

Fraccionamiento de Dosis Unitarias en el Hospital de Clínicas “Dr. Manuel Quintela”

Sebastián Amoza
María José Díaz

Proyecto presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero de Producción

Tutores:
Prof. Emiliano García
Prof. Ramiro Roselli

Montevideo, Uruguay
Octubre de 2025

Resumen Ejecutivo

La farmacia hospitalaria desempeña un papel fundamental dentro del sistema de salud, ya que procura el uso seguro, eficaz y adecuado de los medicamentos en pacientes hospitalizados. Una correcta gestión impacta directamente en la calidad de la atención, minimiza los errores en la dispensación y el uso eficiente de los recursos disponibles. En este sentido, los sistemas de distribución de medicamentos dentro de un hospital constituyen una estrategia clave para mejorar los procesos de abastecimiento y seguridad del paciente.

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio del proceso de preparación y distribución de dosis unitarias de medicamentos del Hospital de Clínicas “Dr. Manuel Quintela” de manera de identificar y proponer mejoras. El Hospital, en adelante HC, ubicado en Montevideo, Uruguay, de carácter universitario y público, ha propuesto incrementar la capacidad operativa del sector responsable del fraccionamiento de dosis unitarias con el fin de cubrir el 90% de sus camas hospitalarias mediante un sistema eficiente y seguro, superando así el 30% de cobertura que logra alcanzar actualmente.

Para abordar este planteo, se analizó el proceso operativo y logístico del sector de unidosis, desde el cortado de los principios activos hasta el envasado y etiquetado. A partir del relevamiento de datos históricos, observación de procesos y entrevistas con el personal, se construyó un modelo matemático de maximización de la producción, diseñado para planificar semanalmente qué principios activos cortar en función de la demanda histórica y sujeto a restricciones de capacidad, tiempos de trabajo y stock. El modelo fue sometido a un proceso de verificación y validación, tras lo cual se aplicaron análisis de sensibilidad y escenarios de producción. Los resultados mostraron que, si bien la infraestructura actual permite maximizar la producción, no alcanza para cubrir la demanda proyectada. En consecuencia, se concluyó que la incorporación de una máquina automática de cortado y envasado de unidosis, junto con una gestión adecuada de inventario, constituye la estrategia más efectiva para alcanzar los objetivos del Hospital.

Este proyecto brinda al HC una herramienta de planificación semanal y fundamentos cuantitativos que respaldan la incorporación de tecnologías destinadas a aumentar la capacidad productiva, contribuyendo así a la eficiencia del sistema y a la seguridad del paciente.

Palabras clave: Gestión de inventarios, farmacia hospitalaria, optimización, unidosis, principios activos, gestión del cambio.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todo el equipo de farmacia del Hospital de Clínicas, liderado por la Química Farmacéutica Natalia Medero, que nos recibió desde el primer día con total disposición y entusiasmo por colaborar, brindándonos nuevas ideas para enriquecer nuestro proyecto. En particular, a la Dra. Química Farmacéutica Ana Boronat quien nos acogió en su sector luego de haber recorrido distintas áreas del Hospital, ofreciéndonos su apoyo, sugerencias valiosas y la posibilidad de desarrollar el proyecto en su sector.

También queremos expresar nuestra gratitud hacia los auxiliares del sector unidosis, quienes colaboraron generosamente con su experiencia, respondiendo todas nuestras consultas y nos permitieron conocer en detalle los procesos que llevan a cabo durante sus jornadas laborales.

Agradecemos profundamente a nuestros tutores Ing. Ramiro Roselli e Ing. Emiliano García, por su compañía constante, su orientación comprometida y su disposición para resolver nuestras inquietudes a lo largo de todo el proceso. Su interés y motivación fueron claves para avanzar. Cabe destacar su esfuerzo por acercarnos con otros docentes, ampliando así nuestras perspectivas con diferentes opiniones. Al Ing. Pedro Piñeyro, quien amablemente nos brindó su vasto conocimiento sobre las herramientas de modelado matemático que fueron cruciales en el desarrollo de este proyecto.

Por último, pero no menos importante, extendemos nuestro agradecimiento a nuestras familias y amigos, quienes fueron un pilar incondicional de apoyo y motivación durante todo este recorrido.

Índice de contenido

1	Introducción	13
2	Marco Teórico.....	15
2.1	Farmacia Hospitalaria.....	15
2.2	Unidosis	16
2.3	Gestión de Inventario	17
2.3.1	Sistema de revisión continua	18
2.4	Pronóstico de demanda.....	20
2.5	Sistemas de clasificación de inventario	20
2.5.1	Sistema ABC	21
2.5.2	Clasificación Two-Bin	21
2.6	Gestión de inventario en Instituciones hospitalarias	22
2.7	Gestión del cambio.....	22
2.8	Selección de tecnología	23
2.9	Modelo matemático de la gestión de inventarios	24
3	Definición del problema	26
3.1	Acerca del Hospital de Clínicas	26
3.2	Descripción del caso de estudio	26
3.3	Infraestructura	27
3.4	Alcance del caso de estudio	28
3.5	Descripción de procesos en Sector Unidosis.....	29
3.5.1	Proceso de cortado y envasado manual	29
3.5.2	Proceso de cortado y envasado automático	31
3.5.3	Proceso de armado de pedidos de unidosis	32
4	Modelo Matemático	33
4.1	Modelado	33
4.1.1	Conjuntos	33
4.1.2	Parámetros.....	33
4.2	Variables de Decisión.....	34
4.2.1	Función Objetivo.....	34
4.2.2	Restricciones.....	34

4.2.3	Formulación del Modelo Matemático	35
4.3	Relevamiento de datos.....	36
4.3.1	Métodos	36
4.3.2	Datos relevados.....	37
4.3.3	Dificultades encontradas y consideraciones	40
4.4	Validación y Verificación.....	41
4.5	Ánalisis de Resultados	45
4.5.1	Resultados numéricos	45
5	Experimentación Numérica.....	54
5.1	Análisis de Sensibilidad	54
5.1.1	Análisis de Sensibilidad 1 – Variación del Tiempo máximo de producción (T_{MAX})	54
5.1.2	Análisis de Sensibilidad 2 – Variación de la Capacidad (C)	55
5.1.3	Análisis de Sensibilidad 3 – Variación del Stock Máximo (P_{MAXi})	58
5.1.4	Conclusiones Análisis de Sensibilidad	60
5.2	Análisis de Escenarios	62
5.2.1	Análisis de Escenarios 1 – Mejora de Procesos Productivos	62
5.2.2	Análisis de Escenarios 2 – Aumento de Personal de Trabajo	63
5.2.3	Análisis de Escenarios 3 – Incorporación de una máquina de corte	65
5.2.4	Conclusiones Análisis de Escenarios	66
6	Selección de Tecnologías.....	69
6.1	Necesidad de máquina de cortado y envasado automático	69
6.1.1	Selección de máquina de cortado y envasado automático	69
6.1.2	Ventajas de máquina de cortado y envasado automático	70
6.2	Gestión del Cambio	71
6.2.1	Identificación del impacto en el equipo actual	72
6.2.2	Estrategia de reubicación y formación del personal.....	72
6.2.3	Plan de comunicación y acompañamiento.....	72
6.2.4	Evaluación y seguimiento del cambio	73
7	Conclusiones	74
7.1	Conclusiones	74
7.2	Trabajos a futuro	75

7.2.1	Integración con Sistemas de Información Hospitalaria.....	76
7.2.2	Incorporación de incertidumbre en la demanda mediante modelos estocásticos 76	
7.2.3	Modelos de Aprendizaje Automático para Pronóstico de Demanda.....	76
7.2.4	Ánalisis de Riesgos en la Cadena de Suministro.....	77
	Referencias	78
	Anexos	80
	Anexo I: Listado de SKU relevados	80
	Anexo II: Modelo Matemático	84
	Código ejecutable del modelo	84
	Archivos de datos, salidas y análisis.....	86

Índice de Figuras

Figura 1 – Imágenes de Unidosis del HC.....	16
Figura 2 - Modelo de reposición de inventario [7].....	18
Figura 3 - Probabilidad de faltante en modelo [8].....	19
Figura 4 - Valores de z según el servicio [8]	19
Figura 5 - Ambiente de recorte de Dosis Unitarias.....	28
Figura 6 - Medicación entregada por deposito al Sector Unidosis.....	30
Figura 7 - Recorte manual	31
Figura 8 - Envasado manual.....	31
Figura 9 - Planilla de información de recorte de Unidosis	37
Figura 10 – Cantidad de Unidosis Cortadas.....	38
Figura 11 - Demanda de unidosis por semana.....	38
Figura 12 - Comportamiento del stock de SKU 1 durante el período seleccionado	44
Figura 13 - Producción por semana Caso Base.....	46
Figura 14 - Comparación de Stock de los SKU de mayor y menor demanda contra el Punto de Pedido correspondiente	50
Figura 15 - Tiempo producido sobre tiempo total Caso Base.....	50
Figura 16 - Comparación Cantidad Principios Activos cortados por semana Base Histórica vs Modelo Matemático	51
Figura 17 - Producción por semana Aumento Tiempo Máximo.....	54
Figura 18 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Tiempo Máximo	55
Figura 19 - Producción por semana Aumento Capacidad	56
Figura 20 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Capacidad	56
Figura 21 - Producción por semana Disminución Capacidad	57
Figura 22 - Tiempo producido sobre tiempo total Disminución Capacidad	57
Figura 23 - Producción por semana Aumento Stock Máximo.....	58
Figura 24 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Stock Máximo	59
Figura 25 - Producción por semana Disminución Stock Máximo.....	59
Figura 26 - Tiempo producido sobre tiempo total Disminución del Stock Máximo	60
Figura 27 - Producción por semana Mejora Procesos.....	63
Figura 28 - Tiempo producido sobre tiempo total Mejora Procesos.....	63
Figura 29 - Producción por semana Aumento Personal	64

Figura 30 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Personal	65
Figura 31 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Personal	66
Figura 32 - Tiempo producido sobre tiempo total Incorporación Máquina	66
Figura 33 - Máquina BC100	69
Figura 34 - Máquina Opus 30X	70
Figura 35 - Ubicación de las Máquinas Opus 30X y BC100	70

Índice de Tablas

Tabla 1 - Resumen Resultados Validación	41
Tabla 2 - Resultado prueba de validación con demanda nula	42
Tabla 3 - Ratio entre Stock y Stock Máximo en semana 30	46
Tabla 4 - Inventario en semana 52.....	48
Tabla 5 - Cantidad de Blísteres por Principio Activo	52
Tabla 6 – Resumen Resultados Análisis de Sensibilidad	61
Tabla 7 - Resumen Resultados Análisis de Escenarios	68
Tabla 8 - Listado total de SKU relevados	80

Glosario

- HC: Hospital de Clínicas “Dr. Manuel Quintela”.
- PA: Principio Activo.
- BPM: Buenas Prácticas de Manufactura.
- TOCAF: Texto Ordenado de Contabilidad y Administración Financiera.
- LT: Lead Time (tiempo entre la colocación de un pedido y su recepción).
- SS: Stock de Seguridad (inventario adicional para cubrir variaciones de demanda o retrasos).
- SKU: Stock Keeping Unit (unidad de mantenimiento de stock, identificación única de un producto).
- SIGAME: Sistema Informático de Gestión de Medicamentos (plataforma electrónica de prescripción en el HC).
- IMAE: Instituto de Medicina Altamente Especializada.

