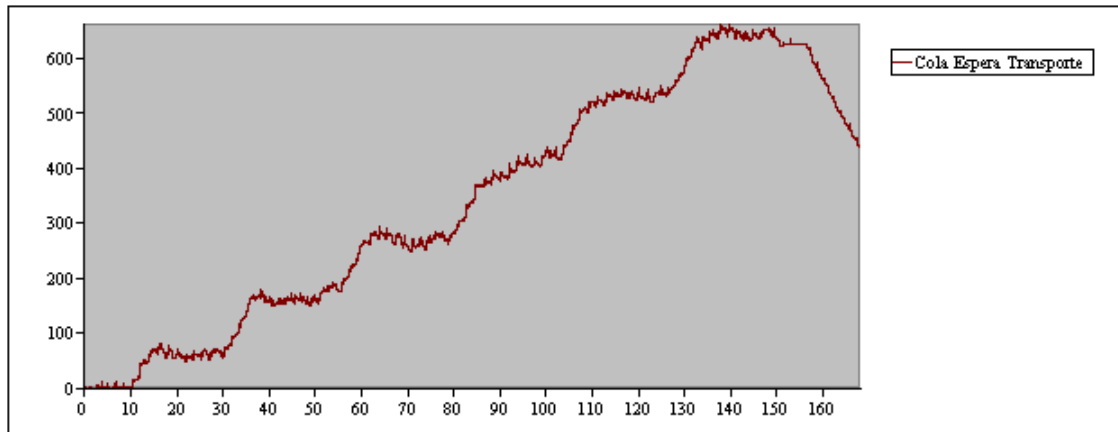


Figura 16. Evolución colas de espera al transporte

En este caso la cola de espera al transporte en el modelo se distribuye en tres bloques, los de llamada al tramo de transporte correspondiente.

Físicamente el distribuidor automático necesita el espacio para almacenar todas las muestras que esperan a que su tramo de transporte quede libre.

En esta cola también se nota el efecto de cada llegada diaria del lote de muestras inter-día. Los resultados en detalle del Escenario 4 se muestran a continuación:

Input		Output	
Nº pruebas entran	12.000	Nº Pruebas salen	10.145
Tiempo entre llegadas (s)	48		

Tabla 30. Input/Output Escenario 4

Utilización	Inst. Utiliz.	Scheduled	Transporter	Utilización
Línea 1	0,95	0,99	Operario 1	6,16%
Línea 2	0,86	0,89	Operario 2	4,92%
Línea 3	0,85	0,88	Operario 3	4,92%

Tabla 31. Tiempos Escenario 4

La capacidad teórica que se tiene en el sistema se puede recalcular dado que la línea 1 procesa mayor número de muestras que las demás. En la línea 1, hay 10 máquinas que trabajan 23 horas al día toda la semana.

Esto son 96600 minutos de operación semanales. De este tiempo operativo dedica 19530 minutos a procesar las muestras inter-día (1050 muestras * 6 min/prueba * 3.1 prueba). Lo que resulta en 77070 minutos restantes para pruebas ordinarias.

Si cada prueba ordinaria tarda de media 6 minutos, y se realizan 1,3 pruebas de media en la Línea 1, se obtiene una capacidad de 9880 muestras, que añadidas a las 1050 inter-día, resulta en una capacidad de 10930 muestras semanales.

Con este cambio en el diseño del sistema de transporte del laboratorio, se podría trabajar con un 92% de la capacidad teórica del sistema.

En el Escenario 0 el sistema conseguía un output del 77% de la capacidad teórica, se ha reducido la pérdida asociada a la variabilidad operativa de un 23% a un 8%, un cambio muy significativo, que refleja un error en el diseño del sistema.

5. Comparación del Caso Base con el Escenario 4 sin muestras inter-día

En teoría, con la nueva distribución del transporte, el sistema debería adaptarse mejor a cualquier perturbación provocada por alguna llegada de muestras de distribución poco homogénea, el sistema debería ser más robusto.

Es interesante comparar cómo se comporta sin el efecto de los lotes de muestras inter-día, comparándolo con el caso base, para comparar respecto a la capacidad teórica del sistema como es el rendimiento de ambas distribuciones, y las diferencias encontradas. ¿El diseño del laboratorio afecta también sin esta causa de variabilidad adicional que constituyen las muestras inter-día?

Escenario	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3	Total Time
Caso Base*	10.667	0,95	0,95	0,94	13,36
Escenario 4*	10.863	0,95	0,95	0,95	11,96
Variación	1,84%	0,00%	0,00%	1,06%	-10,51%

*Sin Inter-día

Tabla 32. Comparación Caso Base y Escenario 4, resultados (1)

Escenario	NW Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Caso Base*	119,36	2,63	161,68	135,34	80,79
Escenario 4*	34,80	2,29	131,27	149,68	169,00
Variación	-70,84%	-13,08%	-18,81%	10,60%	109,18%

Tabla 33. Comparación Caso Base y Escenario 4, resultados (2)

Al modificar el transporte, la situación mejora, se reduce el tiempo de transporte y el tiempo de las muestras en el sistema.

En el Caso Base a pesar de que no llegaban a bloquearse las líneas, si llegaban cerca de la saturación provocando retrasos en el transporte. El número de muestras en cada cola no es significativo, ya que depende mucho de las variables aleatorias de la simulación. Pero en la evolución de las colas sí que se ven diferencias entre ambos casos.

En las siguientes figuras se observa la Evolución de las colas:

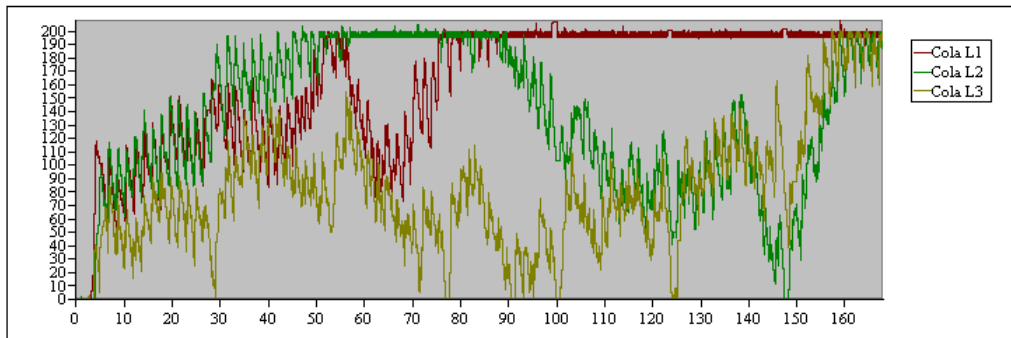


Figura 17. Evolución de las colas Caso Base sin Inter-día

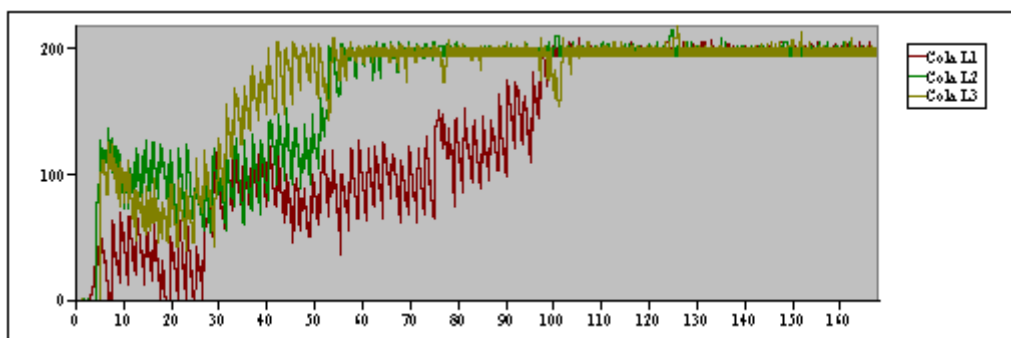


Figura 18. Evolución de las colas Escenario 4 sin Inter-día

Se observa como en el Caso Base, con la subida de una de las colas las otras decrecen rápidamente, haciendo que si la saturación es suficiente se pierda productividad. En el Escenario 4 sin embargo se ve como la evolución de las colas es independiente, se ha perdido la relación existente, haciendo que mejore el desempeño.

Por tanto, la distribución del transporte sigue afectando, aún sin la añadir las pruebas inter-día, existe un fallo en el diseño del sistema.

Otros factores como la utilización de los operarios, o los tiempos de espera para los lotes no se ven afectados por este cambio, solo lo relativo al transporte y a la utilización de las líneas.

El laboratorio con un sistema de transporte como el diseñado en el Escenario 4 está mejor preparado para afrontar perturbaciones en el sistema, es más robusto.

6. Escenario 5: Variación del tamaño de los racks Urgentes y de Salida

En los sistemas productivos, los lotes son una de las fuentes de variabilidad, encontrar un tamaño óptimo de lote no es trivial dependiendo de la aplicación, el tamaño de lote se convierte en una variable adicional que no existe en los sistemas continuos. [6]

En el sistema modelado, se tienen tres tamaños de lotes diferentes, primero el de las muestras inter-día, cuya variación ya se estudió en el escenario 1. Después están las bandejas de salida de las líneas de análisis, y finalmente los lotes de pruebas urgentes que se van introduciendo en las líneas.

En este escenario el procedimiento es el siguiente, se variará el tamaño de las bandejas de salida de las líneas, y se analizará el impacto. A continuación, se hará lo mismo con el tamaño de los lotes urgentes, y finalmente se combinarán ambos efectos para buscar el resultado óptimo.

Se actuará sobre los parámetros “vBatchSalida”, y “vBatchUrgente”.

En primer lugar, se varía el tamaño del lote de salida. En principio mientras menor sea el lote, antes seguirán las muestras al resto del sistema, y el output mejorará. Sin embargo, si el lote es demasiado pequeño, la utilización del operario puede suponer un problema, haciendo la reducción del lote perjudicial.

Escenario	Batch Salida 1	Batch Salida 2	Batch Salida 3	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3	Util. O1	Util. O2	Util. O3
Escenario 0	100	100	100	8.422	0,953	0,742	0,744	6,00%	4,60%	4,80%
Escenario 5.1	80	80	80	8.452	0,953	0,749	0,748	6,60%	5,00%	4,90%
Escenario 5.2	50	50	50	8.586	0,955	0,759	0,748	8,70%	6,10%	6,10%
Escenario 5.3	20	20	20	8.677	0,959	0,760	0,753	17,70%	10,20%	10,20%
Escenario 5.4	120	120	120	8.371	0,950	0,742	0,736	5,70%	4,60%	4,40%
Escenario 5.5	150	150	150	8.352	0,949	0,745	0,743	5,10%	4,10%	4,10%
Escenario 5.6	200	200	200	8.165	0,947	0,742	0,740	4,90%	4,10%	4,00%
Escenario 5.7	10	10	10	8.439	0,958	0,733	0,729	33,20%	16,70%	16,70%
Escenario 5.8	30	20	20	8.616	0,959	0,750	0,748	12,50%	10,30%	10,20%

Tabla 34. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los lotes de salida (1)

Escenario	Batch Salida 1	Batch Salida 2	Batch Salida 3	NW Transporte	WT Transporte	Total Time	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Escenario 0	100	100	100	657,922	16,684	30,857	189,93	33,29	36,10
Escenario 5.1	80	80	80	662,692	16,667	30,281	190,70	34,74	33,70
Escenario 5.2	50	50	50	635,502	15,633	28,586	191,82	35,57	29,65
Escenario 5.3	20	20	20	647,897	15,498	27,672	190,63	31,33	30,70
Escenario 5.4	120	120	120	635,087	16,131	30,030	190,15	33,06	34,96
Escenario 5.5	150	150	150	662,461	16,812	32,681	189,72	39,41	41,26
Escenario 5.6	200	200	200	686,244	17,536	34,545	189,07	55,97	43,66
Escenario 5.7	10	10	10	703,171	17,006	28,467	190,57	23,61	20,96
Escenario 5.8	30	20	20	661,618	16,284	28,658	190,26	27,64	19,77

Tabla 35. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los lotes de salida (2)

Se puede observar en las tablas anteriores como, al incrementar el tamaño del lote el sistema reduce su productividad, al reducirlo la situación mejora progresivamente, hasta que, al probar el tamaño de 10 muestras, la utilización del operario uno se incrementa hasta un 33%, y empeora de nuevo la situación.

El sistema responde mejor a la reducción del tamaño de los lotes de salida a 50 o 20. Es una reducción considerable del tamaño inicial que era 100. Para comprobar si es razonable esta frecuencia, se calcula el tiempo medio entre lotes de salida, que sería en el caso de que la línea produzca constantemente: 50 muestras en diez máquinas, que tardan por prueba 6 minutos de media, y que hacen 1.3 pruebas por la máquina de media, por tanto, un lote cada 40 minutos más o menos, cosa que parece razonable. Para el caso de 20, en torno a 15 minutos, frecuencia que podría ser más problemática en función a las otras tareas del operario.

El siguiente paso es variar los lotes urgentes, la intuición es la misma, mientras más fluido sea el flujo de muestras a la línea mejor, pero al estar el operario 1 encargado de este transporte, puede que el tamaño óptimo no sea el menor. El punto de partida es de lotes pequeños de 5 muestras.

Escenario	Batch Urgente 1	Batch Urgente 2	Batch Urgente 3	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3	Util. O1	Util. O2	Util. O3
Escenario 0	5	5	5	8.422	0,953	0,742	0,744	6,00%	4,60%	4,80%
Escenario 5.1	10	10	10	8.514	0,952	0,745	0,761	4,40%	3,00%	3,10%
Escenario 5.2	20	20	20	8.507	0,952	0,748	0,751	3,80%	2,20%	2,20%
Escenario 5.3	50	50	50	8.393	0,952	0,743	0,744	3,40%	1,70%	1,70%
Escenario 5.4	10	5	5	8.555	0,953	0,740	0,758	4,40%	4,70%	4,70%
Escenario 5.5	5	10	10	8.367	0,953	0,741	0,741	6,10%	3,10%	3,10%
Escenario 5.6	20	5	5	8.390	0,953	0,737	0,749	3,70%	4,80%	4,70%
Escenario 5.7	5	20	20	8.350	0,953	0,739	0,747	6,00%	2,20%	2,20%
Escenario 5.8	20	10	10	8.339	0,953	0,740	0,722	3,70%	3,00%	3,00%
Escenario 5.9	50	5	5	8.470	0,953	0,743	0,754	3,40%	4,70%	4,70%
Escenario 5.10	1	1	1	8.359	0,953	0,742	0,741	19,30%	17,80%	17,40%

Tabla 36. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los lotes urgentes (1)

Escenario	Batch Urgente 1	Batch Urgente 2	Batch Urgente 3	NW Transporte	WT Transporte	Total Time	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Escenario 0	5	5	5	657,922	16,684	30,857	189,93	33,29	36,10
Escenario 5.1	10	10	10	637,175	16,076	30,410	190,24	35,13	39,23
Escenario 5.2	20	20	20	645,231	16,241	30,612	189,35	32,52	34,31
Escenario 5.3	50	50	50	636,820	15,884	30,895	189,51	33,49	40,47
Escenario 5.4	10	5	5	609,350	15,369	29,062	190,51	28,21	35,47
Escenario 5.5	5	10	10	702,469	18,021	32,950	189,84	35,33	35,75
Escenario 5.6	20	5	5	649,251	16,408	29,727	189,99	33,06	32,89
Escenario 5.7	5	20	20	656,803	16,636	30,519	189,35	28,22	32,63
Escenario 5.8	20	10	10	658,587	16,699	30,580	190,95	31,70	29,95
Escenario 5.9	50	5	5	622,690	15,681	29,557	189,55	37,87	39,33
Escenario 5.10	1	1	1	687,749	17,341	31,365	189,83	38,39	33,56

Tabla 37. Resultados obtenidos al variar el tamaño de los urgentes (2)

La metodología seguida para encontrar el tamaño de lote óptimo es la siguiente: Comenzar aumentando el tamaño del lote, hasta que la situación no mejore, probar a reducir el tamaño de lote y observar el efecto que provoca, y por último variar el tamaño de los mejores lotes para diferenciar entre la línea 1 y las líneas 2 y 3.

Con estos escenarios simulados se tiene que el tamaño del lote óptimo para los urgentes, manteniendo los lotes de salida en su tamaño inicial, es de 10 muestras el de la línea 1 (el operario de la L1 tiene mayor utilización), y 5 el de las líneas 2 y 3.

Debido a la diferencia de utilización, parece que, para la línea 1 conviene que el operario haga menos viajes a pesar de que la llegada a la línea sea más escalonada, y para las otras líneas es mejor una llegada más fluida.

La utilización de los operarios se dispara como es lógico, si se pretende que introduzca cada muestra urgente a medida que llega.

El impacto sobre el sistema del tamaño de lote de la salida es mayor que el impacto del tamaño de los lotes urgentes. Se va a intentar combinar los mejores casos encontrados, para encontrar los tamaños con los que el sistema logra mayor salida de muestras.