1 Introducción

La eficiencia en los procesos logísticos de instituciones hospitalarias impacta directamente en la calidad del servicio asistencial, de manera particular cuando se trata de la gestión de medicamentos. En este sentido, el sistema de preparación y distribución de unidosis, también denominadas dosis unitarias, cumple un rol fundamental al permitir un control preciso sobre la medicación que recibe cada paciente, optimizando recursos y brindándole a cada uno la cantidad exacta de lo que necesita. Este tipo de operación requiere un proceso coordinado entre las actividades de corte, envasado y almacenamiento de cada principio activo, las cuales deben asegurar la disponibilidad del medicamento en tiempo y forma.

En el HC la producción de unidosis se realiza de forma semiautomatizada y abastece al 30% de las camas del Hospital. Sin embargo, existe el afán institucional de poder aumentar la cobertura al 90% del mismo. Esto implica un desafío tanto en la capacidad operativa del sector como en la gestión de stock, que al momento de empezar el proyecto se realizaba de manera manual y con un bajo nivel de informatización.

El equipo de trabajo reconoció la oportunidad de aplicar conocimientos de ingeniería de producción a un ámbito de alto impacto social como la salud pública y se propuso colaborar con el Hospital de Clínicas en la mejora del sistema de unidosis. El proyecto surgió a partir del contacto directo con la persona responsable del sector, quien planteó las diversas problemáticas con las que convive día a día vinculadas a la planificación de la producción, el control de inventario y la necesidad de aumentar su capacidad de producción.

Para realizar este proyecto se realizaron varias visitas al Hospital, donde se estuvo en contacto con el personal a cargo de las actividades de corte y envasado de las unidosis. El personal a cargo brindó información histórica de los registros de producción de cada principio activo, además de mostrar el proceso actual de producción que lleva adelante el Hospital. A partir de esta información, se propuso un modelo de maximización que permite planificar la producción semanal de unidosis teniendo en cuenta las restricciones reales de su operación. Además, se plantearon análisis de sensibilidad y análisis de escenarios para evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes situaciones. Estas situaciones permiten dimensionar las implicancias de distintas decisiones estratégicas y aportan evidencias técnicas que pueden ser de utilidad para la toma de decisiones del Hospital.

Se espera que este Proyecto proporcione al HC una herramienta concreta para mejorar su gestión de inventario y su gestión operativa en el área de unidosis, con beneficios en términos de eficiencia, trazabilidad y seguridad del paciente.

El presente documento se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se desarrolla el marco teórico y se definen conceptos claves para el entendimiento del documento; en la sección 3 se define el caso de estudio y se delimitan los objetivos y alcance del proyecto; en la sección 4 se describe el modelo matemático utilizado para poder brindar al Hospital una correcta planificación de la producción; en las secciones 5, 6 y 7 se analizan distintos escenarios a fin de validar el modelo; en la sección 8 se aborda la necesidad de adquirir equipos tecnológicos que ayudan a cumplir con la demanda esperada. En la sección 9 se

exponen sugerencias para trabajos futuros y finalmente en la sección 10 se concluye el proyecto con las apreciaciones finales.

2 Marco Teórico

En la presente sección se introducen conceptos relativos a las farmacias hospitalarias, especificando las características de las dosis unitarias y aspectos generales de la gestión de inventarios. Posteriormente, se detallan cuestiones sobre la gestión del cambio y la selección de tecnologías.

2.1 Farmacia Hospitalaria

Dentro de la normativa uruguaya existen varias categorías de farmacias, las principales categorías mencionadas son: farmacia hospitalaria, farmacia comunitaria, farmacia rural, farmacia homeopática, droguería y farmacia herboristería. Este proyecto se centrará en las farmacias hospitalarias.

“Farmacia Hospitalaria es el establecimiento no comercial que integra la segunda categoría destinado a dispensar exclusivamente los servicios farmacéuticos a los pacientes ambulatorios o internados del hospital, sanatorio o policlínica, propiedad del Estado o de particulares, instituciones privadas que prestan asistencia médica colectiva (ley 15.181) y las policlínicas privadas gratuitas” [1].

A diferencia de las farmacias comunitarias, en las farmacias hospitalarias no hay intercambio monetario, la dispensación de medicamentos se realiza únicamente con la presentación de una receta profesional autorizada para pacientes ingresados. Según [2] los medicamentos se clasifican bajo las siguientes categorías:

- a. medicamentos psicofármacos y estupefacientes.
- b. medicamentos de venta bajo receta profesional autorizada.
- c. medicamentos de control médico recomendado.
- d. medicamentos de venta libre en condiciones reglamentarias.

Además, según la Ley de estupefacientes [3], los medicamentos que corresponden a esta categoría deben ser almacenados dentro de la farmacia en un lugar particular y además tener el detalle en un libro rubricado y debe ser sellado por las autoridades de Salud Pública.

Con base en todas estas disposiciones de las diferentes normativas, la Asociación de Química y Farmacia del Uruguay elaboró en 2019 la primera versión del Estándar Nacional de buenas prácticas de farmacia hospitalaria. El mismo fue revisado junto a la Organización Panamericana de la Salud y luego se publicó su segunda versión en febrero de 2022. En esta segunda versión se generó una hoja de ruta definida, para que se use de guía y soporte en las etapas de construcción y cambio para que cada profesional lleve a cabo en su Farmacia Hospitalaria [4]. Particularmente para el HC y lo que concierne a este proyecto, los procesos del Estándar Nacional de buenas prácticas que se estudiaron para el caso fueron “Distribución de medicamentos o insumos a áreas o servicios de la institución”, “Preparación de medicación especial”, “Gestión de medicamentos en áreas de almacenamiento” y “Dosis unitarias”.

En tal sentido, el proceso de Distribución se define como el proceder para abastecer áreas o servicios de la institución. Se indica que se debe tener una política de reposición de stock a las diferentes áreas o servicios en donde se defina: un listado de medicamentos y cantidades, la frecuencia de la reposición, documentación la cual indique la solicitud de reposición y un responsable de estas tareas.

Por su parte, el proceso de Preparación de medicación especial es referido en el manual como un proceso que: “*engloba todos los procesos del área de producción en la Farmacia Hospitalaria e implica la elaboración de un lote con su correspondiente vencimiento y criterios de liberación.*” Además, define el subproceso de reenvasado de especialidades farmacéuticas sólidas orales, el cual resultó ser de relevancia para el proyecto. El objetivo de este subproceso que es llamado Dosis Unitarias es: “*generar monodosis que contengan la FF (formas farmacéuticas) sólida correcta, la etiqueta correcta y cuenten con la calidad adecuada*”. Este subproceso implica una atención directa con el usuario, al que se le entrega medicación individualizada y válida para cubrir los requisitos del tratamiento indicado por un médico. Esta medicación sería para el usuario hospitalizado con un periodo menor a 24 horas.

Por último, el Estándar Nacional de buenas prácticas de farmacia hospitalaria establece que el proceso de Dispensación ambulatoria debe asegurar la certeza del paciente al entregarle al mismo la medicación correcta, tanto en la presentación como en la dosis, como también en la cantidad indicada por el médico tratante.

2.2 Unidosis

La dispensación por unidosis es un sistema de distribución de medicamentos que garantiza mayor seguridad, reduce errores y optimiza recursos al entregar a cada paciente la dosis exacta, en el momento adecuado y con el medicamento correcto [5].



Figura 1 – Imágenes de Unidosis del HC

Los sistemas de dispensación de medicamentos en unidosis han sido adoptados en múltiples instituciones de salud a nivel internacional, en particular en hospitales de mediana y gran escala, donde el volumen de pacientes hace necesario un control más estricto de la farmacoterapia.

Uno de los principales beneficios del fraccionamiento de dosis unitarias es la reducción de errores de medicación. Al entregar cada dosis fraccionada, identificada y lista para el consumo, se minimizan equivocaciones en la preparación, cálculo o dispensación de los fármacos, lo cual se traduce en mayor seguridad para los pacientes.

En el plano económico, los sistemas de unidosis permiten reducir las pérdidas por vencimientos de medicamentos, evitan desperdicios por aperturas innecesarias de blísteres y mejora la trazabilidad de cada fármaco, permitiendo un uso más racional del stock disponible.

Otro aspecto relevante es la gestión de residuos hospitalarios. Al utilizar empaques individuales y precisos, se genera una menor cantidad de desechos farmacológicos en comparación con sistemas tradicionales, en los que sobrantes de envases multidosis deben ser descartados. Esto no solo reduce costos de disposición final, sino que también contribuye a políticas institucionales de sostenibilidad y cuidado ambiental.

Por último, los sistemas de unidosis mejoran la eficiencia administrativa y el control del consumo. Permiten registrar con mayor exactitud qué medicamento recibe cada paciente, cuándo y en qué dosis, lo que favorece la auditoría y la transparencia en los procesos asistenciales. Además, el personal de enfermería invierte menos tiempo en preparar la medicación, pudiendo destinarlo a tareas de cuidado directo al paciente.

2.3 Gestión de Inventario

La gestión de inventarios es el control y la administración de los insumos de una empresa, desde el ingreso hasta la salida de ellos. El principal objetivo de la gestión de inventarios es tener claridad sobre lo que se dispone en el depósito para poder comprar en el momento adecuado.

Según [6] las empresas deben mantener un suministro de inventario por las siguientes razones: mantener la independencia entre operaciones, cubrir la variación de la demanda, permitir la flexibilidad en la programación de la producción y protegerse contra la variación del tiempo de entrega

La gestión de inventario de acuerdo con [7] se puede considerar como uno de los componentes de la Cadena de Suministro. En [7] se define como el conjunto de actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes, desde la etapa de extracción de materia prima hasta el usuario final, así como los flujos de información relacionados.

En [8] están definidos cinco tipos de inventario:

- a. Inventario en tránsito: inventarios en tránsito entre los niveles de la cadena de suministro. Se da generalmente cuando el movimiento es lento o sobre grandes distancias.
- b. Inventarios de especulación: inventarios resultantes del manejo financiero.
- c. Inventario regular o cíclico: son los necesarios para satisfacer la demanda promedio durante el tiempo de reaprovisionamientos.

- d. **Inventario de seguridad:** el inventario que se crea como protección contra la variabilidad de la demanda de existencia y el tiempo de reaprovisionamiento.
- e. **Inventario obsoleto:** inventario cuando los productos son de alto valor, perecederos o robados.

Para lograr una gestión de inventarios correcta es necesario determinar el tipo de demanda de los insumos, las cuales pueden ser, dependiente o independiente. Las demandas dependientes se generan a partir de decisiones internas de la organización o empresa, mientras que las demandas independientes están determinadas por entes externos, como clientes o consumidores.

La manera de estimar la demanda dependerá de qué tipo sea. Para las demandas independientes es común utilizar métodos de estimación a partir de la información histórica teniendo en cuenta diferentes aspectos del producto. En el presente trabajo se consideró que la medicación administrada por el sector de unidosis se encuentra sujeta a demanda independiente.

2.3.1 Sistema de revisión continua

Dado que, en muchos escenarios, no se espera que la demanda sea constante durante períodos prolongados de tiempo, se busca administrar el inventario de forma de predecir una demanda aleatoria.^[7] Para lograr esto, se debe controlar de forma continua el inventario disponible, es decir, el inventario disponible físico sumado al inventario que ya está ordenado. ^[7] Cuando el nivel del inventario es menor a un valor predeterminado, se realiza una nueva orden. Este nivel predeterminado es llamado Punto de pedido o punto de reorden, con este sistema, solo podría haber faltante de producto en el intervalo de tiempo de entrega, que sería entre el momento de realizar un pedido y su recepción. ^[9] En las figuras 2 y 3 se representa el comportamiento del modelo. En la 3 se ilustra el caso de faltante de producto referido previamente.

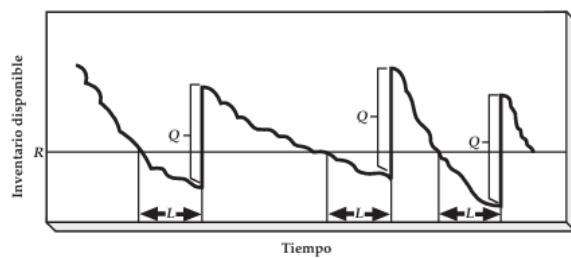


Figura 2 - Modelo de reposición de inventario [7]

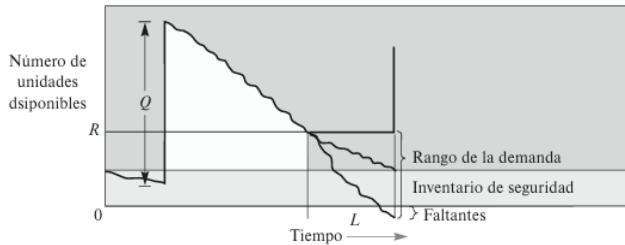


Figura 3 - Probabilidad de faltante en modelo [8]

Para enfrentar la variabilidad que existe en la oferta, demanda y *lead time* en un período determinado, es común hacer uso de un stock de seguridad (SS) [6]. El *lead time* (LT) se define en [9] como el tiempo que transcurre desde el momento que se decide realizar una reposición hasta que la orden está físicamente disponible en el stock.

Como indica en [7], los valores de punto de reorden y stock de seguridad son determinados por la probabilidad de faltante de inventario. Para esto se debe establecer el nivel deseado de servicio, que, según [6], se define como el porcentaje de la demanda de los clientes satisfechos a partir del inventario. Por lo que se define el factor de seguridad z , siendo el número de desviaciones estándar de la variabilidad de la demanda que es necesario emplear para poder protegerse contra los faltantes de inventario. La elección de su valor está asociada a un nivel de servicio deseado. En la tabla debajo se observa el valor que toma z dependiendo del nivel de servicio y el faltante de stock:

z	Nivel de servicio (%)	Faltante de inventario (%)
0	50.0	50.0
.5	69.1	30.9
1.0	84.1	15.9
1.1	86.4	13.6
1.2	88.5	11.5
1.3	90.3	9.7
1.4	91.9	8.1
1.5	93.3	6.7
1.6	94.5	5.5
1.7	95.5	4.5
1.8	96.4	3.6
1.9	97.1	2.9
2.0	97.7	2.3
2.1	98.2	1.8
2.2	98.6	1.4
2.3	98.9	1.1
2.4	99.2	.8
2.5	99.4	.6
2.6	99.5	.5
2.7	99.6	.4
2.8	99.7	.3
2.9	99.8	.2
3.0	99.9	.1

Figura 4 - Valores de z según el servicio [8]

En [6] define el SS (en unidades) para estar abastecido en el LT como el nivel de servicio establecido por la desviación de la demanda:

$$SS = z * \sigma_{demanda}$$

Una vez establecido el nivel de servicio y el z , el punto de pedido (en unidades) se calcula como la suma de la demanda (en unidades por semanas) durante el LT (en semanas) y el stock de seguridad (en unidades):

$$PP = Demanda\ semanal * LT + z * \sigma_{demanda}$$

2.4 Pronóstico de demanda

Los pronósticos de demanda son elementos críticos en la gestión de cualquier tipo de organización. Su determinación repercute en todos los ámbitos de la empresa, ya sea en logística, compras o manejo de inventarios. Un pronóstico erróneo puede afectar tanto la capacidad de cumplimiento de una empresa como, en el caso de un hospital, la disponibilidad de medicamentos para los pacientes.

Según el tipo de operación se pueden encontrar diferentes tipos de demanda [8]:

- a) Demanda temporal: es la demanda más comúnmente planificada a corto plazo. La misma fluctúa en el tiempo en función de diferentes variables como pueden ser un aumento o disminución en el consumo a partir del crecimiento o decrecimiento de la organización, o debido a que el consumo es cíclico o estacional.
- b) Demanda espacial: es la demanda temporal con la diferencia que también se debe definir *cuándo* y *dónde* se almacenarán los mismos. Una correcta planificación de la demanda espacial permite hacer que todo fluya más suavemente en cualquier organización. Una planificación adecuada de dónde y cómo se guardará la demanda permite ser más eficiente a la hora de realizar los diferentes movimientos logísticos que puedan surgir.
- c) Demanda regular: la demanda de los diferentes productos forma patrones de consumo en función de diferentes variables como las estaciones, consumos aleatorios o tendencias. Mientras que las variaciones aleatorias sean pequeñas respecto al resto de las variaciones, siempre se podrá obtener un pronóstico adecuado en función de la demanda regular.
- d) Demanda irregular: Una demanda irregular se observa cuando el consumo es intermitente, de bajo volumen en general, y un alto grado de incertidumbre. La incertidumbre se da por dos factores, el primero es la cantidad que consumirá, y el segundo es cuando se consumirá. Estas variaciones pueden deberse a diferentes motivos, tales como que el insumo sea nuevo o el consumo de éste sea esporádico.

2.5 Sistemas de clasificación de inventario

En esta sección se desarrollan distintos sistemas de clasificación de inventarios utilizados en el ámbito de la logística, y que pueden ser aplicados en entornos hospitalarios.

2.5.1 Sistema ABC

Es un sistema utilizado en empresas de diferentes rubros, el cual consiste en segmentar y clasificar los productos que se manejan en un depósito. Los criterios aplicables dependen de los objetivos de cada organización, pero generalmente responden a factores como el valor monetario de los productos o la rotación que tengan. Este sistema se basa en el Principio de Pareto, del cual surge la regla del 80/20. Aplicado a la gestión de inventarios, este principio afirma que, el 20% de los productos son los que generan el 80% del movimiento tanto a nivel físico como en los ingresos de la empresa. Con el sistema ABC se busca priorizar los ítems de mayor relevancia para la empresa en función de un criterio definido previamente, para no asignar la misma cantidad de recursos a todos por igual [10].

De este modo, aplicado a la farmacia hospitalaria, los productos de Categoría A, podrían ser aquellos dentro del 20% que representan el 80% de los movimientos realizados. En este sistema, tales productos deberán ser controlados de manera más rigurosa para evitar cualquier quiebre de stock o escasez que ponga en peligro al hospital en no tener una medicación indispensable. Para los productos que se encuentran en la categoría A se recomienda un control semanal. [7] Los siguientes, los de Categoría B, tienen una importancia moderada, siendo el 30% de los productos, y por lo general no suelen aportar más que el 20% de la demanda. De todas formas, es necesario tenerlos vigilados y controlados. Por último, se encuentran los de Categoría C, los cuales no superan el 5% de los movimientos totales de inventario. En este caso, suelen ser más del 50% de los productos, la empresa deberá reducir al máximo la cantidad de recursos destinados para su control. Se recomienda controlar una vez por mes.

2.5.2 Clasificación Two-Bin

El sistema Kanban de dos contenedores, o también conocido como el método de clasificación “Two-Bin” es una estrategia de gestión de inventario que utiliza dos contenedores físicos para manejar piezas pequeñas pero críticas. Es un sistema de clasificación muy utilizado en la industria farmacéutica.

Los trabajadores extraen los productos de un contenedor hasta que éste esté vacío, luego cambian al segundo contenedor mientras realizan un pedido para reponer el primero. El aspecto más importante aquí es que el tiempo de consumo del segundo contenedor debe ser mayor al tiempo de reabastecimiento del primero [11]. Este enfoque destaca por su simplicidad visual, facilitando la rápida comprensión por parte del personal y eliminando la necesidad de procedimientos adicionales de control de inventario. La señal clara para la reposición se vuelve evidente, reduciendo significativamente el tiempo dedicado a las actividades diarias de gestión de inventarios. Adicionalmente no se genera un exceso de inventario [12].

No obstante, la principal desventaja radica en la determinación del tamaño adecuado de los contenedores. Un tamaño muy pequeño puede requerir un *lead time* demasiado corto, mientras que un aumento excesivo incrementa significativamente el inventario a mantener en el sistema [13].

2.6 Gestión de inventario en Instituciones hospitalarias

A la hora de enfocarse en la cadena de suministro de un hospital es necesario prestar especial atención a la gestión de su stock. En los hospitales no se pierden ventas o clientes por una mala gestión, sino que pueden perderse vidas o afectar la seguridad de los pacientes [14].

La mala gestión puede darse tanto por falta como por exceso de insumos. Si un insumo es necesario para el tratamiento de un paciente y el hospital no cuenta con el stock suficiente, puede generar un impacto directo en la salud del paciente. Asimismo, si existe exceso de stock, este puede convertirse en obsoleto por fechas de vencimiento u otros motivos. Por tanto, el nivel de servicio es una limitante para la buena gestión de stock dentro de las instituciones de salud.

Por otro lado, se debe asegurar que durante toda la permanencia en la institución hospitalaria debe estar en las condiciones de almacenaje y seguridad como especifica el fabricante, para no generar alteraciones en los medicamentos que puedan afectar a los pacientes [4]. Adicionalmente, como fuera mencionado, un sobre stock de medicación puede generar vencimientos, por lo que la institución debe realizar revisiones continuas y registros de los medicamentos que estén por vencer para sacarlos de circulación y que no sean suministrados a los pacientes. Para esto, es importante el orden y la identificación de la ubicación de los medicamentos [15].

Por último, se deben tener en cuenta las complejidades que pueden surgir en las órdenes de compra por tratarse de un organismo público. El HC está regido por la Universidad de la República, por tanto, sus compras están reguladas por el Texto Ordenado de Contabilidad y Administración Financiera (TOCAF). La normativa se basa fundamentalmente en Leyes de Presupuesto y de Rendición de Cuentas, aunque también recoge el contenido de otras leyes en materia financiero contable. Entre otras cosas, establece cómo debe comprar el Estado y quién puede emitir dicha orden de compra en cada caso. Si bien, es razonable que este proceso esté regulado y estandarizado, también puede implicar que no siempre se puedan comprar insumos necesarios que no fueron previstos previamente [16].

2.7 Gestión del cambio

La consultora KPMG define la gestión de cambio como una cultura que:

"busca facilitar y conseguir la implementación exitosa de los procesos de transformación, lo que implica trabajar con y para las personas en la aceptación y asimilación de los cambios y en la reducción de la resistencia a los mismos" [17].

Lo importante dentro de la gestión del cambio es poder dar las habilidades para apoyar a las personas y a los sistemas que se encuentran involucrados durante la transición del cambio. Esto incluye un enfoque en como realizar esta comunicación, pero aún más importante en como percutiría en la cultura de la empresa [18].

La gestión del cambio es una habilidad muy reconocida en los líderes del siglo actual, debido a la rapidez con la que cambian los procesos y el mundo. Es necesario tener una buena gestión del cambio para reducir el impacto que puede llegar a tener sobre los empleados. Una correcta gestión asegura que el equipo de trabajo no sufra frustraciones ni estrés laboral, así como también un aumento de productividad y buen ambiente en el lugar de trabajo [17].

Dentro del procedimiento en la gestión del cambio se pueden definir 9 pasos claves para su correcta implementación [19]:

1. Identificar necesidad del cambio: en este paso es necesario identificar las carencias y dificultades actuales a las que se está enfrentando el equipo de trabajo a través de un análisis organizacional.
2. Analizar y evaluar la realización del cambio: por medio de la búsqueda de información se deben evaluar los beneficios y las desventajas que tendría implementar el cambio, así como también los riesgos que podrían generarse a partir del cambio.
3. Planificación: es necesario definir los objetivos del cambio, los responsables de estos, los tiempos y las fechas de cumplimiento.
4. Comunicación del cambio: este paso es fundamental para lograr una correcta implementación del cambio. Es necesario comunicar de forma clara y detallada las razones de este y motivar al equipo de trabajo para obtener buenos resultados en el mismo.
5. Implementación del cambio: en este paso, todo el equipo de trabajo debe velar por la realización del cambio deseado y trabajar arduamente para que el mismo se lleve a cabo.
6. Comunicación de los resultados periódicamente: es necesario para mantener al equipo y los implicados en el cambio motivados comunicar periódicamente los resultados de su trabajo que se vean reflejados.
7. Evaluación del cambio realizado: se debe evaluar constantemente el cambio realizado para poder corregir cualquier problema o dificultad que se presente en el proceso y realizar las acciones correspondientes.