Escenario	Batch Urgente 1	Batch Urgente 2	Batch Urgente 3	Batch Salida 1	Batch Salida 2	Batch Salida 3	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3	Util. O1	Util. O2	Util. O3
Escenario 0	5	5	5	100	100	100	8.422	0,953	0,742	0,744	6,00%	4,60%	4,80%
Escenario 5.1	10	5	5	20	20	20	8.407	0,958	0,748	0,737	16,70%	10,10%	10,00%
Escenario 5.2	10	5	5	50	50	50	8.501	0,956	0,744	0,754	7,40%	6,10%	6,10%
Escenario 5.3	10	10	10	20	20	20	8.597	0,959	0,755	0,762	16,80%	8,60%	8,60%
Escenario 5.4	10	5	5	30	20	20	8.690	0,958	0,763	0,748	11,50%	10,40%	10,30%
Escenario 5.5	10	5	5	50	20	20	8.540	0,958	0,733	0,734	7,30%	10,00%	9,90%
Escenario 5.6	10	5	5	40	20	20	8.487	0,958	0,744	0,749	8,90%	10,10%	10,10%

Tabla 38. Resultados combinatorios del Escenario 5 (1)

Escenario	Batch Urgente 1	Batch Urgente 2	Batch Urgente 3	Batch Salida 1	Batch Salida 2	Batch Salida 3	NW Transporte	WT Transporte	Total Time	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Escenario 0	5	5	5	100	100	100	657,922	16,684	30,857	189,93	33,29	36,10
Escenario 5.1	10	5	5	20	20	20	699,278	17,239	29,338	189,76	28,16	17,50
Escenario 5.2	10	5	5	50	50	50	657,507	16,446	28,971	191,54	24,17	26,23
Escenario 5.3	10	10	10	20	20	20	649,656	16,172	28,201	190,01	26,42	35,80
Escenario 5.4	10	5	5	30	20	20	641,702	15,662	27,695	191,69	27,85	24,13
Escenario 5.5	10	5	5	50	20	20	666,917	16,177	28,537	189,66	21,92	27,42
Escenario 5.6	10	5	5	40	20	20	678,859	16,950	28,675	190,63	21,49	25,28

Tabla 39. Resultados combinatorios del Escenario 5 (2)

El mejor de los casos analizados durante el Escenario 5, combina los tamaños de lote de manera que mejora al disminuir el tamaño de los racks de salida, y aumentar el tamaño del lote que se introduce de muestras urgentes en la Línea 1.

En cualquier caso, estas medidas tienen un impacto limitado en el sistema, tendría sentido aplicarlas conjuntamente a alguno de los otros escenarios que consiguen descongestionar el sistema de transporte, y limitar la interrelación entre líneas.

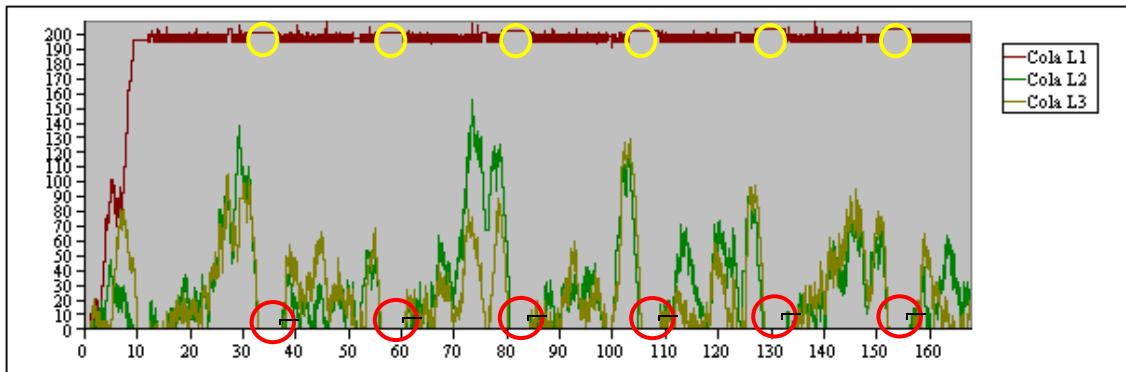


Figura 19. Evolución de las colas Escenario 5

En la Figura 19. Evolución de las colas Escenario 5, se observa que las colas se siguen comportando como en el Escenario 0, tras la saturación de la Línea 1 (señalado en amarillo), viene una caída de las líneas 2 y 3, con su pérdida asociada de productividad (señalados en rojo).

El sistema ha mejorado el output, pero solo debido a que al reducir el tamaño de los lotes es capaz de aportar mayor velocidad al sistema, lo que provoca una ligera mejora, pero no ataca a la raíz del problema. Por tanto, este escenario serviría a modo de suavizar el efecto provocado por la perturbación de las muestras inter-día.

7. Escenario 6: Sistema de Control de Inventario en las líneas

El diagnóstico hasta ahora está claro, el problema reside en los inventarios en las líneas de análisis, que bloquean el sistema de transporte, y debido a un fallo en el diseño del sistema que hace que exista una fuerte interrelación entre las líneas, el sistema se ahoga y cae la productividad.

Una de las formas para solucionarlo es rediseñar el sistema, aunque implique invertir en la modificación de la disposición de las cintas transportadoras. Este es el Escenario 4, pero de los Escenarios 2 y 3 se extrae otra posibilidad, ¿Y si se mantienen estos inventarios a un nivel bajo que permita absorber el lote de muestras inter-día sin saturar el sistema?

Si se diseña un control lógico que solo implicase una modificación del software asociado al distribuidor automático, esto implicaría una solución económica y aplicable a distintos laboratorios con el mismo problema.

Basada en los principios del *“lean manufacturing”*, un sistema de control de inventario dinámico aporta la flexibilidad necesaria al sistema, si se hace correctamente una reducción del inventario en curso debería reducir las colas y mejorar el desempeño del sistema.

El sistema de control de inventario se sitúa al inicio del transporte, de manera que lleva la cuenta del número de muestras que hay en el sistema, se establece un nivel de operación deseado, en función al tamaño de lote inter-día que se va a introducir.

Las muestras solo entran en el transporte si el número de muestras que hay en la línea en ese momento está por debajo del nivel establecido.

Si la línea está llena se comprueba si la muestra tiene que realizar pruebas en las otras líneas, y si es así, se introduce en la línea cuyo inventario este por debajo del nivel fijado. Si todas las líneas están llenas la muestra se espera hasta haya hueco en su línea de destino.

Si una muestra ha intentado entrar en todas las líneas en las que tiene que realizar pruebas y todas están ocupadas, espera un tiempo antes de volver a comprobar el estado de las líneas. El estado se comprueba de forma periódica y el sistema actúa en consecuencia.

Para contabilizar las muestras en el sistema se considera que una muestra está en el sistema si ha entrado en el transporte, y se considera que ha salido cuando llega al rack de salida del final de línea.

Para comparar los resultados del Escenario 6, se varía el tamaño del lote inter-día que se introduce en el modelo, y el nivel deseado de inventario en las líneas 2 y 3, ya que en la 1 es dependiente del tamaño del lote, para poder absorberlo sin dificultad.

El output del sistema mejora considerablemente, es mejor incluso que al cambiar la distribución del transporte, con este cambio de software el sistema se adapta y responde mejor que cambiando sus componentes.

El tamaño del lote y el nivel escogido no afecta especialmente al output, es muy constante al ser dependiente, si se consigue mantener alimentadas las líneas 2 y 3 de forma continua, en principio es muy similar mantener el inventario en 50 o 100.

Escenario	Cuántas	Cada Cuanto	Nivel L2	Nivel L3	Number Out	Utilización L1	Utilización L2	Utilización L3
Caso Base	150	24	200	200	8.422	0,95	0,74	0,74
Escenario 6 Mejor caso	25	4	100	100	10.236	0,95	0,92	0,92
Variación					21,54%	0,32%	24,05%	24,46%

Tabla 40. Resultados Escenario 6 caso óptimo (1)

Escenario	Cuántas	Cada Cuanto	Nivel L2	Nivel L3	Total time	NW Transporte	WT Transporte	NQ L1	NQ L2	NQ L3
Caso Base	150	24	200	200	30,86	657,92	16,68	189,93	33,29	33,29
Escenario 6 Mejor caso	25	4	100	100	19,77	0,05	0,00	161,73	90,30	91,29
Variación					-35,92%	-99,99%	-99,99%	-14,85%	171,27%	174,24%

Tabla 41. Resultados Escenario 6 caso óptimo (2)

Se incrementa la capacidad del sistema en un 21%, y el tiempo en el sistema de las muestras en más de un tercio, esto implica que de media las muestras salen del sistema antes de las 24 horas.

El tiempo de espera al transporte es inexistente, ya que no se dirige la muestra al transporte a no ser que haya sitio, y la muestra no tenga que esperar. Y el nivel de las colas se mantiene muy próximo al establecido como era de esperar. Se consigue un incremento de 1814 pruebas semanales, lo que supone 94000 pruebas adicionales al año.

La utilización de los operarios es similar al Escenario 1, es decir no supone ningún esfuerzo extra adicional al ya mencionado de dividir los lotes, pero incluso sin dividirlos, el sistema responde adecuadamente.

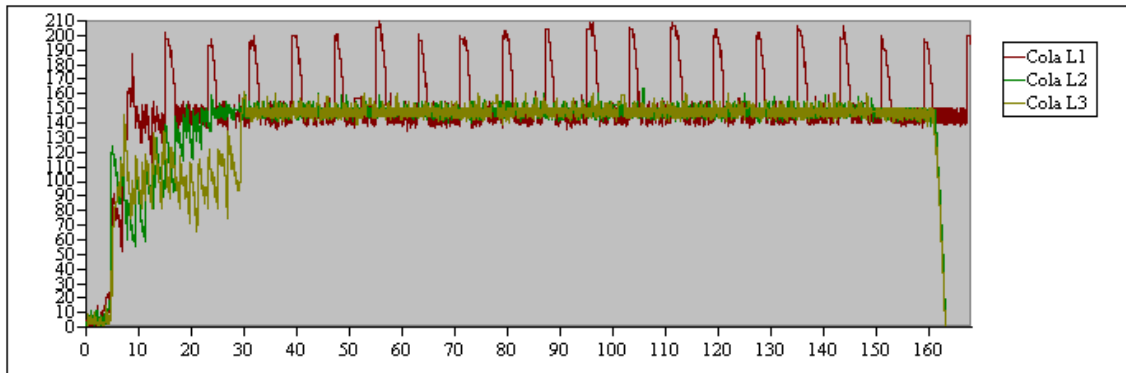


Figura 20: Evolución de las colas Escenario 6.1

En la Figura 20: Evolución de las colas Escenario 6., se observa cómo se ha fijado el nivel de inventario de las líneas en 150, y se recibe un lote de 50 muestras inter-día, el sistema lo recibe sin bloquearse, continuando la operación con normalidad.

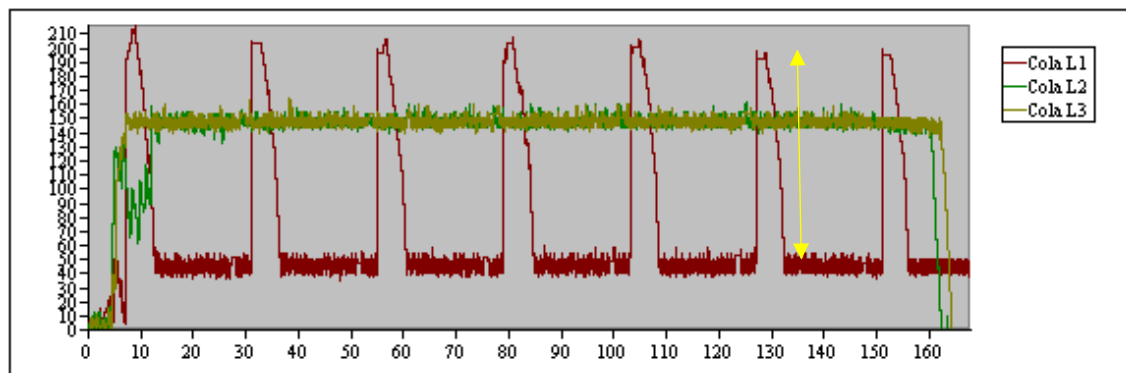


Figura 21. Evolución de las colas Escenario 6.3

En la Figura anterior se observa el caso en el que el lote inter-día que se introduce es de 150 muestras, de manera que la Línea 1 adapta su inventario deseado, lo baja hasta un nivel de operación que permite absorber el lote sin bloquear el transporte. El salto resaltado en amarillo corresponde al tamaño del lote que se introduce.

El sistema se ha vuelto dinámico, capaz de anticiparse y reaccionar, si se combina con un sistema de previsión de la demanda, o de gestión de horarios para realizar las pruebas especiales inter-día, se podría automatizar el cambio del punto de ideal de inventario en curso.

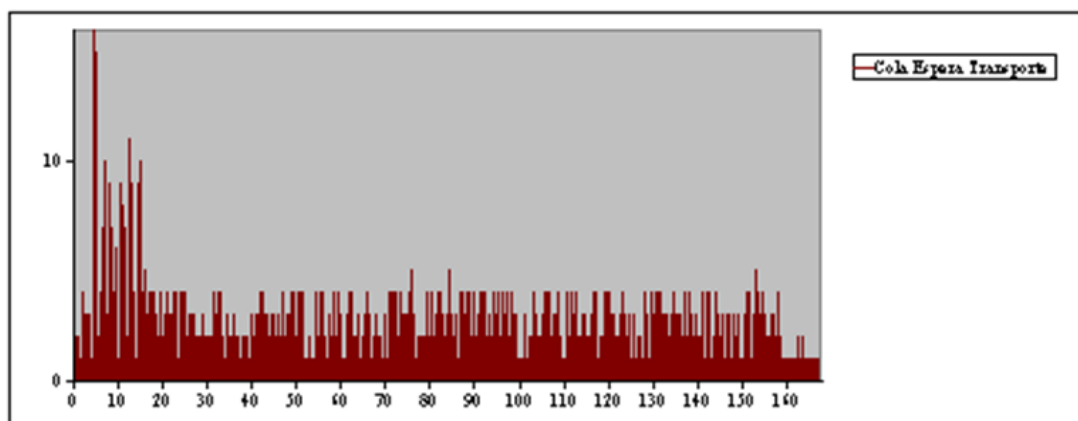


Figura 22. Evolución de la cola al inicio del transporte Escenario 6

Con el sistema de control de inventario, el transporte ha dejado de ser un problema, se observa en la figura anterior como las colas previas son muy constantes y reducidas.

El output de este escenario supera al del Escenario 4, debido a la reasignación de líneas. Si una Línea está a pleno rendimiento y la muestra no puede ser introducida ya que se ha superado el nivel de inventario, para que la muestra aproveche ese tiempo, se le reasigna línea en función a las pruebas que tenga que realizar.

Esta capacidad de reacción y reasignación no la tiene el sistema simplemente por cambiar el layout del transporte.

8. Tabla resumen de los resultados obtenidos

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes escenarios, con los KPIs más relevantes: el número de muestra procesadas por el sistema, y el tiempo total medio de una muestra en el laboratorio de análisis hasta ser procesada.

Escenario	Descripción del escenario	Pruebas Procesadas	Tiempo en el sistema (horas)
Escenario 0	Caso base con pruebas inter-día	8.422	30,86
Escenario 1	Reducción del tamaño del lote de muestras inter-día	8.688	28,01
Escenario 2	Vaciado previo de la línea	8.912	25,68
Escenario 3	Combinación escenarios 1 y 2	9.285	22,04
Escenario 4	Modificación de la disposición del transporte	10.145	20,48
Escenario 5	Variación del tamaño de los racks de salida y urgentes	8.690	27,69
Escenario 6	Sistema de Control de Inventario en las líneas	10.236	19,77

Tabla 42. Tabla resumen de los resultados obtenidos (2)

5. Conclusiones

5.1. Conclusiones sobre la metodología

El uso de la Simulación como herramienta de análisis en este estudio ha resultado acertado, ya que ha permitido plantear alternativas, y distintas medidas de mejora donde reside el valor añadido durante este trabajo.

El hecho de contar con datos extraídos de un caso real, teniendo una idea previa de los efectos provocados por distintas acciones sobre el laboratorio, se consigue validar hasta cierto punto el modelo.

Sin bajar al nivel de detalle de las cifras obtenidas, sí que se extrae que el modelo se comportaba de forma coherente con la realidad presentada, por tanto, las medidas propuestas, y los resultados parecen consistentes.

Toda la metodología quedaría incompleta si se queda en el campo teórico, el siguiente paso natural es la implantación de las medidas en el laboratorio real y la revisión de las hipótesis en función a estos resultados.

Otra de las conclusiones que se pueden extraer del trabajo realizado son las funciones de la Simulación a la hora de analizar procesos industriales:

- Es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, ya que, desde la representación del funcionamiento presente del sistema, explora posibles escenarios futuros, constituyéndose como una herramienta para manejar incertidumbre.
- Sirve para la comprensión intuitiva y visual de procesos complejos, de manera que puede ser utilizada en la formación de personal operativo, o para ilustrar dinámicas ocultas en los sistemas.
- Representa la realidad con un nivel de detalle limitado, pero con gran flexibilidad y versatilidad.

En este proyecto se ha trabajado con el Software de Rockwell Arena y su simulador de escenarios "Process Analyzer". La combinación de ambos permite la variación de parámetros de los que se quiere estudiar su efecto, y la obtención de KPIs, con sus cifras y gráficos relevantes.