2.8 Selección de tecnología

En el ámbito laboral de empresas de producción, la tecnología abarca habilidades, técnicas, procedimientos y sistemas utilizados en el trabajo. La selección de tecnología implica considerar varios requisitos, como la duración útil, el espacio necesario, el costo, la justificación, los beneficios y desventajas, el conocimiento existente y la capacitación de los trabajadores en relación con la nueva tecnología [20].

La tecnología puede clasificarse de la siguiente manera [20]:

- a) Básicas: cruciales para el funcionamiento diario de la empresa y se utilizan en los procesos de producción.
- b) Claves: se emplean estratégicamente en momentos específicos y tienen un impacto significativo en la competencia. Son esenciales para alcanzar el éxito deseado.
- c) Emergentes: utilizadas durante el desarrollo de un proyecto, estas tecnologías pueden generar un impacto potencialmente en la producción. Con el tiempo, algunas emergentes pueden convertirse en tecnologías clave.

Antes de seleccionar la tecnología para la organización o empresa se debe tener en cuenta la capacidad básica que tiene su actual entorno informático, así como también establecer una base común entre todas las partes de su organización, permitiendo que la tecnología pueda estar integrada a la misma. La selección de tecnología implica considerar diversos aspectos que se pueden clasificar según su impacto y aplicación estratégica.

Para cualquier proceso de selección de tecnología se deben seguir de alguna manera los siguientes pasos [21]. En primer lugar, se debe dar un espacio para el descubrimiento técnico o exploración tecnológica, donde se evalúen las diferentes opciones que hay en el mercado y cómo otras empresas las utilizan. Luego, se debe analizar y evaluar la tecnología elegida, de manera de reconocer las ventajas y desventajas de esta y cómo podría llegar a facilitar el trabajo requerido. Por último, se debe hacer un estudio de gastos, costes y presupuestos de la informática y evaluar si son posibles para dicha organización.

2.9 Modelo matemático de la gestión de inventarios

En la presente sección se describe un conjunto de trabajos recientes, buscando ampliar y enfocar lo teórico al problema práctico que se buscó abordar.

R. Uthayakumar y S. Priyan (2013) [22] desarrollaron un modelo de gestión integrada de inventarios que conecta directamente a una farmacéutica y un hospital. El objetivo de este es reducir los costos a lo largo de la cadena de suministro. Frente a la falta de conocimiento especializado en logística por parte de los administradores sanitarios, los autores de este artículo desarrollan un enfoque basado en investigación operativa para optimizar tamaños de lote, tiempos de entrega y frecuencia de entregas (Q_i, L, n). Además, buscan minimizar el costo total del sistema al mismo tiempo que garantizan altos niveles de servicio al hospital, bajo restricciones reales como espacio. Por otro lado, introducen un tratamiento probabilístico realista de la demanda durante el *lead time* (utilizando distribución Laplace), para anticipar faltantes y evitar expiraciones. El trabajo ofrece resultados concretos, demostrando la aplicabilidad del modelo numérico en entornos reales del sector salud.

Otro antecedente relevante para este trabajo es el proyecto desarrollado en el Hospital Pasteur [23], donde se estudiaron las operaciones logísticas de la farmacia hospitalaria con un enfoque en la automatización y la gestión de inventarios. Este estudio constituyó un aporte significativo para la gestión logística hospitalaria al demostrar la factibilidad de aplicar herramientas de ingeniería en el sector salud y sentar las bases para la implementación de

sistemas robotizados en el país. El presente proyecto en el Hospital de Clínicas se apoyó en la experiencia acumulada en el Hospital Pasteur, tomando sus aprendizajes y metodologías de análisis como punto de partida. A partir de allí, se planteó un enfoque adaptado a las necesidades propias del sistema de unidosis, incorporando el desarrollo de un modelo matemático y propuestas tecnológicas que permitan dar respuesta a las problemáticas específicas identificadas en esta institución.

Por su parte en el año 2017, se desarrolló otro Proyecto Final de Grado en el HC enfocado en la Gestión de Inventario de Insumos Médicos Especializados, con énfasis en el área de Hemodinamia del Instituto de Medicina Altamente Especializada (IMAE) [24]. El trabajo abordó la problemática asociada al manejo de insumos críticos, de alto costo y carácter perecedero, utilizando un modelo de programación matemática de revisión periódica. Este permitía planificar compras y controlar inventarios, considerando restricciones presupuestales, niveles de servicio, y la vida útil de los insumos. Entre sus principales contribuciones se destacó el desarrollo de una herramienta que facilitaba la toma de decisiones operativas y estratégicas en la gestión del stock quirúrgico.

Este antecedente resultó relevante para la presente investigación, ya que ambos trabajos comparten el enfoque cuantitativo basado en modelos matemáticos, el contexto hospitalario público y la necesidad de asegurar la disponibilidad oportuna de medicamentos o insumos para la atención clínica. Mientras el referido proyecto se centró en la optimización del inventario de insumos médicos, el presente trabajo se enfoca en la optimización de la producción y distribución de dosis unitarias de medicamentos, dentro del mismo hospital. Así, ambos proyectos abordan distintos eslabones de la cadena logística hospitalaria con el objetivo común de mejorar la eficiencia, la seguridad del paciente y la gestión de recursos en entornos de alta complejidad.

3 Definición del problema

En la presente sección se pasará a detallar el caso de estudio en el que se basará este trabajo.

3.1 Acerca del Hospital de Clínicas

El HC es un Hospital Universitario regido por la Universidad de la República. El Hospital, ubicado en el barrio Parque Batlle, inició su historia entre 1887 y 1889, cuando Pedro Vizca y Manuel Quintela plantearon la necesidad de construir un hospital exclusivo para universitarios y la práctica de docencia clínica, que permitiera el contacto directo con pacientes. Fue entonces, que en el año 1930 se coloca la piedra fundamental en el actual terreno del HC y comienza la obra. Luego de 22 años, el HC fue inaugurado. La esencia de ser un Hospital Universitario se funda en el papel que brinda al constituir un ámbito académico en el que se crea, enseña y difunde el conocimiento de los procesos de salud-enfermedad, dentro del marco del quehacer de la Universidad de la República.

El Hospital funciona como un hospital general, de adultos, para episodios con breve periodo de estancia y de alta complejidad. También, está incluido en la Red de Servicios de Salud y está abierto a la comunidad en el sentido de brindar atención a las personas independientemente de su condición social. La misión del Hospital es: *“Brindar atención a la salud de las personas, de calidad, con profundo respeto y compromiso hacia ellas; a través de la cual, el Hospital deviene ámbito formador de recursos humanos y de generación de conocimientos, contribuyendo al desarrollo del nivel de salud de la población, optimizando la utilización de los recursos que a tales fines le son confiados.”*¹

3.2 Descripción del caso de estudio

El HC cuenta con un sector de producción para el cortado y preparado de Unidosis. El equipo de Unidosis está conformado por dos personas que trabajan de 8 a 14 horas y una persona que trabaja de 8 a 16:30 horas. A su vez, también pueden apoyar en el sector pasantes de auxiliar de farmacia, donde se les enseñan y muestran los distintos procesos de trabajo. Estos suelen hacer tareas sencillas y que no requieren tanta experiencia para lograr una optimización del tiempo de trabajo.

Su lugar de trabajo es una pequeña oficina donde se realizan las operaciones de cortado de blísteres y empaquetado con sellador al vacío manual. Además, cuentan con otra oficina con una máquina empaquetado automático. Esta, es una máquina antigua que solo uno de los empleados sabe utilizarla y puede producir hasta 1.000 unidosis por hora. Según los datos brindados por la encargada del Sector Unidosis del HC, el equipo de unidosis puede producir por mes un promedio de 22 mil comprimidos, y se sabe que con el equipo actual se puede producir como tope 30 mil comprimidos mensuales. Se realizan excepciones en cuanto a las unidosis pediátricas ya que el cortado y envasado es realizado en un área

¹ Sitio oficial del Hospital de clínicas: <https://www.hc.edu.uy/index.php/mision-y-perfil>

aparte, por fuera de los procesos normales, esto es debido a que dicha tarea requiere mayor cuidado y suele llevar más tiempo. En este caso, se diluyen y pesan según la indicación médica, por lo que este tipo de unidosis son espaciadas en el tiempo y dependen de los internistas.

Durante las horas de trabajo y en el proceso de cortado y envasado manual, el equipo tiene sus propios descansos. Estos son para compensar la fatiga de los dedos debido al uso de la tijera, para descansar la espalda tensionada por los largos períodos en una posición sentada fija, o simplemente tomar agua.

El control de stock se hace a través de unas plantillas físicas para cada medicamento en las que el personal del HC escribe cuántas unidosis se consumieron o se produjeron y cuántas quedaron en total como stock. Cuando un usuario descarga, indica de dónde lo hace, si de unidosis o de cajas. Al ser cartones físicos para la contabilización de stock, en ellos pueden existir errores de digitación o de cálculos.

En el lugar de trabajo, no se cuenta con computadora para el desarrollo de la tarea, sino que ésta se encuentra en un pasillo que conecta la producción con el depósito. Para hacer las etiquetas que lleva cada unidosis u otras cuestiones, el operario debe moverse de lugar y verificar si la computadora está disponible en ese momento.

En cuanto a la gestión de stock y preparación de pedidos, el equipo de trabajo revisa periódicamente lo que se fue consumiendo en la semana, y sumado a los registros de demandas históricas del Hospital y a la experiencia de uno de sus integrantes, decide cuántas cajas de medicamentos es necesario solicitar al depósito del Hospital. Sin embargo, se observa que la demanda depende de los médicos tratantes, en particular, de sus preferencias por ciertas drogas según el año o la época.

Luego de la revisión, la encargada de hacer el pedido envía los fármacos necesarios y la cantidad de cajas de cada uno para que puedan llegar a su sector y comenzar la producción. De todas formas, según se informa, no siempre reciben la cantidad de cajas necesarias, que deben procurar conseguirlas por otros medios, pidiendo adelantos o comprando a costa del presupuesto del año siguiente.

Una vez recibido los pedidos por parte del depósito del Hospital comienzan los procesos propios del Sector Unidosis.

3.3 Infraestructura

El Sector Unidosis está conformado principalmente por dos ambientes. En el primero de ellos es donde se realizan los procesos de cortado y de envasado manual. En este ambiente trabajan actualmente tres auxiliares, que son responsables de traer los comprimidos a cortar, solicitados previamente al depósito, y realizar los procesos de cortado. Los medicamentos están de tránsito, por lo que no se dispone de racks para su almacenamiento en este ambiente. Cuenta con dos mesas de trabajo y un carro móvil en el cual dejan las cajas a realizar los cortes.



Figura 5 - Ambiente de recorte de Dosis Unitarias

En el segundo ambiente es donde se almacenan las unidosis ya envasadas. Este ambiente cuenta con racks en forma de "U" rodeando una mesa de trabajo en la cual se utiliza para la preparación de los pedidos. En estas estanterías las unidosis se ubican dentro de cajones plásticos. Dentro de cada uno de ellos hay una única medicación, es decir que en el mismo cajón no puede haber más de un tipo de fármaco. Además, en este ambiente también se encuentra la máquina de envasado automática que está delimitada dentro del espacio físico, debido al control de presión y humedad que es requerido a la hora de envasar.