Para el alcance del proyecto el uso de estas herramientas ha sido suficiente, por su velocidad de simulación, sus distintas funcionalidades y por la capacidad del software para procesar el número de entidades que se procesan en el sistema.

5.2. Conclusiones sobre los resultados

El análisis de la situación inicial del laboratorio y de los diferentes escenarios analizados y presentados, permiten extraer dos cosas: Un diagnóstico del problema inicial que se tiene en la operación de este sistema, y una propuesta de solución que surge entre las analizadas como la solución más razonable y de mayor impacto.

El diagnóstico se ha ido descubriendo a medida que se analizaban distintos escenarios, dejando evidencias de que el problema, por el cual el laboratorio no alcanza los niveles de productividad que debería, es un fallo en el diseño del sistema.

Existe una fuerte interrelación entre las líneas, debido al transporte que queda bloqueado cuando alguna de ellas satura. Al bloquearse el transporte se produce un estrangulamiento de las líneas que no estaban saturadas, para las que queda interrumpido el flujo de muestras y se pierde productividad.

Además, debido a medidas como la de introducir un lote completo de muestras inter-día en el sistema para ser procesadas, saturando una línea directamente, supone una perturbación para la que el sistema no tiene respuesta posible. Si se opera al máximo nivel de inventario en la línea cualquier anomalía provoca bloqueos.

El sistema procesa muy por debajo de su capacidad teórica, ya que la dependencia entre líneas se convierte en un cuello de botella.

Para hacer frente a este problema, el hecho de tomar medidas como disminuir el tamaño del lote de muestras que se introduce de golpe, ayuda a que la perturbación sobre el sistema sea menor, y mejora tanto el funcionamiento como el resultado.

Sin embargo, estas medidas no atacan a la raíz del problema, y son solo parches que no arreglan la herida, solo amortiguan o tapan levemente su efecto.

De todos los escenarios analizados existen dos soluciones posibles:

- Cambiar el Sistema de transporte, de manera que se elimina la dependencia entre las líneas, se acaba con los bloqueos y se incrementa sustancialmente la productividad. Esto en un sistema sofisticado y altamente automatizado puede implicar una inversión elevada, ya que supone un cambio en la distribución física actual del sistema. Pero de cara a futuro debería ser tenido en consideración.
- Implementar un sistema de control de inventario en las líneas. Es el caso del último escenario analizado, basado en los principios del “lean manufacturing”, reduciendo el nivel de inventario de operación y controlando el tamaño de las colas el efecto es el mismo que al cambiar el transporte. No solo desaparece la relación entre las líneas que resultaba

problemático, además, al reasignar la línea de destino, se reduce el tiempo de estancia en el sistema de las muestras, y se mejoran los resultados.

Se recomienda por lo explicado anteriormente, modificar el software del sistema, introduciendo el programa necesario para realizar un control de inventario en curso de las líneas, y una asignación en función de la ocupación.

Esta medida, además, resulta económicamente ventajosa, ya que la inversión es limitada, el desarrollo del software no es excesivamente complejo, y no habría que tocar la disposición física del laboratorio. No implica cambios en el comportamiento de los operarios, y el laboratorio no tendría que detener su operación por lo que no se deja de satisfacer a la demanda existente.

Se produce un incremento de la producción importante, aumentando el número de muestras procesadas por encima del 20%. Un incremento así consigue que se alcance la productividad que se esperaba, por tanto, cesen las reclamaciones de los clientes al respecto, y un importante aumento de los ingresos del laboratorio.

Con el nuevo sistema el tiempo de las muestras en el sistema es inferior a las 24 horas, así que el laboratorio permanece competitivo para satisfacer las exigencias de los servicios de urgencias de los hospitales.

En los escenarios simulados, se muestra el efecto de la variabilidad sobre un sistema dinámico. Se ha comprobado que un sistema que funciona manteniendo niveles de inventario en curso controlados, reduciendo los tiempos sin valor añadido y elevando los cuellos de botella, absorben mejor esta variabilidad, reaccionan antes y están preparados para operar en condiciones más desfavorables.

Finalmente, se ha visto la importancia del diseño y del rediseño en un sistema productivo, la búsqueda constante de mejoras hace que se detecten problemas de diseño y se mejore la productividad, lo que supone una ventaja competitiva.

5.3. Recomendaciones para futuros estudios

Este estudio es solo el primer paso, el análisis teórico, para completar el ciclo en futuros estudios sería interesante observar el efecto de las medidas propuesta en el sistema real, con los KPIs definidos, y ver si el resultado se ajusta al previsto, o si habría que corregir las hipótesis adoptadas.

Otra posibilidad para futuros estudios es el desarrollo en detalle del software de control de inventario en las líneas. Sería interesante un desarrollo completo, que permitiese la integración con datos de la previsión de la demanda actualizada con datos a tiempo real, y con las instrucciones específicas de operación (por ejemplo, tamaño del lote inter-día a analizar), de manera que el nivel de inventario deseado en las líneas dependiese de esos datos, consiguiendo el punto óptimo de operación.

El análisis realizado también se podría extender entrando en más detalle en las distribuciones de llegada o tiempos de operación, de manera que se observen los cambios en el sistema debido a eventos externos que incrementan, reducen o simplemente cambian estas distribuciones de llegada de muestras.

Si se quisiera utilizar el modelo realizado a modo de herramienta formativa sería interesante crear una interfaz donde el usuario pudiera variar manualmente distintos parámetros, de manera se vea claramente la relación causa efecto de cualquier acción sobre el sistema. Otros softwares de simulación disponen de interfaces más apropiadas para este fin que Arena.

Otra línea de investigación podría ser la conexión de los diferentes indicadores que se han analizado como resultados, con su impacto económico. Con más información acerca de ingresos y costes operativos se podría visualizar el impacto en euros, de cada una de las medidas tomadas, que puede ser más representativo o fácil de entender para profesionales ajenos al mundo de las operaciones que los tiempos de espera o utilización de recursos.

Como ampliación del sistema de control de inventario, se podría aplicar el diseño experimental, para evaluar el impacto de los diferentes factores sobre cada cambio realizado. Se podría añadir esta técnica al software de Arena Process Analyzer, para obtener resultados estadísticos, por ejemplo: qué variables manipular, número necesario de repeticiones o grado de confianza necesario para relacionar causa y efecto.

Finalmente, un posible desarrollo sería la elaboración de una metodología definida para el análisis de este tipo de sistemas productivos, con las diferentes etapas y escenarios a analizar, de manera que siguiendo esta metodología se pueda aplicar el mismo estudio a distintos casos, con variaciones mínimas.

6. Descripción del Modelo de Simulación

6.1. Introducción al software de simulación Arena

El modelado de la línea de análisis clínico se realizará con el software de la empresa Rockwell Automation.

Arena™ es un lenguaje descriptivo, que representa el proceso seguido por una entidad a través de un sistema. Arena ha sido el software escogido debido a la naturaleza del sistema. Se trata de un sistema discreto; es decir, en el que las variables del modelo se actualizan de acuerdo a eventos discretos y no de forma continua, estocástico, debido a la incertidumbre asociada; y dinámico, ya que cambia y evoluciona a lo largo del tiempo, como se muestra en la imagen obtenida del manual de Rosetti. [5]

Otra de las razones de la elección de Arena es la disponibilidad de versiones abiertas para uso académico, así como la existencia de guías de usuario completas.

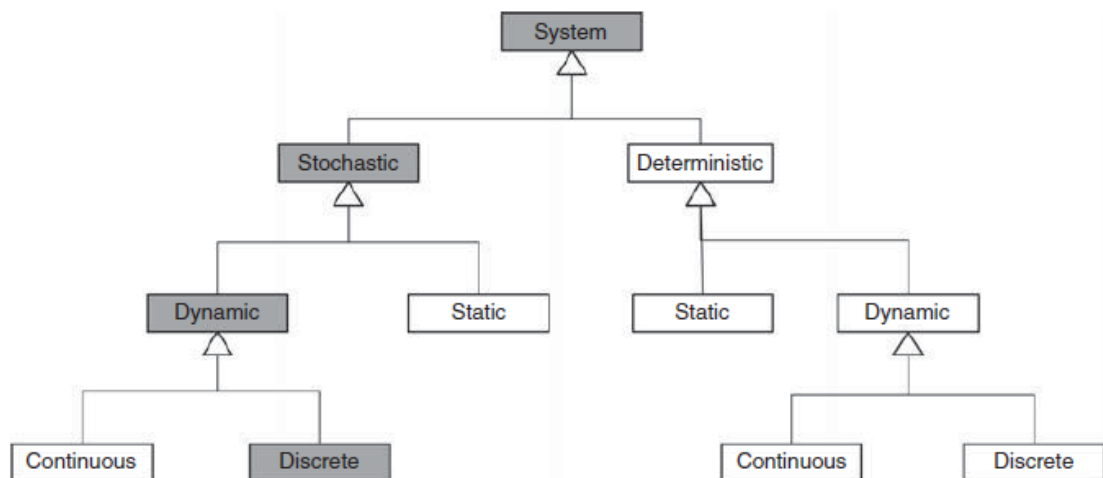


Figura 23. Clasificación tipos de sistemas [5]

“Arena es un potente software de modelado y simulación de diferentes áreas de negocio. Se ha diseñado para analizar el impacto de los cambios que suponen los complejos y significativos rediseños asociados a la cadena de suministros, procesos, logística, distribución y almacenaje y sistemas de servicio. Tiene gran flexibilidad y cubre gran cantidad de aplicaciones a modelar con cualquier nivel de detalle o complejidad. (Bradley, 2007)[7]

Para poder entender el funcionamiento del modelo, es necesario tener un conocimiento previo de los componentes del software de simulación Arena. A modo

de introducción se presenta una breve descripción de la interfaz del programa y de los distintos bloques de los que dispone para la simulación.

Arena Software es un simulador cuya programación se basa en la distribución y unión gráfica de distintos bloques que corresponden a módulos del proceso. Estos módulos representan los cambios y acciones que sufren o realizan las diferentes entidades del sistema a estudiar.

Existen tres zonas diferentes en la interfaz del programa: [8]

1. **Ventana del diagrama de flujo del modelo:** Ventana principal en la que se distribuyen los bloques que conforman el modelo de simulación. Las animaciones y gráficas también se encuentran en esta zona de la interfaz.
2. **Ventana de hoja de cálculo:** En esta ventana se introducen los diferentes parámetros, y valores de los diferentes atributos y variables que definen a las entidades.
3. **Barra de proyectos:** En esta parte de la interfaz, se seleccionan los diferentes bloques operativos y paneles que permiten construir el modelo. También se pueden encontrar los informes estadísticos de la simulación anterior.

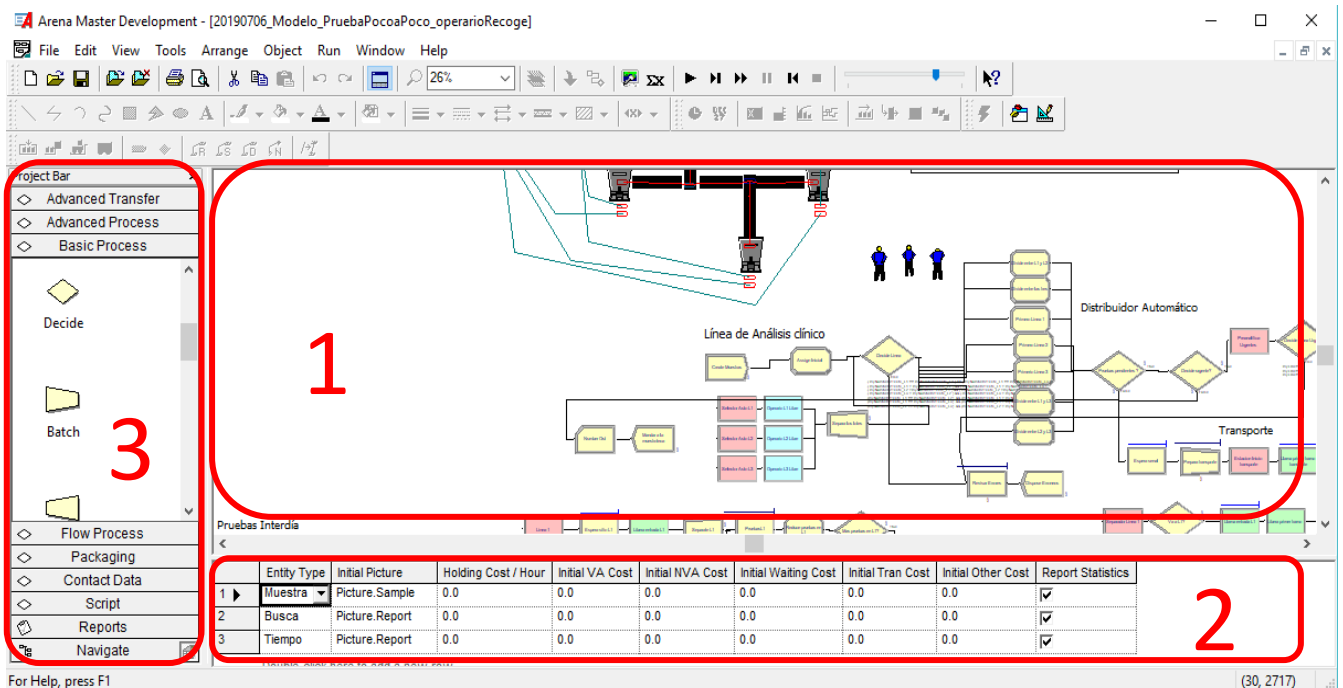


Figura 24. Interfaz Software Arena

Para la construcción del modelo, se seleccionan bloques de la parte 3 de la interfaz, se trasladan a la ventana de flujo del modelo y se definen los parámetros en la parte restante.[8]

1. Principales módulos del programa

- **Módulo “Create”:** Representa las llegadas al modelo, las entidades que se van a analizar llegan según una planificación o distribución concreta, o con un tiempo entre llegadas establecido. En este módulo se especifica el tipo de entidad, y cuenta el número que han entrado en el sistema.
- **Módulo “Dispose”:** Es el punto final de las entidades en el modelo, representa la salida, registra las estadísticas de las entidades salientes antes de abandonar el modelo.
- **Módulo “Process”:** Este módulo representa cualquier proceso durante la simulación. Permite ocupar un recurso determinado, durante un tiempo que puede seguir una distribución concreta o depender de una variable. Permite introducir diferentes prioridades, y forma una cola tipo FIFO al inicio del proceso una vez alcanzada la capacidad del recurso.
- **Módulo “Decide”:** Este módulo permite tomar decisiones dentro del proceso, se puede basar en una o más condiciones, o simplemente en probabilidad. Las condiciones pueden ser el valor de algún atributo concreto, o de una variable del sistema en forma de expresión.
- **Módulo “Assign”:** Este módulo permite reasignar valores a diferentes atributos de la entidad que pasa por él, o cambiar el valor de alguna variable definida en el sistema. Puede modificar el tipo de entidad o su imagen. En el se pueden realizar distintas asignaciones a la vez.
- **Módulo “Batch”:** Este módulo permite agrupar las entidades en lotes siguiendo diferentes criterios. Puede agrupar cualquier tipo de entidad que llega o basar la agrupación en algún atributo que caracterice a la entidad. Al agrupar se crea una nueva entidad representativa.
- **Módulo “Separate”:** Este módulo sería el contrario al anterior, permite separar los lotes creados de vuelta a sus entidades originales, o permite duplicar un cierto número de veces la entidad que llega al bloque.
- **Módulo “Record”:** Este módulo permite registrar las estadísticas especificadas por el usuario durante la simulación. Sirve como contador, o para medir intervalos de tiempo entre distintos puntos del sistema.

2. Módulos avanzados del programa

- **Módulo “Hold”:** Este módulo retiene una entidad en una cola, a la espera de que se cumpla una determinada condición, o a que se le mande una señal al módulo para liberar la cola. La entidad queda retenida indefinidamente, si la condición no se cumple, o no se libera del “Hold” con el módulo “Remove”.
- **Módulo “Signal”:** El módulo envía una señal con un determinado valor, que el módulo “Hold” recibe y procede a liberar un número específico de entidades esperando en cola.
- **Módulo “Station”:** Este módulo define un lugar físico, donde parte del proceso tiene lugar. Se puede utilizar como inicio o destino de ruta de transporte. Permite asignarles costes diferentes a las entidades de almacenamiento, o procesamiento.
- **Módulo “Access”:** A la hora de modelar cintas transportadoras, este módulo permite simular el acceso a la cinta, desde el tamaño ocupado por la pieza que entra, hasta la cola que se forma esperando a que la cinta en cuestión sea liberada.
- **Módulo “Convey”:** Este módulo define las estaciones de inicio y destino para un tramo de la cinta transportadora. Al entrar en este módulo la entidad se transporta al tiempo determinado por la velocidad de la cinta, de la estación de origen a la de destino.
- **Módulo “Exit”:** Este módulo representa la salida de la cinta transportadora, la entidad abandona la cinta liberando un determinado número de espacios, en función a su tamaño.
- **Módulo “Request”:** Este módulo manda una señal al transportador, de manera que la entidad que se va a transportar queda a la espera de que este se libere. Puede asignar distintas prioridades a cada entidad a transportar.
- **Módulo “Transport”:** En este módulo se establecen las estaciones de inicio y destino del transporte, al igual que en el módulo Convey. En este caso la diferencia es que se transporta mediante uno de los transportadores definidos.
- **Módulo “Free”:** Este módulo libera el transportador una vez la entidad a llegado a su destino, este queda disponible para volver a ser llamado.

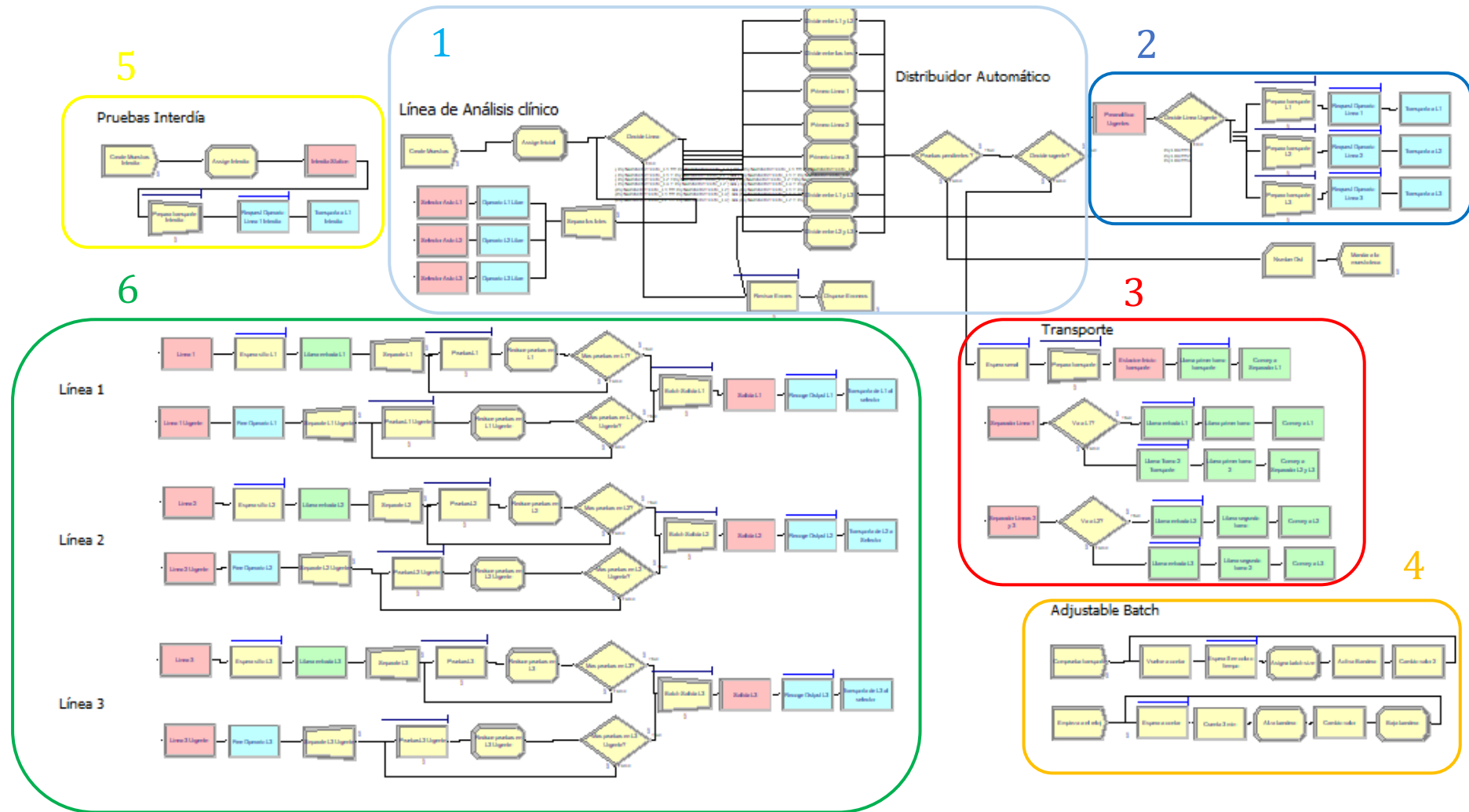
Una vez se ha construido el modelo, es el momento de realizar la simulación y analizar los resultados obtenidos. Para ello el software Arena permite definir unos parámetros para la simulación. Estos parámetros especifican la duración del tiempo que se va a simular, las diferentes réplicas que se realizarán, y si existe algún evento concreto con el que finalice la simulación en curso.

The image shows the 'Run Setup' dialog box in the Arena simulation software. The 'Replication Parameters' tab is active. The 'Number of Replications' is set to 1. The 'Start Date and Time' is set to 'jueves, 13 de junio de 2019 12:05:01'. The 'Warm-up Period' is 0.0, and the 'Replication Length' is set to 'Infinite'. The 'Hours Per Day' is 24. The 'Base Time Units' are set to 'Hours'. The 'Terminating Condition' field is empty. There are checkboxes for 'Initialize Between Replications' for 'Statistics' and 'System', both of which are checked. At the bottom, there are buttons for 'Aceptar', 'Cancelar', 'Aplicar', and 'Ayuda'.

Figura 25. Panel configuración parámetros de Simulación

También se puede modificar la velocidad de simulación, los controles y los informes que producidos al terminar. Estos informes contienen información sobre las entidades del modelo, sobre el uso de los diferentes recursos, sobre el tamaño de las colas y los tiempos de espera en el sistema, y sobre cualquier estadística específica que el usuario haya establecido.

6.2. Esquema general del modelo en Arena



En el esquema de la página anterior se muestra una visión global del modelo realizado para simular el comportamiento del laboratorio de análisis clínico, este tiene marcadas y diferenciadas las diferentes zonas agrupadas por módulos funcionales.

1. Zona 1: Preanalítica y Distribuidor automático

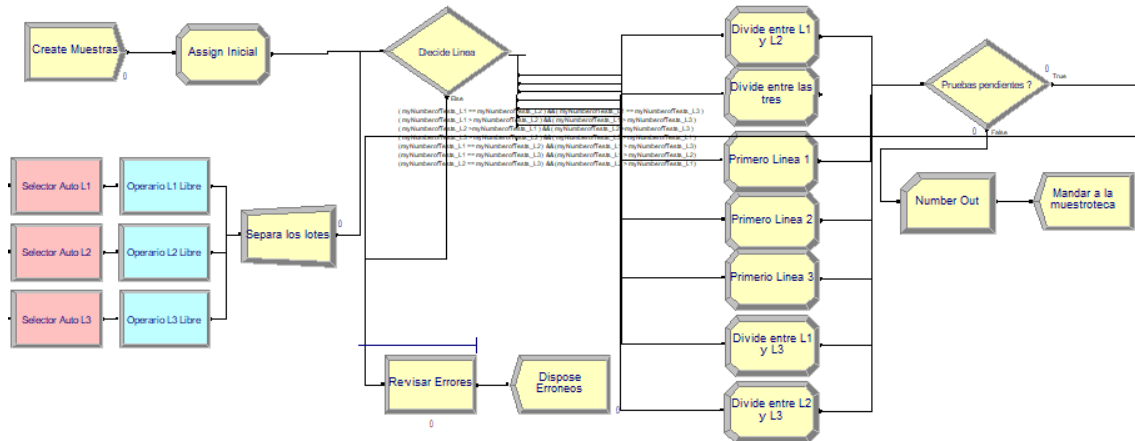


Figura 26: Bloques de la Zona 1 del modelo de simulación en Arena

En esta zona del modelo se reproduce el comportamiento de los primeros pasos en el sistema que sigue una muestra, desde su llegada a la zona de preanalítica donde se clasifica según sus características, hasta la distribución automática, el centro neurálgico del sistema.

En la distribución automática se lee la etiqueta de la muestra para decidir según las pruebas que tenga que realizar, la línea de destino, o si quedan pruebas pendientes.

En la Zona 1 del modelo se han utilizado distintos módulos de decisión en función de atributos, que combinados con asignaciones aleatorias permite reproducir una distribución aleatoria de muestras que se comporta de forma diversa en el sistema.

2. Zona 2: Transporte de pruebas urgentes

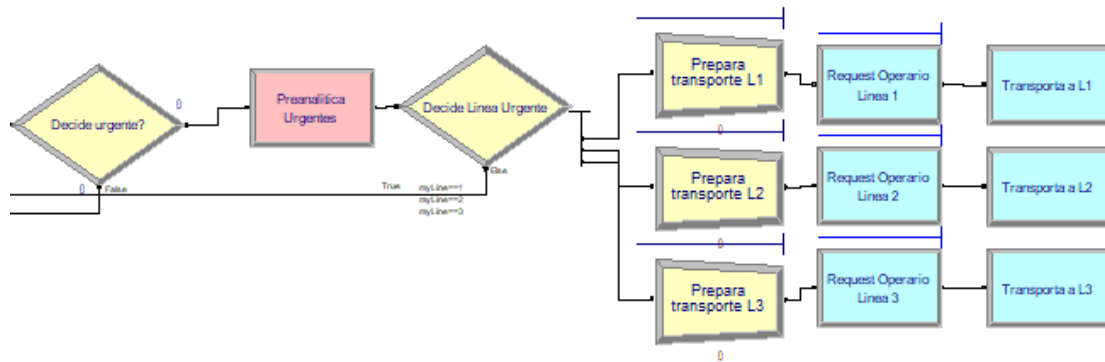


Figura 27. Bloques de la Zona 2 del Modelo de Simulación en Arena

De la Zona 1 del modelo se pasa a la Zona 2 o a la Zona 3, dependiendo del tipo de muestra, con un módulo “Decide” se separan las muestras, y si son del tipo Urgente, van a la estación Preatalítica Urgente.

Después en función de la línea, se agrupan en racks de un tamaño específico, y se llama al operario de la línea correspondiente, modelado en este caso como un “transporter”. Cuando el operario está libre recoge el rack de muestras y lo transporta a la línea correspondiente a la parte de Urgentes.

3. Zona 3: Transporte de pruebas ordinarias

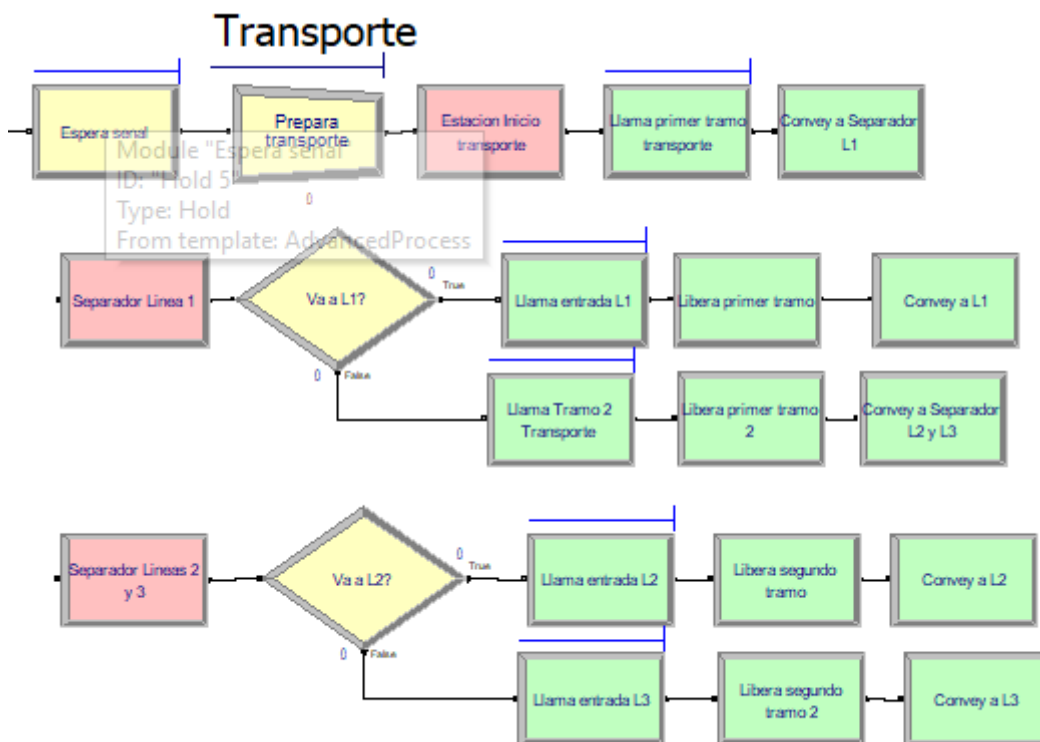


Figura 28; Bloques de la Zona 3 del modelo de Simulación

La Zona 3 representa el transporte de las muestras ordinarias, una vez se han separado de las urgentes, se preparan para el transporte. Se agrupan en racks de 5 o de 3 minutos (lo que ocurra antes), y esperan al primer tramo de transporte.

Según la línea a la que vayan la ruta por el transporte cambia, saldrán en el separador de la Línea 1, o en el separador de la Línea 2 y 3.

El transporte se ha modelado como distintos segmentos de un “conveyor”, y una vez que el rack entra en la cinta transportadora, esta no queda libre hasta que pasa al siguiente tramo. Es decir, como máximo habrá un rack por tramo de transporte. El transporte acaba en los buffers de entrada a las líneas.

4. Zona 4: Lógica para lanzar el rack de transporte

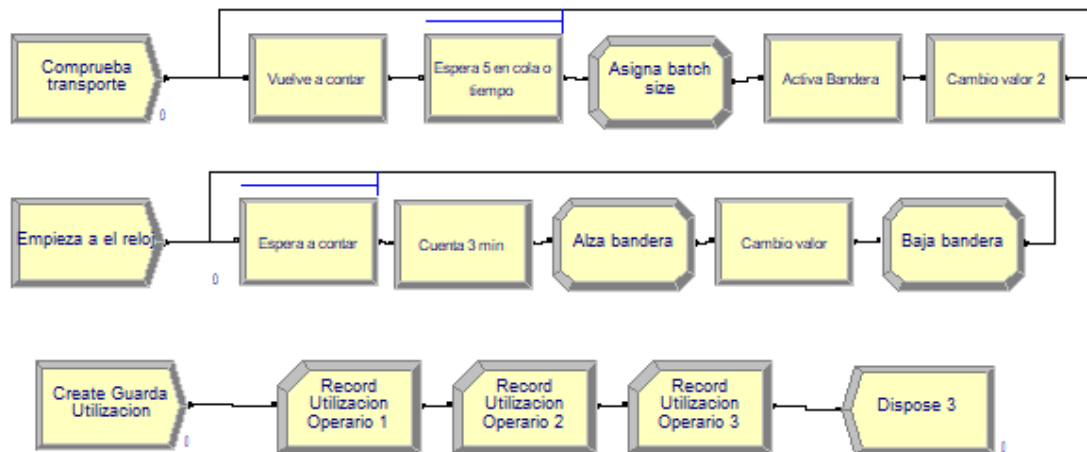


Figura 29. Bloques Zona 4 del modelo de Simulación

Esta zona funcional del modelo está muy relacionada con el transporte de muestras, modela la lógica que permite lanzar los racks de muestras al transporte dependiendo de dos condiciones. La primera es que haya cinco muestras con el mismo destino esperando, y la segunda, es que hayan pasado dos minutos. Justo después de que se de alguna de las dos condiciones se manda el rack.

En la siguiente versión de Arena, esta zona no sería necesaria, se basa en el uso de banderas independientes que permiten medir intervalos de tiempo y reiniciar contadores al lanzar cada lote.

También se ha incluido en esta zona los módulos necesarios para realizar un muestreo de la utilización de los operarios de cada una de las líneas.

5. Zona 5: Pruebas Inter-día

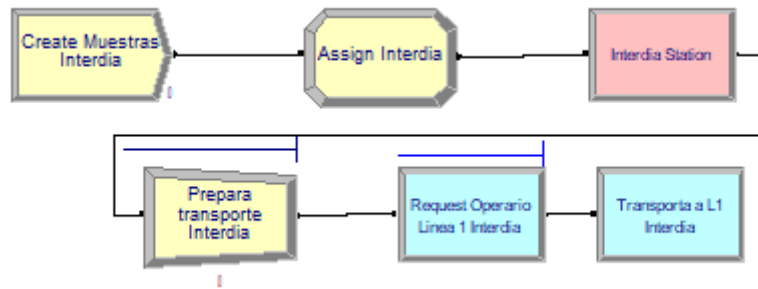


Figura 30. Bloques de la Zona 5 del modelo de Simulación

En esta parte del modelo se representa la llegada adicional de las muestras inter-día, que, por sus diferentes características, y comportamiento en el modelo se separan de la llegada convencional. Desde su llegada se preparan para el transporte del que se encarga un operario de forma manual, modelado como “transporter”.