3.4 Alcance del caso de estudio

El Sector de Unidosis actualmente abastece el 30% de camas del HC. Sin embargo, de acuerdo con las fuentes consultadas, existen intenciones de llegar al 90% de camas atendidas. Para poder cumplir con este objetivo, las autoridades del Hospital han evaluado la adquisición de una máquina cortadora y empaquetadora que permita aumentar el tiempo y la cantidad de producción. Por otra parte, han expresado su deseo de mejorar la gestión de stock de los medicamentos y unidosis, para poder conocer con certeza qué y cuando cortar cada medicamento.

El alcance de este proyecto comprende el análisis y la propuesta de mejoras en el proceso de preparación y distribución de dosis unitarias del Hospital de Clínicas, a través de la modelización y evaluación de diferentes escenarios operativos. En particular, se busca determinar si la incorporación de una nueva tecnología —una máquina cortadora y empaquetadora— permitiría alcanzar los objetivos planteados por la institución en términos de cobertura y eficiencia del sistema de unidosis. Para ello, se desarrollará un modelo de optimización que integra la gestión de stock, los tiempos de producción y las cantidades por medicamento, lo que posibilita comparar el desempeño del sistema actual con el escenario proyectado. A partir de estos resultados, se plantea además una propuesta de reorganización del equipo de trabajo y una gestión del cambio que acompañe la implementación tecnológica.

3.5 Descripción de procesos en Sector Unidosis

Las tareas de cortado, envasado y armado de pedido involucran diferentes procesos que el Sector Unidosis debe llevar a cabo a efectos de que su producción sea recibida por los economatos de cada piso para que luego las unidosis sean proporcionadas a los pacientes.

3.5.1 Proceso de cortado y envasado manual

El proceso de envasado y cortado manual de unidosis se inicia seleccionando la droga a envasar, que es solicitada al depósito para que sea entregada al sector de producción. Al tener la medicación, se inicia el proceso registrando la hora de inicio en una planilla de control. A continuación, se realiza un conteo preciso de las cajas entregadas por el departamento de depósito y se verifica que la cantidad coincida con lo solicitado en la orden de trabajo. Luego, se revisan los lotes y vencimientos de todas las cajas de estuches de la mediación con la que se está trabajando para asegurarse de que lo seleccionado pertenezca al mismo lote y que estén dentro de la fecha de vencimiento. Una vez hecho esto, se extraen los blísteres individuales de las cajas y se registra la información del lote y vencimiento de cada uno para mantener una trazabilidad adecuada. Cada blíster se corta con una tijera para separar las dosis individuales (unidosis) del medicamento, lo que facilita su manejo.



Figura 6 - Medicación entregada por deposito al Sector Unidosis

Las unidosis se colocan en bolsas plásticas separadas y luego se sellan al vacío para preservar la estabilidad del contenido y evitar la contaminación. Se generan etiquetas en la computadora con la información relevante, como el nombre del medicamento, el lote, el vencimiento y su dosis. Luego, se adhieren las etiquetas a cada bolsa plástica envasada (generalmente en el reverso del comprimido) para facilitar la identificación del producto y la lectura de la información relevante. Todas las bolsas plásticas envasadas, junto con la información de lote y vencimiento, se colocan en otra bolsa plástica única con cierre hermético para mantener todo el contenido relacionado organizado y protegido.

Una vez que se ha completado el envasado, se registra la hora exacta de finalización del proceso en la planilla de control. A su vez, se anota la cantidad total de unidosis producidas y se registra el nombre o identificación del responsable del envasado. En la misma planilla se registran eventuales situaciones ocurridas durante el proceso, por ejemplo, si se dañó algún medicamento o alguno se perdió durante el envasado. Luego de dejar todo registrado, el personal a cargo del sector debe verificar que lo indicado en la planilla coincida con lo físico, para luego firmar para dar cierre al proceso.



Figura 7 - Recorte manual



Figura 8 - Envasado manual

Este proceso continuo garantiza que el envasado de unidosis se realice de manera precisa y controlada, asegurando que el producto final esté listo para un uso seguro y la distribución dentro del hospital sea adecuada.

3.5.2 Proceso de cortado y envasado automático

En este proceso, el cortado se hace de la misma manera antes descrita, siendo el envasado lo único que se modifica. En tal sentido, el HC cuenta con una máquina envasadora que permite envasar las unidosis de forma continua. El proceso de envasado automático de unidosis comienza con la alimentación de productos desde la línea de producción de cortado hacia el sistema de envasado, seguido de la orientación y alineación para garantizar una disposición exacta en los envases individuales. Estos envases, que pueden variar en forma y tamaño según la aplicación, son llenados con una dosis precisa del producto mediante un proceso de dosificación meticoloso. La etapa subsiguiente involucra el sellado automático, asegurando la integridad del contenido y protegiéndolo contra la contaminación. La fase de etiquetado y codificación también es de manera automática a través de la máquina envasadora, incluyendo la fecha de caducidad, número de lote y dosis del producto.

El resultado final es un proceso eficiente y preciso que culmina con la agrupación y empaquetado de las unidades individuales para su distribución. Este enfoque automatizado no solo mejora la cadena de producción, sino que también eleva la calidad y confiabilidad del producto final, destacando su importancia en la entrega de productos seguros y convenientes para los consumidores. Sin embargo, la máquina utilizada presenta ciertas limitaciones: se trata de un equipo de tecnología antigua, que requiere personal capacitado para su manejo y que con frecuencia sufre detenciones o trabas durante el funcionamiento. Estas condiciones reducen parcialmente los beneficios esperados del proceso automatizado.

3.5.3 Proceso de armado de pedidos de unidosis

El proceso de armado de pedidos de unidosis para los pacientes comienza cuando llega la indicación médica al sector, que puede ser por vía electrónica o escrita por el médico en la historia clínica de cada paciente. La vía electrónica implica que el médico ingrese al sistema de prescripción electrónica denominado SIGAME con su usuario y realice la prescripción de la medicación al paciente. Entonces, un operario del Sector Unidosis ingresa al sistema SIGAME y puede observar todas las indicaciones médicas cargadas por los diferentes profesionales para sus pacientes.

Una vez recibida la indicación, se selecciona un cajón plástico en el cual se va a colocar el pedido con la indicación diaria del paciente. Cuando se coloca esta medicación dentro del cajón se anota el número de lote en una planilla de registro, lo que resulta de importancia para poder tener un seguimiento de la medicación y del lote por cualquier inconveniente que pueda tener el paciente con su tratamiento farmacológico. Además, se registra en la planilla la cantidad retirada para favorecer el seguimiento del stock de cada fármaco. Una vez que el cajón plástico se completa con el pedido solicitado por el médico para un paciente, éste es dejado en un carro. Una vez preparados los carros para los distintos pisos, estos se entregan a los encargados correspondientes, quienes se ocupan de suministrar las dosis unitarias a cada paciente.

4 Modelo Matemático

En esta sección se detalla la metodología empleada para realizar el modelado del problema y cómo se obtienen los datos para poder llevar a cabo el modelo.

4.1 Modelado

El modelo matemático tiene como objetivo definir las semanas de corte para cada uno de los principios activos basados en la demanda histórica del último año.

El modelo busca maximizar la producción de unidosis, es decir, el cortado de cada principio activo, teniendo en cuenta como restricción la cantidad de horas reales de trabajo del equipo encargado de la tarea y los tiempos de cortado de cada uno de los principios activos, así como la capacidad productiva del personal.

A su vez, se tiene como restricción un stock máximo de guardado de unidosis para no producir por sobre la capacidad del Hospital. Para esta restricción, se utiliza una variable que indica el stock de cada principio activo. En cada semana, se considera el stock de la semana anterior, la demanda y la producción para cada uno de los principios activos estudiados en el modelo. El Stock Inicial de cada principio activo se define como dato inicial, tomado de la información histórica brindada por el HC.

A continuación, se detalla el modelo matemático utilizado para poder maximizar el corte de cada uno de los principios activos.

4.1.1 Conjuntos

- N : conjunto de cantidad de principios activos con $N = \{1, \dots, 35\}$.
- S : conjunto de cantidad de semanas con $S = \{1, \dots, 52\}$

4.1.2 Parámetros

- C : Capacidad semanal de cortado en unidades de principios activos por el personal a cargo
- Q_{ij} : demanda esperada en unidades para cada uno de los principios activos $i \in N$ en cada semana $j \in S$
- T_i : tiempo promedio en segundos de cortado para cada uno de los principios activos $i \in N$
- T_MAX : tiempo máximo semanal de cortado en segundos
- S_MAX_i : semanas máximas de cortado para cada uno de los principios activos $i \in N$
- PP_i : punto de pedido en unidades para cada uno de los principios activos $i \in N$
- SI_i : stock inicial en unidades para cada uno de los principios activos $i \in N$
- P_MAX_i : cantidad máxima en unidades en stock para cada uno de los principios activos $i \in N$
- M : valor grande

4.2 Variables de Decisión

- x_{ij} : variable que indica la cantidad de unidosis del principio activo $i \in N$ en la semana $j \in S$
- z_{ij} : variable que indica el nivel de stock del principio activo $i \in N$ en la semana $j \in S$
- y_{ij} : variable binaria que indica si hay producción del principio activo $i \in N$ en la semana $j \in S$

4.2.1 Función Objetivo

Maximizar la producción total de unidosis

$$\max \sum_{i \in N} \sum_{j \in S} x_{ij}$$

4.2.2 Restricciones

4.2.2.1 Capacidad de producción semanal

$$\sum_{i \in N} x_{ij} \leq C, \forall j \in S$$

La suma de la producción de cada principio activo por semana no debe superar la capacidad total de producción.

4.2.2.2 Tiempo de trabajo semanal

$$\sum_{i \in N} x_{ij} * T_i \leq T_MAX, \forall j \in S$$

La suma de la producción en minutos de todos los principios activos por semana no debe superar la cantidad máxima de tiempo de trabajo del personal destinado.

4.2.2.3 Activación de la producción

$$x_{ij} \leq M * y_{ij}, \forall i \in N, \forall j \in S$$

Activación de la variable y_{ij} .

4.2.2.4 Límite de Semanas de Trabajo

$$\sum_{j \in S} y_{ij} \leq S_MAX_i$$

La cantidad de semanas a producir no debe superar la cantidad máxima de semanas para cada principio activo

4.2.2.5 Stock Inicial

$$z_{i0} = SI_i, \forall i \in N$$

Iniciación de la variable de stock para cada principio activo.

4.2.2.6 Actualización del Stock

$$z_{ij} = z_{i(j-1)} + x_{ij} - Q_{ij}, \forall i \in N, \forall j \in S$$

Se debe realizar el ajuste de stock de la semana según el principio activo. Esto se realiza sumando el stock de la semana pasada con lo producido en la semana actual, restando lo demandado de la semana.

4.2.2.7 Stock por encima del Punto de Pedido

$$z_{ij} \geq PP_i, \forall i \in N, \forall j \in S$$

El stock semanal debe superar o igualar el punto de pedido para cada principio activo.

4.2.2.8 Stock máximo por principio activo

$$z_{ij} \leq P_MAX_i, \forall i \in N, \forall j \in S$$

El stock no debe superar un stock máximo para no tener un stock estático por más de 5 semanas

4.2.3 Formulación del Modelo Matemático

$$\sum_{i \in N} x_{ij} \leq C, \forall j \in S \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{i \in N} x_{ij} \leq C, \forall j \in S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} * T_i \leq T_MAX, \forall j \in S \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq M * y_{ij}, \forall i \in N, \forall j \in S \quad (4)$$

$$\sum_{j \in S} y_{ij} \leq S_MAX_i \quad (5)$$

$$z_{i0} = SI_i, \forall i \in N \quad (6)$$

$$z_{ij} = z_{i(j-1)} + x_{ij} - Q_{ij}, \forall i \in N, \forall j \in S \quad (7)$$

$$z_{ij} \geq PP_i, \forall i \in N, \forall j \in S \quad (8)$$

$$z_{ij} \leq P_MAX_i, \forall i \in N, \forall j \in S \quad (9)$$

Dada la función objetivo de la ecuación (1) el modelo busca maximizar la producción de unidosis en un período de un año de manera de poder comparar con la situación actual del HC.

La familia de restricciones (2) y (3) corresponden a la capacidad productiva del equipo de trabajo actual. Procuran que la producción no supere la máxima capacidad de cortado de

unidosis que tuvo el equipo y que el tiempo de trabajo no supere la cantidad de minutos con los que se cuenta con personal para cortar respectivamente por semana de trabajo.

La familia de restricciones (4) y (5) por su parte procuran que los SKU no superen la cantidad máxima de semanas de cortado para cada uno de ellos. La restricción (4) permite que y_{ij} se active si y solo sí existe producción de ese principio activo esa semana. Además, cada principio activo tiene una cantidad máxima de cortado de manera de no exceder en la producción de estos para no tener unidosis que no se van a utilizar a lo largo del año.

Por su parte, la familia de restricciones (6) y (7) corresponden al balance de inventario para el sector de unidosis. (6) activa el inventario inicial, mientras que (7) lo actualiza cada semana con la producción hecha y la demanda consumida.

Por último, las restricciones (8) y (9) limitan el stock para cada principio activo. (8) asegura que el stock siempre se encuentre sobre el punto de pedido para no tener quiebre de stock y (9) asegura que no sobre pase el stock para el espacio actual de guardado del HC.

4.3 Relevamiento de datos

En esta sección se presentan los datos que fueron utilizados a lo largo del proyecto para lograr modelar la realidad del HC. Además, se incluyen las consideraciones que se debieron tomar para realizar el modelado.

4.3.1 Métodos

Para la recopilación de los datos necesarios, en primer lugar, se tuvo una reunión con la Química a cargo del sector en su momento en la cual se pudo obtener una primera idea de los procesos del sector y el flujo de las unidosis.

Por otra parte, el equipo se reunió con las encargadas de realizar el recorte para poder visualizar la metodología que usan. En estas reuniones se fue capaz de recopilar las planillas de información de cortado de unidosis por día de un año entero, desde abril del 2023 hasta abril del 2024.

Por último, existieron reuniones y visitas al equipo el cual maneja el depósito en donde se almacenan las dosis unitarias. En este depósito además de almacenar las dosis se preparan los pedidos que recetan los médicos para cada paciente.

A continuación, en la figura 9 se observa una imagen de ejemplo de las planillas proporcionadas por el HC. Se podrá ver las mismas indicando día, hora de inicio de cortado, los nombres del principio activo, las dosis, el lote, la fecha de vencimiento, la cantidad recortada, la hora de finalización y la persona encargada del recorte.

RECORTE PLANILLA DE REGISTRO DE REENVACADO MANUAL DE MEDICAMENTOS												
IA	HI	Nombre Genérico	Nombre Comercial	DOSIS	Forma Farmacéutica	LOTE	VENCE	Cantidad recortada	HF	Personal	Observaciones Firma	
30/4/24	8:30	clorazepam	donarite	2mg	comprim.	50357	8/26	600	10:00	Caro		
30/4/24	10:00	acetaminofen	acetipax	100mg	comprim. masticables	07111	02/27	300	11:30	Caro		
30/4/24	12:30	morfina	senonal	3mg	comprim. masticables	70002	10/26	200	14:00	Caro		
30/4	13:30	losartan	losartan	50 mg	comprim. recu	FP35005	5/26	700	14:30	Caro		

Página 1

Figura 9 - Planilla de información de recorte de Unidosis

4.3.2 Datos relevados

En esta sección se presentan los datos relevados a partir de las planillas proporcionadas por el HC.

4.3.2.1 Periodos

En primer lugar, como se mencionó anteriormente, se obtuvieron los datos desde abril 2023 hasta mayo 2024. Los períodos de producción se determinaron en semanas para poder obtener un plan de producción acorde a las operaciones del sector. Si bien en las planillas se tenía la producción por día, se determinó eficiente, poder tener una planificación semanal que optimizara el cortado de unidosis en estos períodos.

4.3.2.2 Principios Activos

Se relevaron un total de 133 de principios activos. Con ellos, se utilizó el método de Pareto para poder obtener el 20% de los principios activos que tuvieran el 80% de la producción anual histórica. De esta manera, se hizo el estudio para la planificación de producción, para 35 principios activos.

A continuación, en la figura 10 se presentan los datos obtenidos del recorte anual discriminados por el método de Pareto.

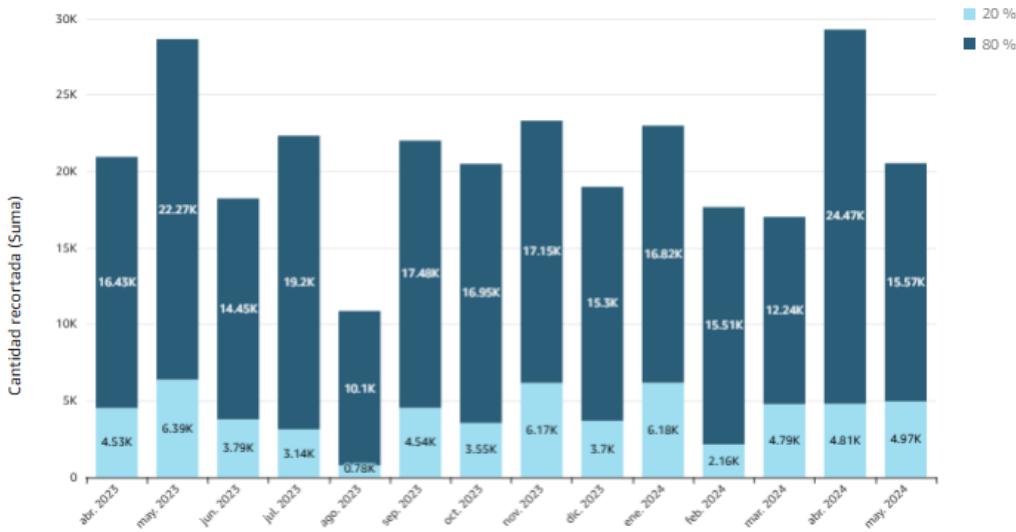


Figura 10 – Cantidad de Unidosis Cortadas

4.3.2.3 Tiempos de Cortado

Las planillas también proporcionaban el tiempo incurrido en el cortado de cada principio activo cada vez. Con estos datos, se obtuvo el tiempo promedio por principio activo de cortado por unidosis cortada a lo largo del año de producción.

4.3.2.4 Demanda

Para el caso de la demanda, si bien no se cuenta con información digitalizada ni física sobre la demanda semanal de cada principio activo, se consideró para el estudio y utilización del modelo matemático que la demanda de cada principio activo fue el 90% de lo cortado históricamente.

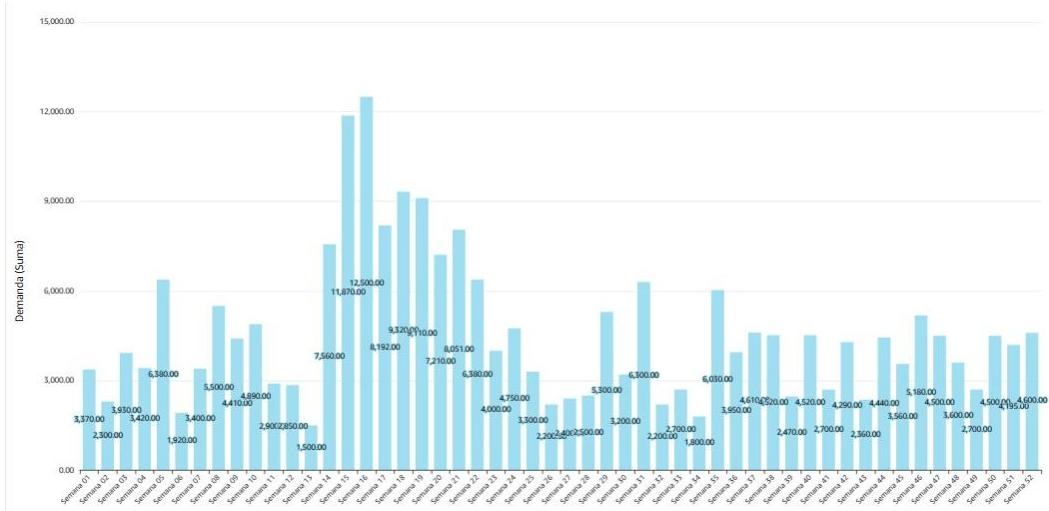


Figura 11 - Demanda de unidosis por semana

4.3.2.5 Capacidad

Para determinar la capacidad máxima de producción por semana, se tuvo en consideración el promedio de capacidad real de producción del 100% de los SKU brindado en los datos históricos.

4.3.2.6 Tiempo máximo de cortado

En el caso del tiempo máximo de cortado, si bien la jornada laboral es de 6 horas para cada uno de los miembros del equipo del área, se definió una jornada de cortado de unidosis de cuatro horas diarias en los cinco días de la semana. Se tuvo en consideración que el equipo de trabajo no solo realiza actividades de cortado sino también empaquetado, guardado de stock y otras actividades pertinentes al sector de unidosis. A continuación, se muestra la fórmula con la que se calculó el parámetro T_{MAX} :

$$T_{MAX} = \text{CantOperarios} * 60 * 60 * 4 * 5$$

Para el equipo actual, con tres operarios realizando actividades de cortado de unidosis por cuatro horas cada día de la semana T_{MAX} da un total de 216.000 segundos.

4.3.2.7 Punto de Pedido

El punto de pedido se calculó mediante la fórmula:

$$PP = \text{Demanda semanal} * LT + z * \sigma_{demanda}$$

para cada SKU teniendo en cuenta un LT de 1 día y un nivel de servicio del 95%. A continuación, se muestra la fórmula realizada para cada uno de los SKU.

$$PP_i = \text{Demanda semanal}_i * 0.2 + 1,64 * \sigma_i$$

4.3.2.8 Stock Inicial

Para definir el stock inicial para cada SKU, se tuvo en consideración la información brindada por las planillas. Para aquellos SKU donde en la producción histórica hubiesen sido cortados en la primera semana de trabajo, se asumió que el stock de este se encontraba en el punto de pedido, mientras que aquellos que se produjeron a posteriori se les asumió un stock inicial del 50% más que el punto de pedido, suponiendo mayor stock al inicio del período.

4.3.2.9 Máximo de semanas de trabajo

La determinación de las semanas máximas de trabajo por SKU se basó en el análisis de la cantidad de semanas efectivamente trabajadas en los registros históricos. A dicho valor se

le sumaron seis semanas adicionales, en función de criterios de cobertura. Esta decisión se fundamenta en la lógica de planificación aplicada en el mercado uruguayo, donde resulta razonable considerar un horizonte temporal equivalente a la mitad de un trimestre. Este factor fue consultado y recomendado por la encargada del sector. De ser así, permite anticipar y absorber aumentos puntuales en la demanda asociados a brotes estacionales de determinadas patologías.

4.3.2.10 Stock Máximo de guardado

Por último, para la definición del stock máximo de almacenamiento por SKU, se utilizó como base el promedio de la demanda histórica proporcionada en las planillas, el cual fue multiplicado por un factor de seis. Este factor refleja una cobertura de aproximadamente seis semanas, en línea con la lógica de planificación previamente mencionada, y busca garantizar una adecuada disponibilidad ante potenciales picos de demanda. Al igual que con la cantidad máxima de semanas, fue consultado y recomendado por la encargada del sector la cantidad de semanas que se podrían almacenar.