6. Zona 6: Líneas de análisis

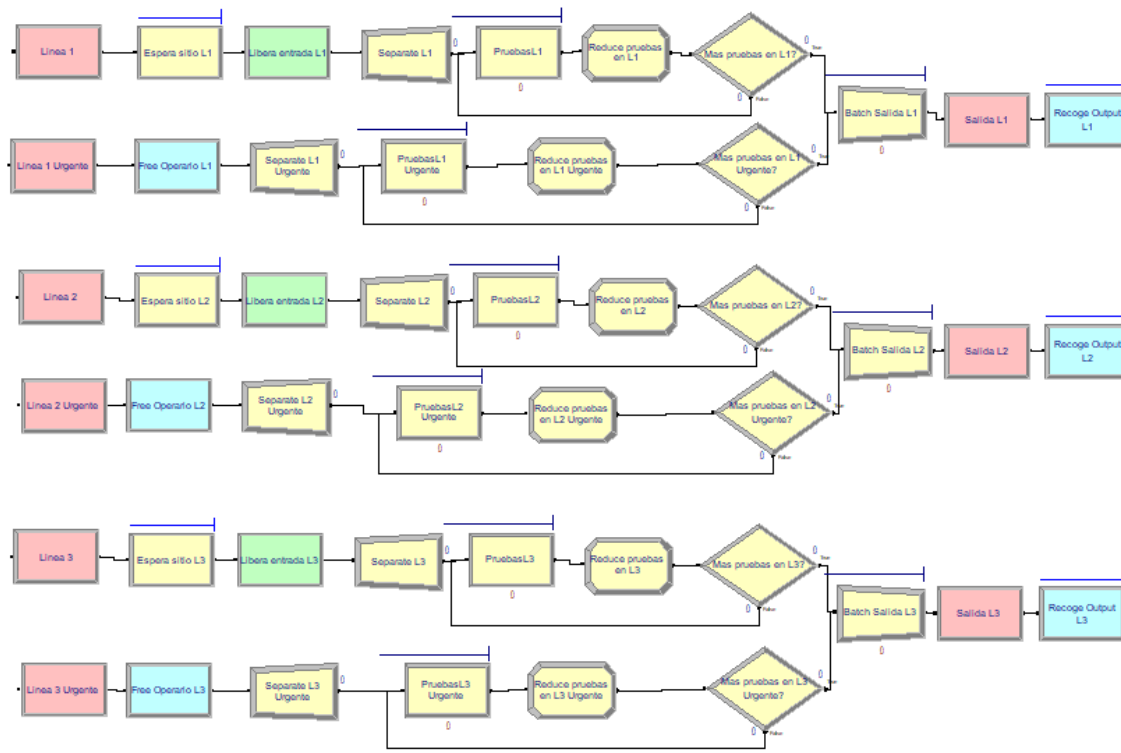


Figura 31. Zona 6 del modelo de Simulación, líneas de análisis

Finalmente, la Zona 6 corresponde a las líneas de análisis dentro del laboratorio, donde se llevan a cabo las diferentes pruebas clínicas. Esta zona consta de tres líneas, con distinto tipo de prueba en cada una.

Cada línea en el modelo está compuesta por dos vías en paralelo, la primera para las muestras ordinarias y la segunda para urgentes e inter-día, para establecer

diferencias de prioridad (las urgentes tienen prioridad sobre las ordinarias para ser procesadas).

Las muestras llegan a la estación de entrada en la línea, esperan su sitio y abandonan el transporte, una vez en las máquinas realizan todas las pruebas que le correspondan en la línea hasta que haya finalizado, entonces, se dirige a la bandeja de salida donde espera a que el operario recoja la bandeja y la deposite en el distribuidor automático (Zona 1).

Dentro de la misma línea se va comprobando que prueba es la siguiente que debe realizar cada muestra, de manera que vuelve a la cola correspondiente.

El tamaño de los inventarios de las líneas es de 200 muestras, 20 por máquina, y una vez que se llena, la siguiente muestra para su tramo de transporte a la espera de tener un sitio en la línea.

6.3. Desarrollo del modelo en Arena en detalle

En esta sección se entra en el detalle de los distintos elementos del modelo de Simulación realizado para estudiar el laboratorio de análisis clínico. Se empieza por el desarrollo del caso base, para después presentar las distintas transformaciones para adaptar este caso base a los diferentes escenarios explicados en el apartado 4.2 de este documento.

1. Modelo Base sin pruebas Inter-día

Para realizar una explicación incremental del modelo desarrollado, se comienza por la llegada de las muestras al sistema. Para modelar la llegada de entidades en Arena se utiliza el módulo "Create". En este caso las entidades que llegan al sistema se han llamado "Muestra".

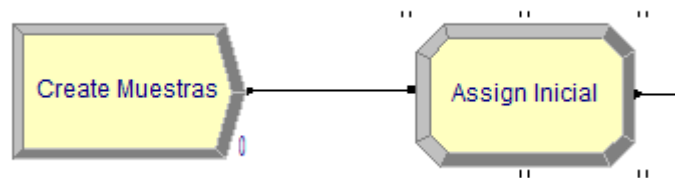


Figura 32. Módulos "Create" y "Assign" Llegada muestras

La imagen muestra el diálogo de configuración del módulo "Create" en Arena. El título de la ventana es "Create".

Name:		Entity Type:
Create Muestras		Muestra
Time Between Arrivals		
Type:	Value:	Units:
Random (Expo)	lambda	Seconds
Entities per Arrival:	Max Arrivals:	First Creation:
1	12000	0.0
OK Cancel Help		

Figura 33. Parámetros módulo "Create Muestra"

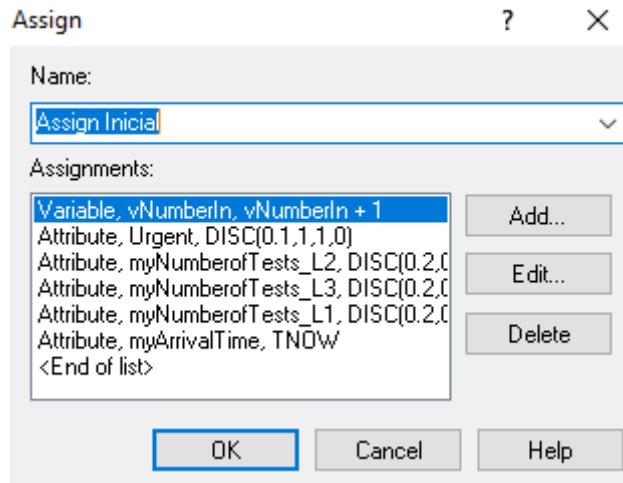


Figura 34. Parámetros módulo "Assign Inicial"

Las muestras llegan al sistema siguiendo una distribución exponencial del tiempo entre llegadas, de media "vlambda" segundos, esta variable permite la simulación de distintos escenarios y tipos de llegada, pero para el caso base se establece en 50. Las muestras comienzan a llegar en el instante que comienza la simulación.

Una vez la muestra ha llegado al sistema, pasa por la asignación de sus principales características, es decir, se decide si la prueba es urgente o no, en qué instante ha llegado al sistema, y el número de pruebas que debe realizar en cada una de las líneas. Este número varía con la siguiente distribución: DISC (0.2, 0, 0.5, 1, 1, 2). La misma en las tres líneas, es decir una muestra puede necesitar hasta 6 pruebas diferentes en el sistema, de media realizará 3.9 pruebas.

Una vez se tienen las características de la línea, la muestra llega al distribuidor automático, donde se decide en primer lugar a que línea debe ir la muestra en primer lugar. Esto se decide en función del número de pruebas que la muestra deba realizar en cada línea, irá a la línea donde tengas más pruebas que realizar, y en caso de que tenga que hacer el mismo número en varias, se divide de manera estadística a cuál va primero.

Si existiese algún error a la hora de asignar la línea, porque exista algún defecto en la muestra, entonces esta sale del sistema como errónea, y es revisada por un operario.

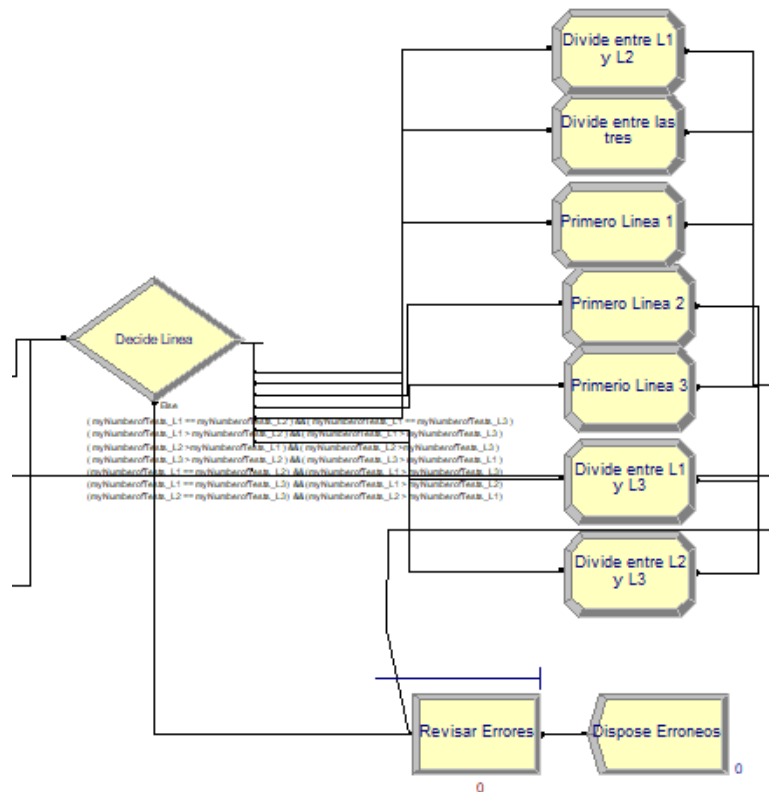


Figura 35. Módulo distribuidor automático, asignación de Línea

Figura 36. Módulo Decide Línea, condiciones

Después de haber asignado la línea a la que ira la muestra, aún dentro del distribuidor automático se comprueba si la muestra tiene pruebas pendientes o ya puede salir del sistema, y si la prueba es urgente o no, ya que dependiendo de si es urgente seguirá un camino u otro dentro del sistema.

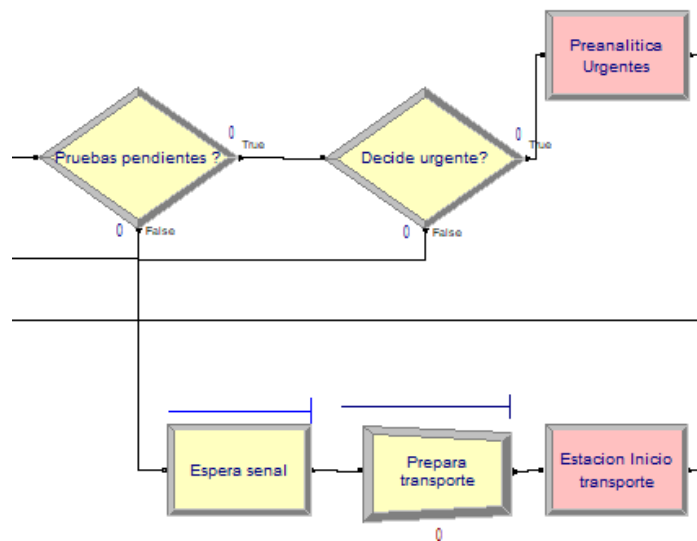


Figura 37. Distribuidor automático, selección de urgentes

The screenshot shows a 'Decide' dialog box with the following fields:

- Name:** Pruebas pendientes ?
- Type:** 2-way by Condition
- If:** Expression
- Value:** $myNumberOfTests_L1 + myNumberOfTests_L2 + myNumberOfTests_L3 \geq 1$

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help.

Figura 38. Condición previa a salir del sistema

Si el número de pruebas por realizar en todas las líneas fuera 0, la muestra abandona el sistema, sino llegan a dos estaciones diferentes. Por un lado, la estación de urgentes, que serán llevados a la línea manualmente por el operario, y por otro lado las muestras ordinarias, llegan al inicio del transporte que las llevará hasta la línea correspondiente.

Si la muestra es urgente, se comprueba a qué línea va, se agrupa en racks de un tamaño variable “vLoteUrgente” (en el caso base se establece en 5 tubos). Los racks esperarán a que el operario de la línea de destino los recoja y los traslade de la estación de urgentes a la línea. El operario se modela como un transportador, y la prioridad a la hora de recoger los lotes de muestras urgentes es Media.

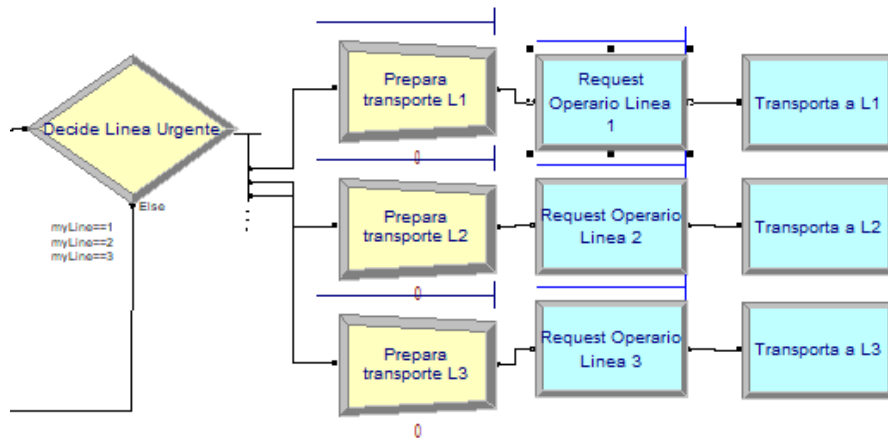


Figura 39. Módulos transporte muestras urgentes

Figura 40. Parámetros Transporter Operario 1

El lote de muestras urgentes espera a que el Operario esté libre, y es trasladado a una velocidad específica, que en este caso es de 1 unidad al minuto.

Para las líneas 2 y 3 la lógica es la misma, se ha parametrizado el tamaño del lote, por si su modificación mejorase el desempeño del sistema en conjunto.

Las muestras ordinarias van al inicio del transporte, donde se prepara un lote de 5 muestras que vayan a la misma línea. Si en tres minutos no se ha completado este lote, se transporta el lote incompleto a la línea de destino.

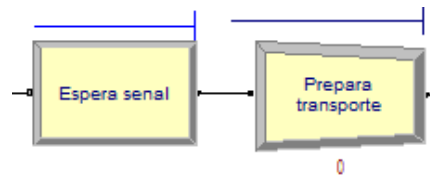


Figura 41. Módulo preparar lote para transporte

Adjustable Batch

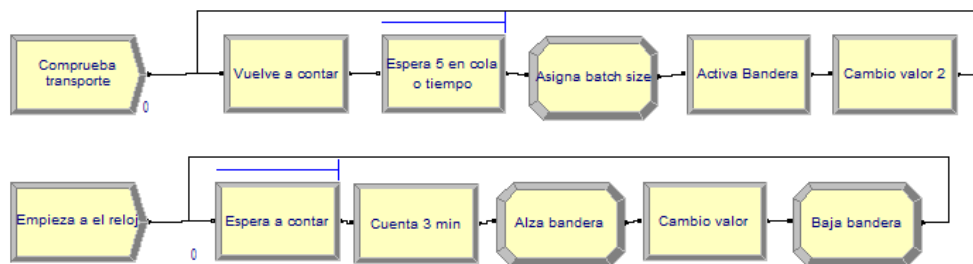


Figura 42. Lógica detrás del lote variable

La lógica detrás de un lote variable no es trivial, ya que en la versión 14 del software de Arena, no existe la posibilidad de hacer que el tamaño del lote dependa de una condición directamente. En la nueva versión de Arena se haría con el módulo “Adjustable Batch”.

Lo que se ha hecho es mediante dos señales, y un módulo “Hold”, avisar al sistema de cuando mandar el lote. En más detalle, se activa un reloj que empieza a contar 3 minutos cada vez que un lote es lanzado, este reloj al acabar alza una bandera.

De forma paralela, se va comprobando la condición de que haya 5 muestras en cola para el lote (las necesarias), o que la bandera esté alzada. En caso afirmativo, se lanza el lote, se baja la bandera y se vuelve a contar y comprobar el tamaño de la cola.

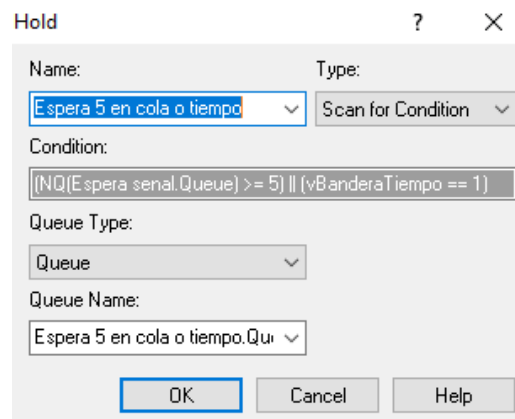


Figura 43. Comprobación para lanzar el lote al transporte

Para el transporte se han utilizado los módulos “Station” y los relacionados con cintas transportadoras: “Access”, “Convey” y “Exit”.

Las características de funcionamiento son:

- Solo puede haber un rack o lote de muestras en cada tramo del transporte. Hasta que ese rack no abandona el tramo no lo libera para que entre el siguiente.
- En cada tramo de transporte se tardan 5 segundos.
- Los transportes acaban en la línea correspondiente, a la que accederán si el buffer de inicio de la línea (20 pruebas por máquina), tiene espacio. Si no fuera así, se quedan esperando sitio y se bloquea el transporte.

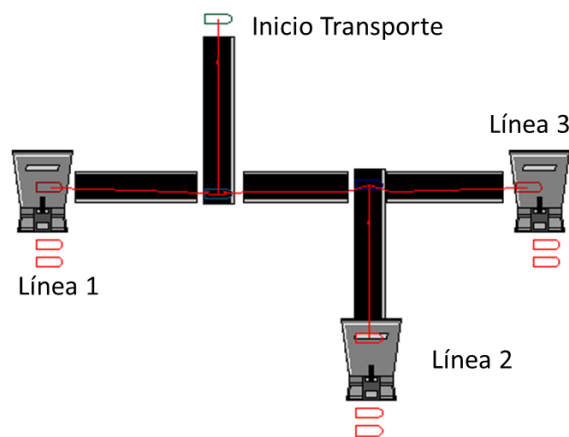


Figura 44. Distribución transporte

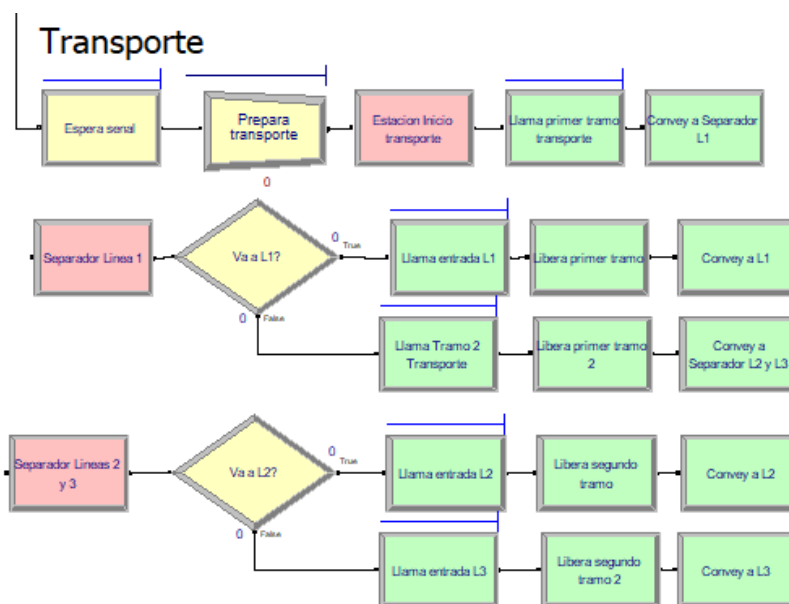


Figura 45. Módulos del sistema de transporte

En la Figura 45. Módulos del sistema de transporte, se ve cómo se parte de la estación de inicio de transporte, que llama al primer segmento de la cinta transportadora. De ahí se pasa al separador 1, dónde se decide si la muestra va a la línea 1 o sigue en el transporte.

Si va a la Línea 1 llama a la entrada, y si esta está libre, entra para acabar en el buffer de entrada a la línea 1. Si por el contrario va a la línea 2 o 3, continúa hasta el siguiente separador y ya desde allí accede al tramo de entrada de la línea 2 o 3.

Esto intuitivamente hace ver que, si una de las líneas se bloquea por cualquier causa, las muestras no podrán entrar, y quedarán atrapadas en el transporte que se bloqueará impidiendo el paso a cualquier otra línea del sistema.

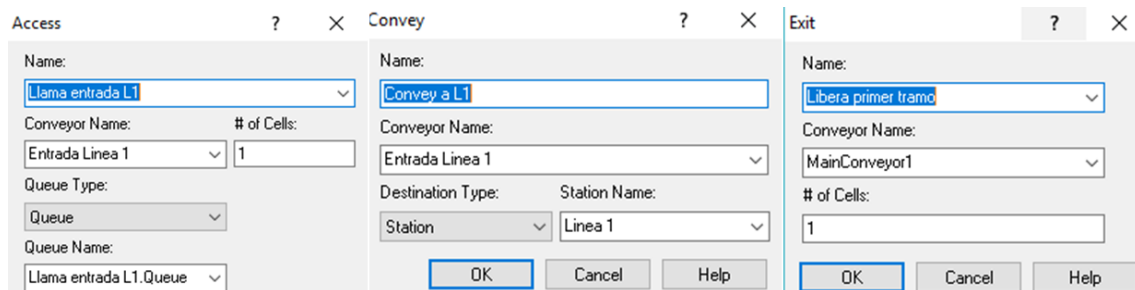


Figura 46. Detalles módulos Access, Convey, Exit

Se puede observar que para cada “Conveyor” se establece un segmento, y una estación de destino para que mande el lote. En las especificaciones del segmento permite añadir velocidad, espacios ocupados al entrar o liberados al salir.

Faltaría en Figura 45. Módulos del sistema de transporte, liberar los tramos de entrada, pero para asegurar que en las líneas solo entra el número máximo que es la capacidad del buffer, se libera después de comprobar que hay sitio, por tanto, el módulo “Exit” es parte de la lógica de la línea que se presenta a continuación.

A la línea 1 pueden llegar dos tipos de lotes, los urgentes y los ordinarios, y la prioridad de estos lotes cambia, los urgentes entran antes en la línea que los ordinarios. Para emular este efecto es necesario desarrollar dos líneas paralelas que comparten recurso con distinta prioridad.

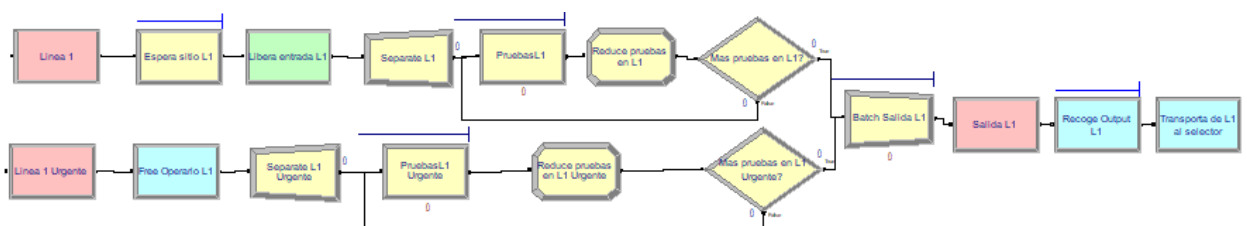


Figura 47. Módulos Línea 1

Las muestras ordinarias que entran en la línea comprueban que existe sitio en el buffer, dejan el tramo de transporte Entrada a la línea 1, liberan este tramo del conveyor, y se separa el lote para que las pruebas se procesen separadamente en las máquinas con su prueba específica.

Figura 48. Detalles Operación Línea 1

La distribución de la duración de las pruebas es una triangular entre 4.5 y 10 minutos, con media de 6 minutos. La prioridad para las pruebas ordinarias es baja.

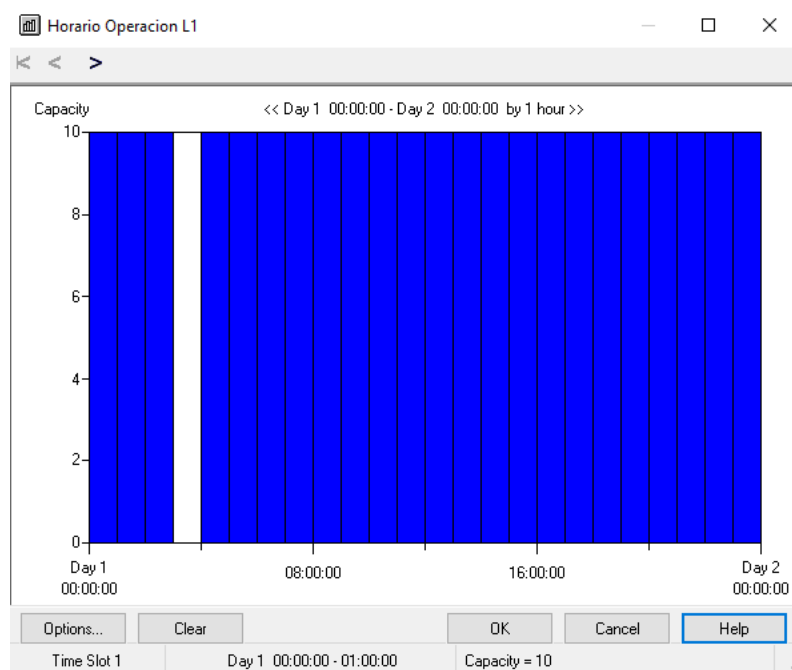


Figura 49. Horario de operación y mantenimiento L1

Las líneas no están operativas las 24 horas del día, el mantenimiento para el caso base se ha programado como fijado a las 4 de la mañana para la línea 1 y las siguientes para las líneas 2 y 3.

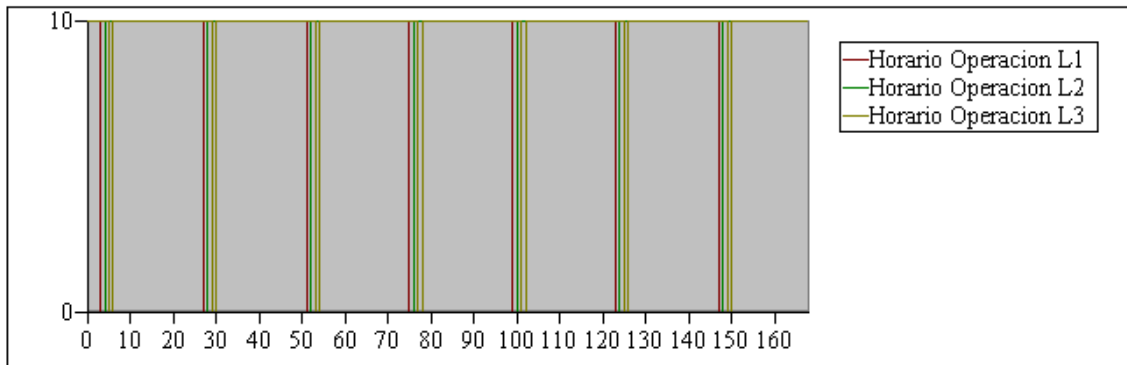


Figura 50. Capacidad de las líneas por hora

Una vez que una muestra es procesada, se reduce el número de pruebas pendientes en esa línea, y se comprueba si hay alguna por realizar. Si fuera así vuelve a la cola para terminar estas pruebas, y si no se dirige al buffer de salida.

Este buffer de salida tiene una capacidad de 100 muestras, y es el operario encargado del manejo de las líneas el encargado de recogerlo manualmente.

Para las muestras urgentes el funcionamiento es similar, simplemente con una prioridad mayor, por lo que se saltan la cola de pruebas ordinarias, pero van al mismo buffer de salida.

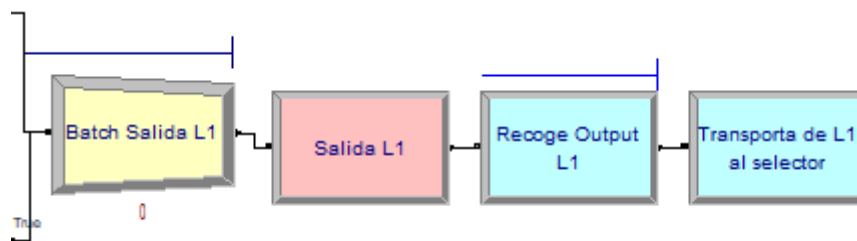


Figura 51. Detalle buffer de salida de pruebas

Cuando las bandejas de salida están llenas, se avisa al operario para que recoja el lote de salida. El operario saca la bandeja, y la lleva de vuelta al distribuidor automático donde se verá si esas pruebas tienen que ir a otra línea o si, por el contrario, ya pueden salir del sistema.

Una vez ha salido la bandeja se van llenando otras bandejas disponibles con las pruebas procesadas.

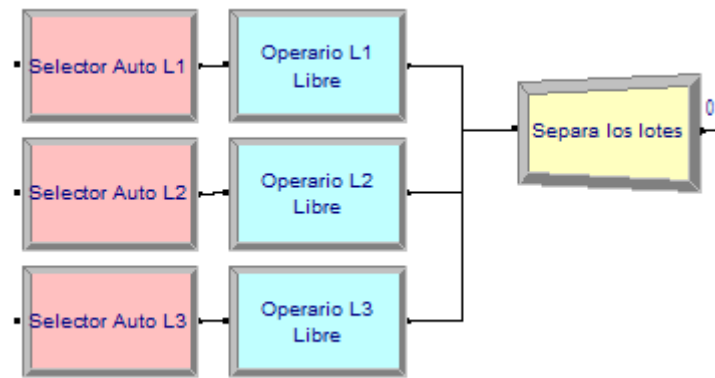


Figura 52. Transporte de pruebas de salida

Para este transporte se usa el operario propio de la línea, al igual que para el transporte de las pruebas urgentes, modelado como transportador. Una vez se vuelcan las pruebas en el distribuidor automático de vuelta, se libera el operario y se deshace el lote.

Para medir la utilización de los operarios, modelados como transportadores, se crea otra entidad, que cada diez segundos mide el estado de los operarios, de manera que se registra la utilización media de cada uno de los operarios por muestreo.

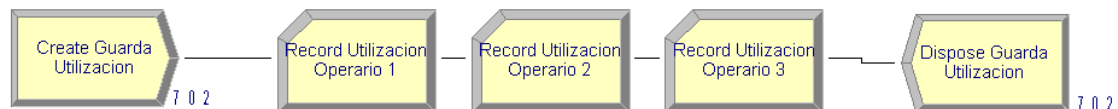


Figura 53. Módulos usados para medir la utilización de los operarios

Hace falta un módulo “Record” para cada operario, ya que cada uno lleva asociado la expresión de la utilización instantánea. La utilización resultante del operario será siempre reducida, ya que el operario de la línea de análisis clínico solo dedica parcialmente su tiempo a la operación de la línea, el resto del tiempo se dedica al análisis de pruebas con resultados extraños u otras labores de investigación.

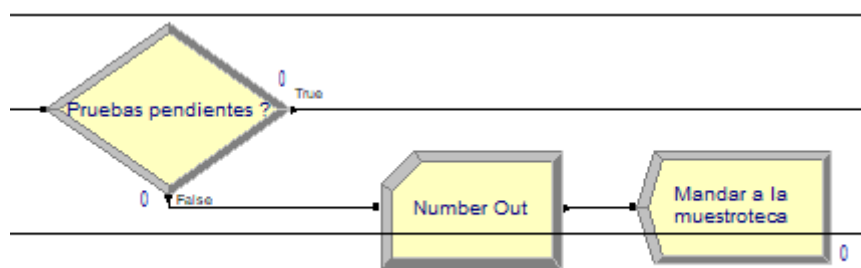


Figura 54. Salida de las muestras del sistema

Finalmente, para salir del sistema, se comprueba el número de pruebas pendientes de la muestra, y si no quedan pruebas pendientes, la muestra se manda a la muestroteca registrando sus estadísticas, como el tiempo en el sistema.

Si quedan pruebas pendientes se manda a la división entre urgentes y ordinarias, cerrando el círculo y completando el sistema.

Run Setup

Run Speed Run Control Reports Project Parameters

Replication Parameters Array Sizes Arena Visual Designer

Number of Replications: 1

Initialize Between Replications

☒ Statistics ☒ System

Start Date and Time: ☒ lunes , 25 de marzo de 2019 12:21:19

Warm-up Period: 0.0 Time Units: Hours

Replication Length: 7 Time Units: Days

Hours Per Day: 24

Base Time Units: Hours

Terminating Condition:

Aceptar Cancelar Aplicar Ayuda

Figura 55. Panel control parámetros simulación

La simulación del caso base se realiza durante una semana, con varias repeticiones, para ver la operación continua del laboratorio, durante un periodo lo suficientemente largo, como para alcanzar el punto normal de operación.

Para los Escenarios estudiados se han realizado diez repeticiones de la simulación semanal de la operación del sistema, tomando como resultados los valores medios obtenidos en cada repetición.

2. Transformación del modelo, Escenario 0

Para el Escenario 0 analizado en profundidad en el apartado Desarrollo del Escenario 0 (Con pruebas inter-día), es necesario añadir la llegada de las muestras inter-día al sistema, como un “Create” adicional, es decir, una nueva vía de entrada al sistema.

Para simular este efecto el modelo se mantiene como para el caso base, únicamente añadiendo al modelo los siguientes módulos:

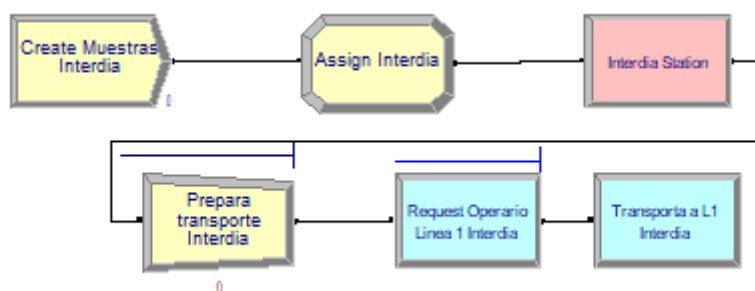


Figura 56. Módulos pruebas inter-día

Para añadir esta llegada de muestras de manera que el número de muestras que entran no cambie el análisis, se tiene que llegan 1050 muestras inter-día a la semana, es decir 150 al día.