4.3.3 Dificultades encontradas y consideraciones

Tal como se comentó previamente, los datos fueron recolectados a partir de unas planillas proporcionadas por el personal de cortado de unidosis del HC. En estas se podían observar los distintos parámetros de interés para el estudio de la maximización de la producción.

En primer lugar, al no contar con los datos históricos de la demanda sino con la producción histórica, se tuvo la que hacer la primera consideración para poder modelar el problema matemático. Se asumió una demanda a partir de los datos históricos de producción.

A su vez, las planillas proporcionaban información sobre el tiempo incurrido en el corte de unidosis. Con el tiempo total de producción para cada SKU y la cantidad de unidosis recortadas, se calculó el tiempo en segundos que llevó cortar cada unidosis. De todas formas, en reuniones con el equipo de trabajo del HC, el personal declaró que no siempre esos tiempos totales eran fieles a lo verdaderamente trabajado en el cortado. Esto se debe que, en ciertas oportunidades, el personal es interrumpido para hacer otras tareas relevantes a su puesto de trabajo y tienen que dejar de hacer lo que estaban haciendo. De todas maneras, no se discriminaron estos tiempos de realización de otras tareas dado que se creyó oportuno estudiar el tiempo real de producción teniendo en cuenta que el equipo de trabajo también realiza otras tareas.

Por último, si bien se tuvo en cuenta para el estudio y análisis de datos que las unidosis vienen en blíster de determinadas cantidades para cada SKU, en el modelo matemático no se consideró este parámetro. Esto se debe a que, debido a la complejidad del modelo debía ser un modelo continuo y no discreto, por lo tanto, agregar el parámetro de cantidad de unidosis por blíster le agregaba complejidad y aun así la función objetivo iba a arrojar una solución decimal tanto en unidosis como en cantidades de blíster.

4.4 Validación y Verificación

La validación y verificación son etapas esenciales para comprobar que la lógica del modelo elegido funciona correctamente, es decir, que no contenga errores conceptuales y sea confiable para responder al caso estudiado. La verificación tiene como objetivo asegurar que el modelo matemático esté correctamente formulado y que su lógica interna funcione como se espera, es decir, que las restricciones y la función objetivo se comporten de acuerdo con lo definido, sin errores conceptuales ni de codificación. La validación, en cambio, se orienta a comprobar que el modelo constituye una representación adecuada de la realidad que se busca analizar, de modo que sus resultados puedan considerarse confiables para apoyar la toma de decisiones en el contexto real HC.

En este trabajo se llevaron a cabo distintas pruebas con el fin de verificar el modelo, en las cuales se identificaron errores y se incorporaron mejoras. En cuanto se detectaban los errores se realizaban las modificaciones correspondientes y se validaba nuevamente con las modificaciones. Las pruebas de validaciones se realizaron, al igual que el modelo, en la herramienta de resolución GLPK.

En la Tabla 4 se detalla un resumen de la cantidad de pruebas realizadas, indicando si dieron una solución y si los resultados obtenidos eran los esperados.

Tabla 1 - Resumen Resultados Validación

Escenario de prueba	Resolución del modelo	Resultado esperado
1	SI	SI/NO
2	SI	SI
3	NO	SI
4	SI	SI
5	NO	SI
6	NO	NO
7	SI	SI
8	SI	SI

La validación del modelo se realizó mediante un conjunto de pruebas (10 SKU y 10 semanas) diseñadas para comprobar la lógica del modelo, detectar inconsistencias y verificar respuestas frente a casos límites.

Las pruebas consideraron variaciones en la demanda, en la capacidad máxima de stock por SKU (P_{MAX_i}), en el stock inicial (SI_i) y en el número máximo de semanas de producción por SKU (S_{MAX_i}). Al realizar estas pruebas observamos errores en nuestro modelo. La corrección de mayor importancia fue la implementación de la restricción de P_{MAX_i} , al no tener esta restricción el modelo producía hasta llegar al límite de Capacidad

de producción (C) sin tener en cuenta cuanto se puede almacenar de cada SKU. Esto generaba que para algunos SKU genere stock de un año. Lo cual para medicación no es recomendable generar un stock para tanto tiempo ya que toda medicación tiene su vencimiento. Generar este stock para tanto tiempo generaría muchas perdidas de medicación al HC ya que para los SKU de menor rotación de stock se vencerían y deberían destruirlos.

La primera prueba es con demanda nula, es decir que para los 10 SKU de prueba en ninguna de las 10 semanas se tiene una demanda. El modelo da un resultado de producción, esto es correcto debido a que es un modelo de maximización de la producción. Concentra la producción en la semana 4 y 5 aprovechando la ventana temporal disponible, dando como resultado que en la última semana todos los SKU se encuentran con P_{MAX_i} en su valor de tope.

Tabla 2 - Resultado prueba de validación con demanda nula

Semana	Cantidad de Producción	Porcentaje Acumulado de Stock Máximo
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	5636	60
9	2990	100
10	0	100

Para la segunda prueba se fija la demanda de un único SKU como el valor de capacidad máxima que tiene el modelo para todas las semanas. El objetivo de esta prueba es que el modelo produzca únicamente este SKU elegido durante las diez semanas de prueba.

Se obtiene una solución óptima, con resultados obtenidos acordes a los esperados. Para esta prueba no incide el valor final de stock máximo del SKU elegido ya que al producir lo mismo que la demanda no llega al límite en esta restricción.

En la prueba tres el objetivo fue comprobar el comportamiento del modelo cuando la demanda de los SKU es nula y que el stock máximo para cada SKU también sea nulo.

No se obtiene una solución factible, ya que no cumple con la restricción de stock máximo. Este resultado es acorde a lo esperado, ya que en la restricción de stock máximo se tiene el parámetro de stock inicial para cada SKU. Esta restricción indica que P_{MAX_i} debe ser mayor o igual a z_{ij} , la cual se inicializa igualándola a SI_i . Debido a que SI_i es mayor a cero para todos los SKU ya que deben comenzar con un stock inicial. Según los datos indicados que el stock inicial es mayor a cero y que el stock máximo es cero para todos los SKU, esto genera una inconsistencia. Lo que es correcto que el modelo no encuentre una solución factible.

En el cuarto caso, se repiten las condiciones de demanda del caso anterior, aunque la diferencia en esta prueba es que el stock máximo es igual al stock inicial. El objetivo es verificar el comportamiento del modelo en la misma restricción del caso anterior pero cuando los valores son iguales.

Se obtuvo un valor objetivo igual a cero. Se observa que los resultados obtenidos coinciden con los esperados. No se va a realizar producción de ningún SKU ya que el stock de cada uno de ellos ya se encuentra en el máximo, que a su vez coincide con el stock inicial.

La quinta prueba se basa en comprobar el comportamiento del modelo cuando se le exige con una demanda elevada para más de un SKU.

En este caso no se alcanzó una solución factible debido a que la demanda de tres PA era igual a la capacidad máxima. Por lo que es coherente que no haya dado una solución ya que no es posible poder cumplir con la demanda de los tres PA. Solamente podría cumplirla para uno de ellos, como es en el caso de la segunda prueba.

La prueba seis está destinada a observar el comportamiento en la situación que para cada SKU pueda únicamente producir en una instancia, es decir que S_{MAX_i} tenga el valor 1 para todos. Es decir que solo se pueda producir una vez, con la demanda, el stock inicial y el stock máximo con los valores iniciales del problema.

En esta instancia se esperaba ver que produzca una única vez cada PA y que durante las demás semanas se consuma el stock producido con la demanda que tiene cada uno. Cuando se corre el modelo, no se obtiene una solución óptima. Por lo que se decidió ver en detalle la razón por la cual no puede producir solo en una semana para cubrir con la demanda de todo el período.

Se analiza en detalle el primer PA para observar el comportamiento de como sería el modelo y se pudo obtener la razón de que el modelo no obtuvo una solución. El SKU 1 comienza con un $SI_i = 333$ unidades y la demanda para la primera semana es de 225 (Q_{ij}). Además, como el punto de pedido es de $PP_1 = 222$ unidades, se observa que debe producir en la primera semana para cumplir con la demanda y con la restricción que el stock debe estar por encima del Punto de Pedido. Por lo que se asume que el modelo produce en esta semana, además al analizar la validación se cree que el modelo va a maximizar la producción de este SKU ya que puede únicamente producir una vez dentro del periodo. Para eso, se deberá producir 637 unidades ya que es la diferencia entre z_{11} y P_{MAX_1} , que el stock debe contemplar la demanda de la primera semana y el stock inicial. De esta

manera, en la segunda semana el stock alcanza el valor de P_{MAX_1} sin posibilidad de reponer dicho SKU, dado que ya se utilizó la ventana de producción. Esto ocurre debido a la restricción que establece un mismo valor de S_{MAX_i} para todos los PA. Luego, se analizó la demanda que queda por delante en el periodo para este SKU y se observa que la demanda supera al stock que se tiene con lo ya producido. Es por esta razón que es consistente que el modelo no haya dado una solución óptima.

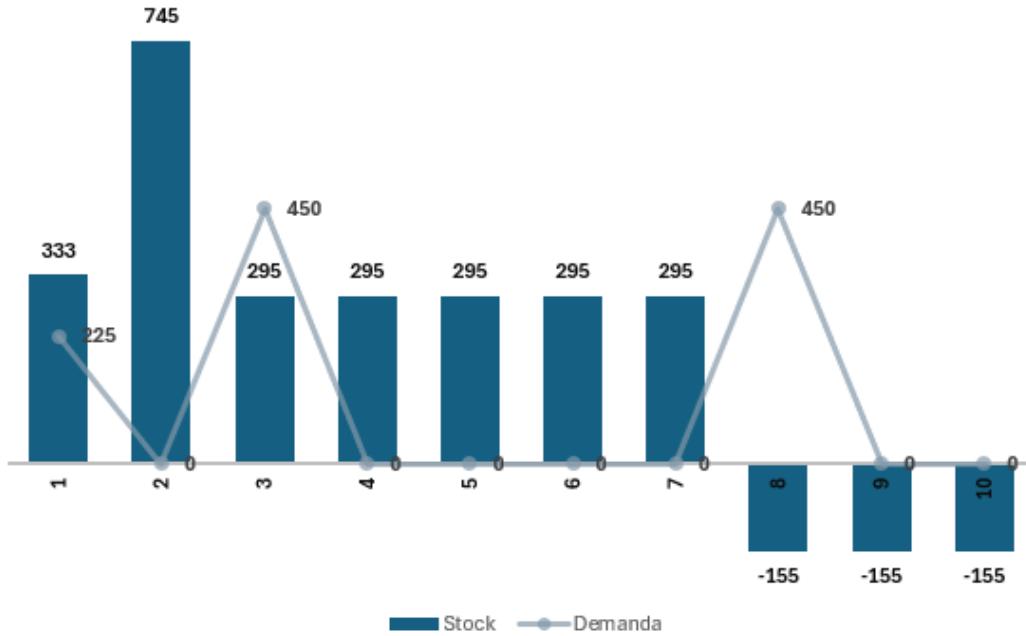


Figura 12 - Comportamiento del stock de SKU 1 durante el periodo seleccionado

La prueba siete se lleva a cabo con el fin de validar que pasa si se tiene demanda de solo un SKU y que ese mismo SKU tenga límite de semanas máximo para verificar que produzca solo este seleccionado.

Se obtuvo una solución óptima que coincide con los resultados esperados. El modelo indica que solo se debe de producir el SKU seleccionado sin límite de semanas, esta prueba se realizó para validar también que la prueba anterior sea correcta que no haya dado solución.