Estas muestras llegan a un ritmo parametrizado y en lotes variables, que se utilizarán para mejorar la operación del sistema. En el Escenario 0 se trata de lotes de 150 que llegan cada 24 horas, empezando a las 7 de la mañana, tras realizar los mantenimientos.

A las muestras se les asigna el atributo “myInterdia”, para identificarlas a lo largo del proceso. Se ha decidido que es suficiente estudiar el efecto de las llegadas inter-día en la línea 1, y extrapolar los resultados, ya que en la práctica podría suceder en cualquiera de las líneas.

Name:		Entity Type:
Create Muestras Interdia		Muestra
Time Between Arrivals		
Type:	Value:	Units:
Constant	vCadaCuantos	Hours
Entities per Arrival:	Max Arrivals:	First Creation:
vCuantas	1050/vCuantas	vHorainicio
OK Cancel Help		

Figura 57. Parámetros creación pruebas Inter día

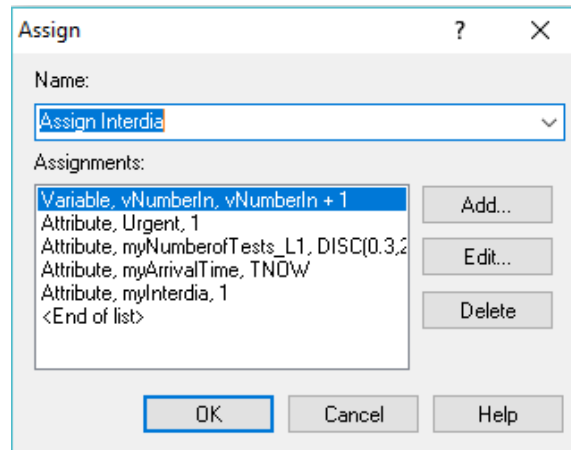


Figura 58. Módulo Assign Pruebas Inter día

Las muestras realizan entre 2 y 4 pruebas en la Línea 1, y solo tienen que pasar por una línea, lo que tiene sentido al ser análisis específicos y concretos para los que se prepara la línea especialmente.

Los lotes de muestras son recogidos por el operario de la línea que los introduce en la línea en la rama urgente, como se puede observar en la Figura 47. Módulos Línea 1.

El modelo utilizado para este Escenario 0, es el mismo que se utilizará para el Escenario 1, simplemente parametrizando el tamaño de los lotes inter-día y su frecuencia de llegada.

Los parámetros que se varían para analizar este escenario son las variables “vCuantas” y “vCadaCuanto”, que caracterizan los módulos de llegada de las pruebas inter-día.

El modelo no modifica el transporte, ni afecta a los flujos de muestras. Únicamente el operario 1 incorpora a su ruta la estación llamada “Interdia Station”, a la que acude a recoger las muestras con prioridad similar a la de recoger las pruebas urgentes, es decir con prioridad superior retirar el rack de salida una vez lleno.

3. Cambios en el modelo para el Escenario 2

En el Escenario 2, como se detalla en el apartado

Escenario 2: Vaciado previo de la línea, se simula un control sobre el flujo de muestras hacia la línea que satura por la llegada de muestras inter-día. Se da el aviso para el vaciado previo de la línea y se bloquea durante el tiempo determinado.

En el modelo las variables que se van modificando en busca de una dinámica favorable se identifican como “vVacíaAntes” y “vBloqueaDurante”.

Para modificar el modelo existente y poder simular este escenario se incurre en una modificación previa al transporte.

Se comprueba si según el horario establecido, es un momento en el que se pueden mandar muestras a la Línea 1, o si se debe cambiar la asignación.

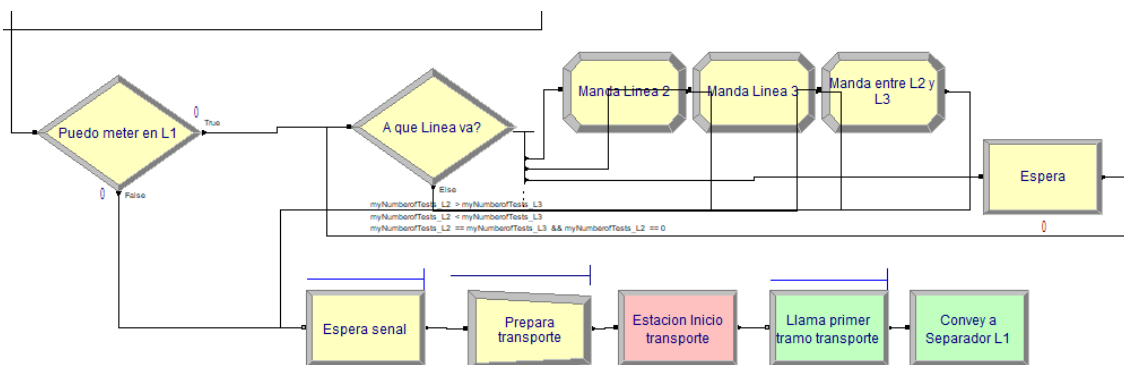


Figura 59. Modificación del modelo para el Escenario 2

Tras la división entre urgentes y ordinarias, se introduce un módulo “Decide”, depende de la hora que sea, y del tiempo establecido para vaciar la línea 1, se decide si se puede seguir hacia la línea 1.

Si no fuera el caso, se comprueba si le quedan pruebas pendientes en las otras líneas, y se le manda a la que corresponda. Si solo le quedase pasar por la línea 1 a la muestra, y no puede proseguir, entonces esta simplemente espera hasta que pueda ser lanzada.

La condición en función de los parámetros mencionados es:

$myLine == 1 \ \&\& \ (CalHour(TNOW) \geq (vHoraInicio - vVacíaAntes)) \ \&\& \ (CalHour(TNOW) \leq (vHoraInicio + vBloqueaDurante))$

De manera que, si la condición es cierta, se para de mandar muestras a la Línea 1.

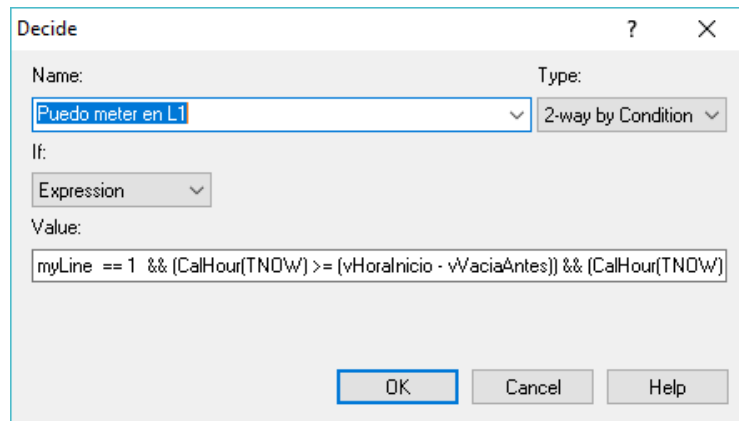


Figura 60. Detalles de la condición para mandar muestras a la L1

Siempre que no se esté en ese periodo en el que se para el flujo hacia la línea 1, el proceso es exactamente el mismo que en el del Escenario 0.

La clave en este escenario está en encontrar el tiempo suficiente de bloqueo para que la línea 1 no llegue a saturar el sistema, pero sin que sea excesivo, de manera que se aprovechen al máximo los recursos.

La reasignación de las líneas se hace en función del número de pruebas pendientes en las otras líneas, la muestra irá a la línea donde tenga que realizar más pruebas. Si el número de pruebas pendientes en cada línea es igual, se asigna de manera aleatoria.

4. Cambios realizados en el modelo para el Escenario 3

Para simular este efecto combinado simplemente se toma el modelo del Escenario 2, modificado como se aprecia en la Figura 59. Modificación del modelo para el Escenario 2.

El cambio necesario es la introducción de una variable “vHoraLanzar”, que registra a qué hora llega el lote, en función al tamaño y a cada cuanto tiempo lo introduce el operario en el sistema.

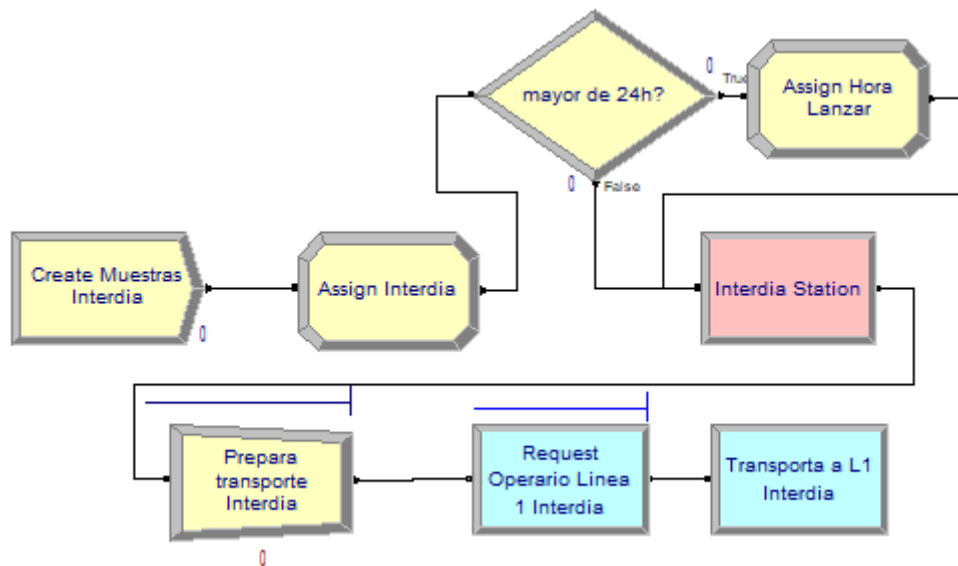


Figura 61. Ajustes del modelo para el Escenario 3

El lote llega, se registra su hora a la que se introduce en el sistema, y en base a esto se bloquea el flujo las horas determinadas por los parámetros presentados en el Escenario 2, “vVacíaAntes” y “vBloqueaDurante”.

En este escenario se van modificando cuatro parámetros, los del Escenario 1 y los del Escenario 2, ya que, al combinarlos, no tiene por qué ser el caso óptimo la combinación de los dos casos óptimos por separado, esto sería asumir que no hay interacciones entre estos parámetros.

Ambas medidas propuestas actúan con la misma intención, la de reducir el impacto del bloqueo de la línea 1 en el resto del sistema.

5. Cambios en el modelo para adaptar el transporte al Escenario 4

El Escenario 4, consiste en el cambio de distribución de las líneas transportadoras encargadas del transporte. La modificación correspondiente se explica en detalle en el Escenario 4: Modificación de la disposición del transporte, y se representa en la Figura 14. Cambio en la distribución del transporte.

El cambio consiste en el paso de un sistema de transporte secuencial, donde varios de los tramos son comunes a todas las líneas, a un transporte en estrella, donde las tres líneas son independientes, de manera que se elimina la interacción entre ellas.

Para simular este cambio, se modifica la Zona 3 del modelo, encargada del transporte de muestras ordinarias.

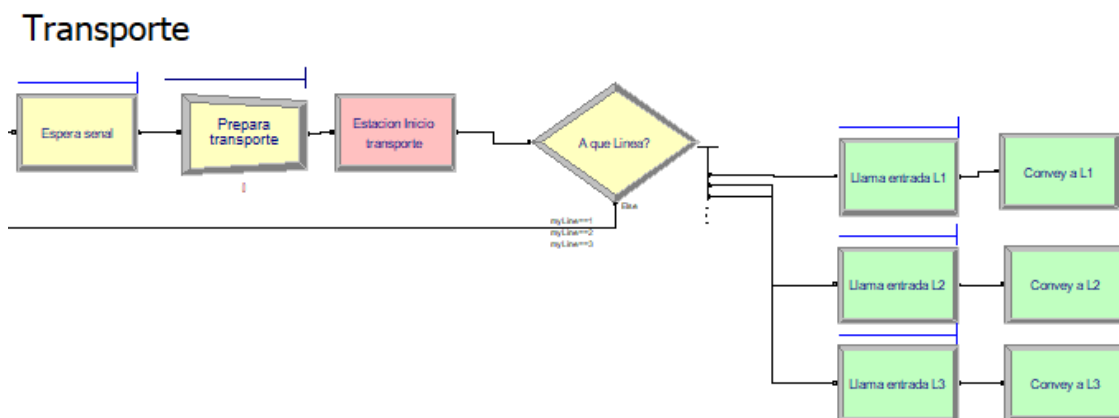


Figura 62. Módulos del nuevo modelo de transporte

La lógica del modelo para este transporte es similar a la seguida para el caso base, el cambio está en las estaciones intermedias:

- Desaparecen las estaciones intermedias correspondientes a los separadores
- Se reduce a una estación de inicio que sería el distribuidor automático, y desde allí el rack de muestras ya accede a la línea correspondiente.
- Se mantiene la condición de que debe haber espacio en el buffer de inicio de la línea para que el rack de muestras puede acceder al transporte, de manera que solo habrá un rack de muestras en el tramo de transporte.

Con esta medida, las pruebas que no necesitan pasar por la línea 1 (cuello de botella del sistema), salen sin bloqueo, y el transporte deja de bloquearse por saturación.

Los módulos utilizados son los mismos que en el caso base, aquellos destinados a modelar “conveyors”, “Access”, “Convey” y “Exit”. Las velocidades y características de los segmentos de la cinta transportadora se mantienen.

6. Cambios realizados en el modelo para el Escenario 6

Para simular el Escenario 6, detallado en el apartado Escenario 6: Sistema de Control de Inventario en las líneas, se inserta antes del inicio del transporte, la lógica del sistema de control de inventario en las líneas.

Mediante una serie de módulos que comprueban el número de muestras de cada línea en el sistema, la lógica evita el bloqueo del transporte, reasignando la línea de destino en función a la utilización.

El modelado es similar al del Escenario 2, aunque la complejidad se incrementa al tener que actuar sobre las tres líneas de manera simultánea.

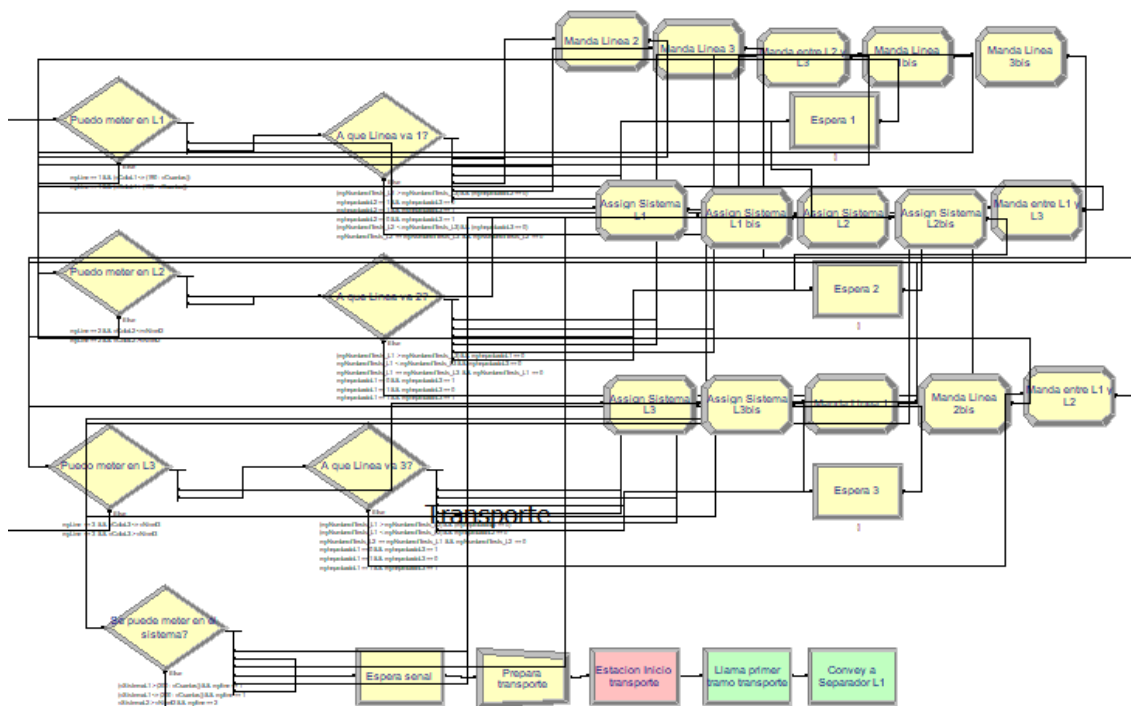


Figura 63. Módulos del sistema de control de inventario en curso

El sistema de control de inventario funciona de la siguiente forma:

- Primero se comprueba a qué línea va la muestra, y si en esta línea el nivel de inventario está por debajo del establecido, es decir, si hay sitio.
- En caso afirmativo, la muestra sigue hacia el transporte, realizando una segunda comprobación justo antes de entrar, por si hubiera cambiado el estado.
- Si no hay sitio en su línea, la muestra pasa a un módulo “Decide” con distintas condiciones que permiten reasignarle otra línea de destino, o hacer que espere la muestra y vuelva a comprobar el estado pasados un par de minutos.

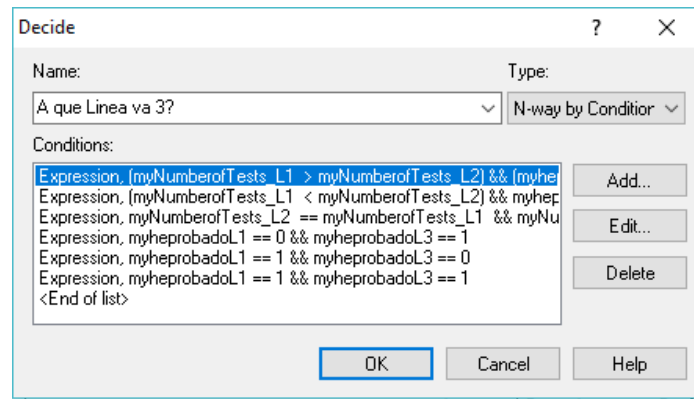


Figura 64. Lógica de reasignación de líneas

Para la reasignación de líneas se tiene en cuenta tanto el número de pruebas restantes por las otras líneas, como si ya ha intentado entrar en esa línea, para evitar un ciclo infinito.

- Si el número de pruebas restantes en las otras líneas es 0, o ya ha intentado entrar en las otras líneas de destino sin éxito, la muestra esperará hasta que vuelva a comprobar el estado de las líneas.
- Si el número de pruebas restantes es mayor que cero en alguna de las otras líneas y no ha intentado entrar con anterioridad, la muestra cambia su línea de destino y se le asigna la nueva.
- En caso de igualdad entre varias líneas se asigna de manera aleatoria, con una distribución discreta con la misma probabilidad.
- Las variables que intervienen son “vheprobadoenlineaX”, y el atributo “myNumberOfTestLX”.
- La variable que indica si se ha probado en una línea toma el valor 1, tras no poder entrar una línea en concreto, y se pone a cero tras haber intentado en las tres líneas y ser destinada a la zona de espera, para que se vuelva a comprobar el estado.
- El número de muestras en el sistema de cada línea se observa mediante la variable “vSistemaLX”, que suma 1 a su contador cuando una muestra entra en el transporte, y rebaja su contador también en uno, cuando una muestra entra en la bandeja de salida tras ser procesada.

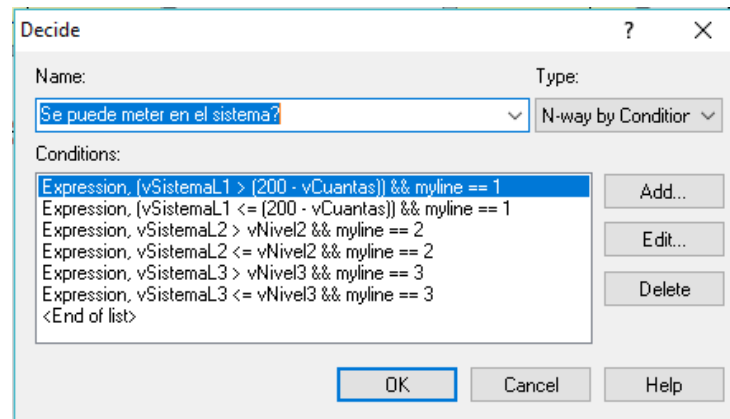


Figura 65: Módulo Decide previo a la entrada al transporte

Para hacer el nivel de inventario deseado dependiente del tamaño del lote de muestras inter-día en la línea 1, se toma la variable “vCuantas”. Como se ha visto anteriormente, esta variable indica el tamaño del lote introducido.

- El nivel de inventario de la línea 1 será el necesario para que se pueda absorber el lote que llega de muestras inter-día sin bloquear el transporte.
- Los niveles de las otras líneas se establecen con las variables “vNivel2” y “vNivel3”, ya que no dependen del tamaño del lote.
- Se podría hacer que todos los niveles fuesen dependientes del tamaño del lote que pueden llegar a recibir, pero eso queda pendiente por desarrollar en el futuro.

Para el análisis del escenario 6, se varían tanto el tamaño del lote de muestras inter-día, como el nivel de inventario deseado en las líneas.

7. Bibliografía

- [1] L. T. Leaven, "Improving Hospital Laboratory Performance: Implications for Healthcare Managers," *Hosp. Top.*, vol. 93, no. 2, pp. 19–26, 2015.
- [2] E. Hamrock, K. Paige, J. Parks, J. Scheulen, and S. Levin, "Discrete event simulation for healthcare organizations: A tool for decision making," *J. Healthc. Manag.*, vol. 58, no. 2, pp. 110–124, 2013.
- [3] A. Bal, C. Ceylan, and C. Taçoğlu, "Using value stream mapping and discrete event simulation to improve efficiency of emergency departments," *Int. J. Healthc. Manag.*, vol. 10, no. 3, pp. 196–206, 2017.
- [4] R. G. Ingalls, "Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler eds.," pp. 17–26, 2008.
- [5] M. D. Rossetti, *Simulation Modeling and Arena*. 2015.
- [6] A. Of and A. Batch, "ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE PROCESOS POR LOTES APLICANDO LA ESTADÍSTICA T 2 DE HOTELLING," vol. 77, no. 2, pp. 133–140, 2015.
- [7] A.- Bradley, "Arena User ' S Guide Rockwell Automation," no. November, 2004.
- [8] M. Land and R. Software, "Capítulo 5 . - Simulación en Software Rockwell Arena .," pp. 31–45, 2004.

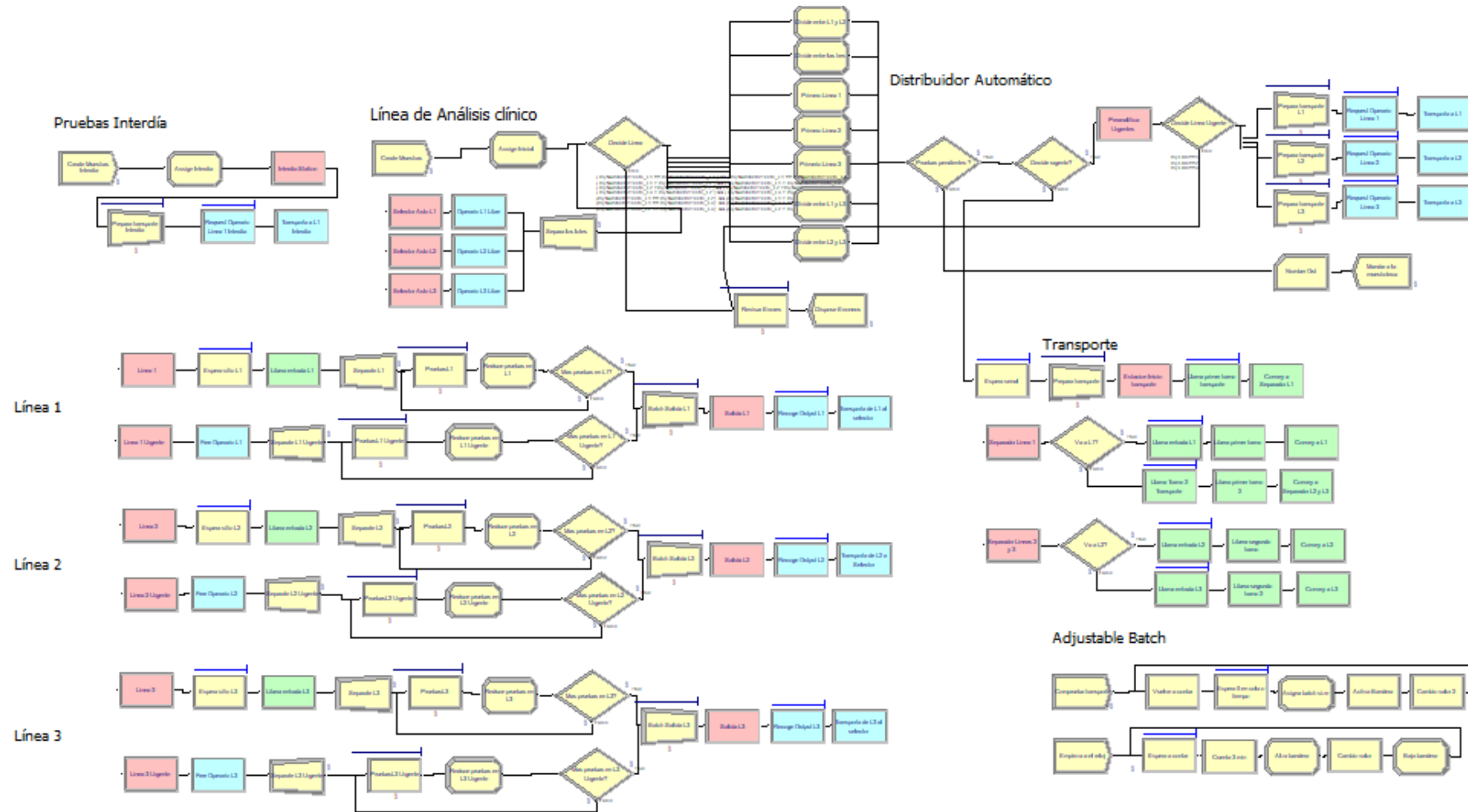
8. Anexos

En los Anexos se incluyen capturas del modelo completo adaptado a cada uno de los escenarios, por si se quisiese localizar los cambios realizados respecto al modelo base.

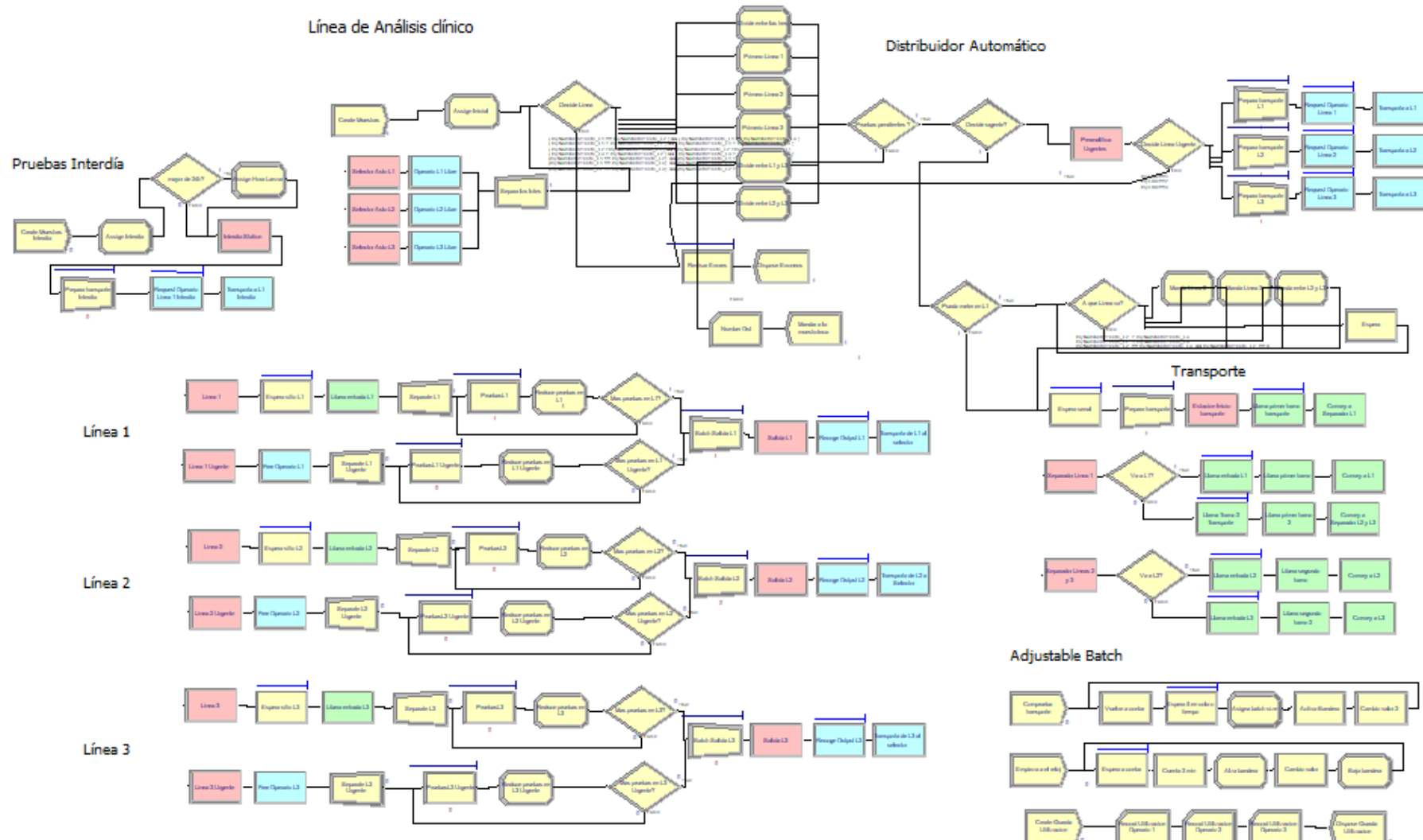
Los principales cambios entre modelos se encuentran en la zona de transporte y la lógica previa la entrada de este, y en la llegada de las muestras inter-día.

Las capturas están extraídas directamente de la interfaz del Software utilizado Arena.

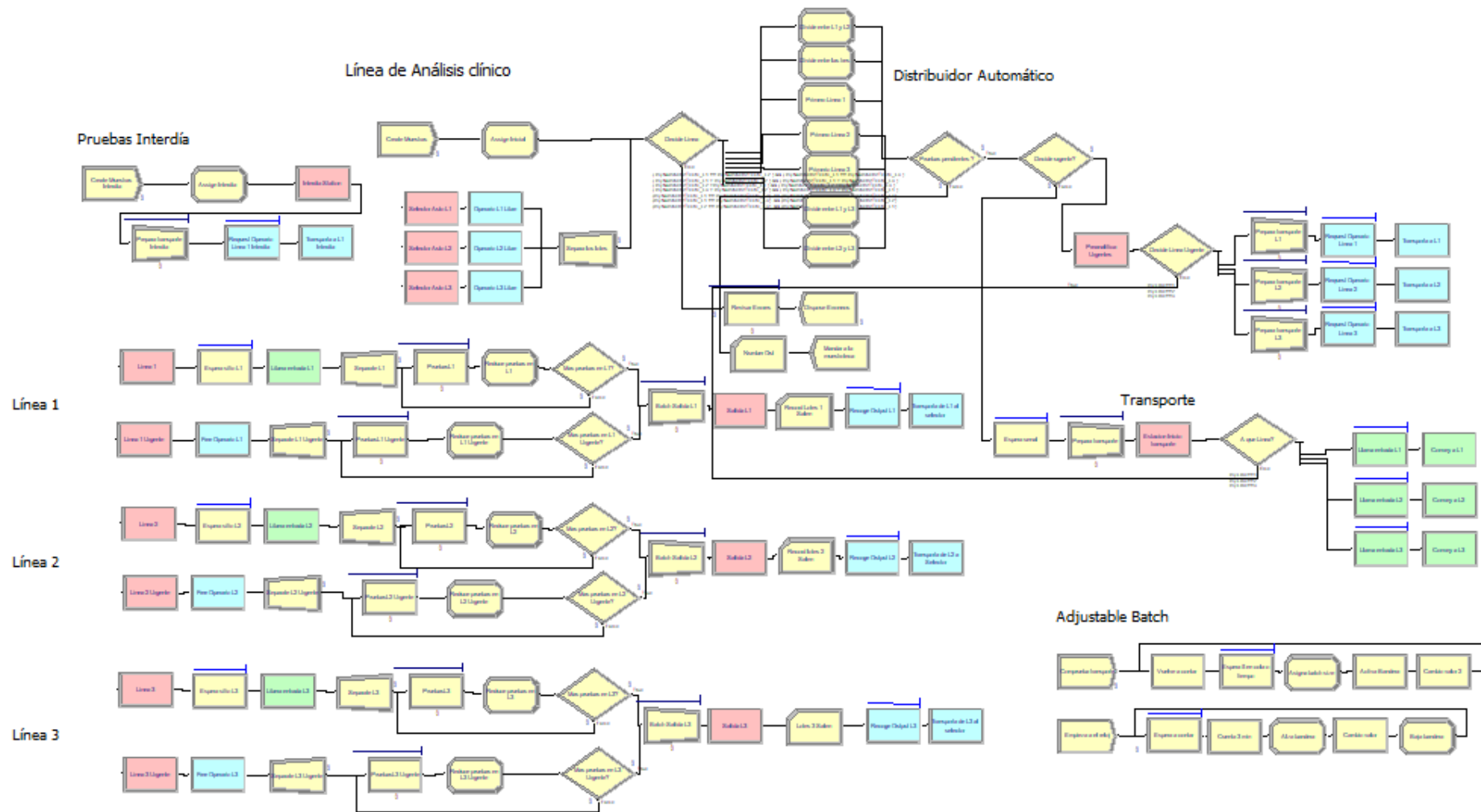
8.1. Modelo Base (Caso Base, Escenario 0 y Escenario 1)



8.2. Modelo modificado para los Escenarios 2 y 3



8.3. Modelo Escenario 4



8.4. Modelo Escenario 6