En la última prueba se analizó el comportamiento del modelo cuando, al igual que en el caso anterior, las semanas de producción de los PA seleccionados se fijan en cero, excepto para uno de ellos, cuya producción se mantiene disponible durante todo el periodo. Sin embargo, a diferencia de la prueba previa, en este escenario se considera demanda para más de un PA.

No se obtiene una solución factible ya que al tener demanda en PA que no se pueden producir no cumple con la restricción de punto de pedido. Esto genera que el stock en los PA que tiene demanda quede por debajo de sus puntos de pedido y que por la imposición de no producir ninguna semana no se pueda volver a producir para reponer ese stock.

La etapa de pruebas resultó ser de fundamental importancia en el desarrollo del presente proyecto. A través de una serie de validaciones rigurosas, no solo se verificó la funcionalidad del modelo propuesto, sino que se logró un entendimiento profundo y detallado de sus propiedades y sensibilidades.

Este proceso permitió identificar y corregir ineficiencias, ajustar parámetros y validar las suposiciones, lo cual fue esencial para garantizar la solidez de la solución.

4.5 Análisis de Resultados

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos para el modelo correspondiente a la maximización de la producción de unidosis con los datos históricos de la producción en el último año.

4.5.1 Resultados numéricos

El modelo matemático fue implementado en GLPK en una computadora Lenovo Ideapad 330s con sistema operativo Windows 11 Home de 64 bits, equipada con procesador Intel Core i5 de ocho hilos a 1.8 GHz y 4GB de memoria RAM.

La función objetivo alcanzó un valor de 248.698,3 unidosis, constituyendo la solución óptima del modelo. Este resultado se obtuvo con un tiempo de ejecución de 151,8 segundos, sin restricciones de tiempo ni intervalos de confiabilidad. Además, el modelo no solo entrega la solución óptima en términos cuantitativos, sino que también brinda una planificación detallada de la producción por SKU y por semana, lo que representa una herramienta práctica para el HC, ya que permite definir qué producir y en qué momento a fin de garantizar el abastecimiento eficiente y oportuno de las dosis unitarias.

Cabe destacar que 23 semanas de las 52, la producción de unidosis es la máxima siendo la 5816 las unidosis cortadas, mientras que, en las demás semanas, se tiene una media de producción del 68.14%, siendo el mínimo un 4.64% y el máximo un 99.89% de la producción de esa semana sobre la capacidad máxima de producción definida. A continuación, en la Figura 13 se presenta la distribución de la producción durante las 52 semanas de trabajo:

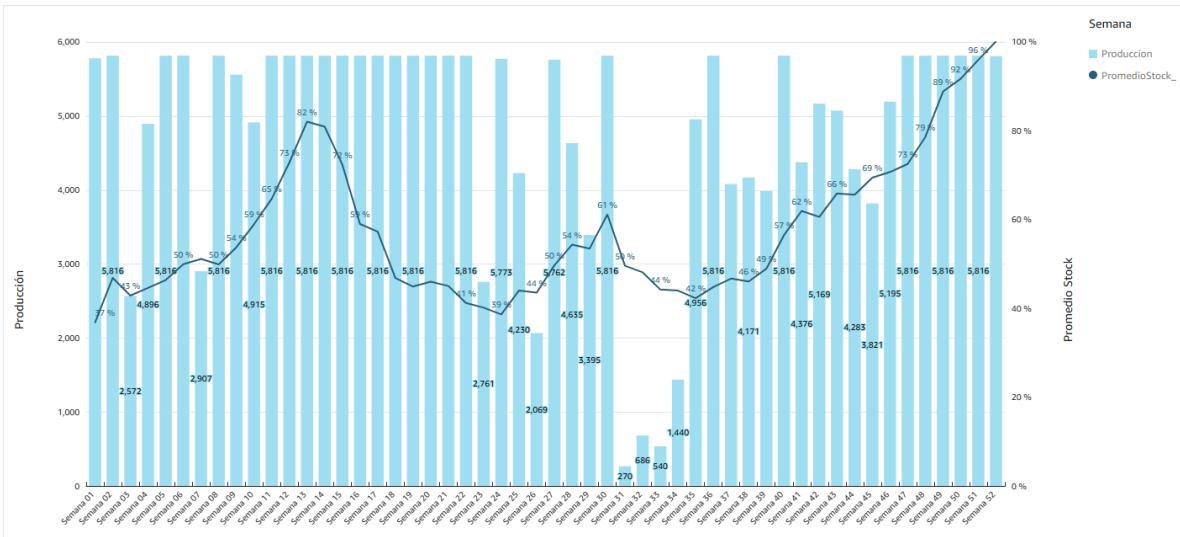


Figura 13 - Producción por semana Caso Base

En la Figura 13 se presenta además la evolución del Stock Promedio semanal, entendido como el porcentaje promedio de inventario acumulado en relación con la capacidad total de almacenamiento. Se observa que, durante las primeras trece semanas, este indicador registra un incremento significativo, explicado por la necesidad de anticipar la alta demanda prevista para las semanas posteriores. A partir de la semana trece, el indicador evidencia una disminución considerable, incluso cuando la producción opera a su máxima capacidad, lo que pone de manifiesto la magnitud de la demanda en ese período.

Respecto a la baja producción durante las semanas 31 a 34, esto puede atribuirse a la reducción de la demanda que existe en esas semanas como se observa en 4.3.2.4 y que, además, el Stock Promedio se mantenía en torno al 61% tal como se muestra en la figura. A continuación, se muestra el porcentaje de z_{ij} sobre P_{MAX_i} en la semana 30.

Tabla 3 - Ratio entre Stock y Stock Máximo en semana 30

SKU	Porcentaje
SKU 1	90%
SKU 2	55%
SKU 3	26%
SKU 4	100%
SKU 5	100%
SKU 6	60%
SKU 7	23%
SKU 8	47%
SKU 9	100%

Tabla 4 - Ratio entre Stock y Stock Máximo en semana 30 (cont)

SKU	Porcentaje
SKU 10	53%
SKU 11	44%
SKU 12	100%
SKU 13	3%
SKU 14	41%
SKU 15	100%
SKU 16	90%
SKU 17	16%
SKU 18	98%
SKU 19	37%
SKU 20	60%
SKU 21	95%
SKU 22	67%
SKU 23	34%
SKU 24	50%
SKU 25	59%
SKU 26	92%
SKU 27	66%
SKU 28	93%
SKU 29	71%
SKU 30	55%
SKU 31	61%
SKU 32	38%
SKU 33	43%
SKU 34	59%
SKU 35	14%

Si bien se puede observar que existen semanas en donde el porcentaje de z_{ij} sobre P_{MAX_i} no llega a ser el 100%, el modelo trabaja en un horizonte de 52 semanas, restringido principalmente por la capacidad del HC para almacenar inventario. En las semanas previas se ha producido de forma activa para cubrir la demanda proyectada y acumular inventario, pero entre la semana 31 y 34, el modelo frena la producción para maximizar la misma al finalizar el periodo considerado. La ausencia de producción en estas semanas no representa un fallo en el modelo, sino que es consecuencia lógica de la activación de la restricción de stock máximo y demuestra que existe un cuello de botella en la parte de almacenamiento de inventario. En consecuencia, es destacable observar que en la última semana todos los SKU se encuentran en su stock máximo de guardado, es decir $z_{i52} = P_{MAX_i}, \forall i \in N$. Si bien el modelo tiene semanas en las que produce menor cantidad de unidosis, finaliza el año, con todos los SKU en su stock máximo, a fin de quedar con inventario para un futuro. A continuación, se muestra z_{i52} arrojado por el modelo base.

Tabla 4 - Inventario en semana 52

SKU	z_{i52}
SKU 1	745
SKU 2	1812
SKU 3	2115
SKU 4	777
SKU 5	962
SKU 6	1350
SKU 7	999
SKU 8	806
SKU 9	643
SKU 10	1617
SKU 11	1379
SKU 12	1154
SKU 13	615
SKU 14	737
SKU 15	1069
SKU 16	584
SKU 17	2408
SKU 18	816

Tabla 4 - Inventario en semana 52 (cont)

SKU	z_{i52}
SKU 19	718
SKU 20	792
SKU 21	1830
SKU 22	685
SKU 23	813
SKU 24	1149
SKU 25	606
SKU 26	1500
SKU 27	1616
SKU 28	3271
SKU 29	748
SKU 30	1795
SKU 31	3099
SKU 32	1242
SKU 33	1437
SKU 34	834
SKU 35	982

Con el objetivo de verificar la solidez del modelo respecto a la gestión de inventarios, se analizaron de forma independiente el SKU de mayor demanda y el de menor demanda. En ambos casos, se constató que los niveles de stock se mantuvieron en todo momento por encima del punto de pedido definido, lo cual garantiza la disponibilidad continua de los productos y evita riesgos de quiebre de stock. La Gráfica 4 evidencia esta situación: mientras el SKU de mayor demanda presenta fluctuaciones más pronunciadas en función de la variabilidad de la producción y el consumo, el SKU de menor demanda se mantiene más estable, sin descender en ningún momento por debajo de los umbrales críticos. Estos resultados corroboran la eficacia del modelo propuesto para asegurar el abastecimiento incluso en contextos de alta presión sobre la demanda.

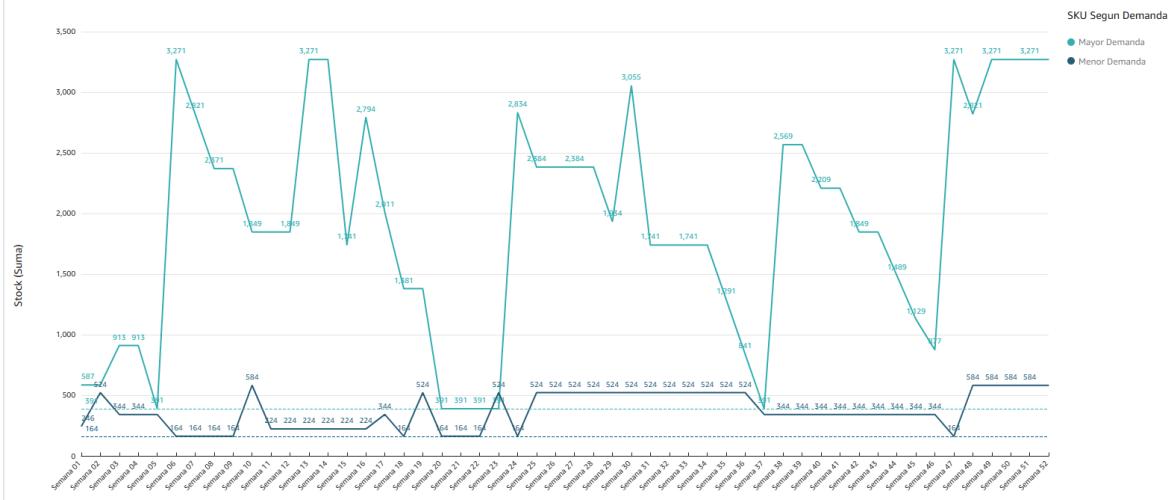


Figura 14 - Comparación de Stock de los SKU de mayor y menor demanda contra el Punto de Pedido correspondiente

En cuanto a los tiempos de producción la función objetivo arrojó resultados interesantes. Se puede observar que la media del porcentaje del tiempo de producción sobre el tiempo permitido es de un 17,21%. Todas las semanas, se mantiene por debajo del 26%, con un pico de 25,53%. Estos resultados indican que el tiempo de producción si bien es una restricción del modelo, actualmente y con el personal que cuenta el HC, se podría cortar y producir por lo menos un tiempo de producción un 75% mayor. A continuación, en la Figura 15 se muestra el porcentaje del tiempo producido sobre el tiempo total para cada una de las semanas de estudio:

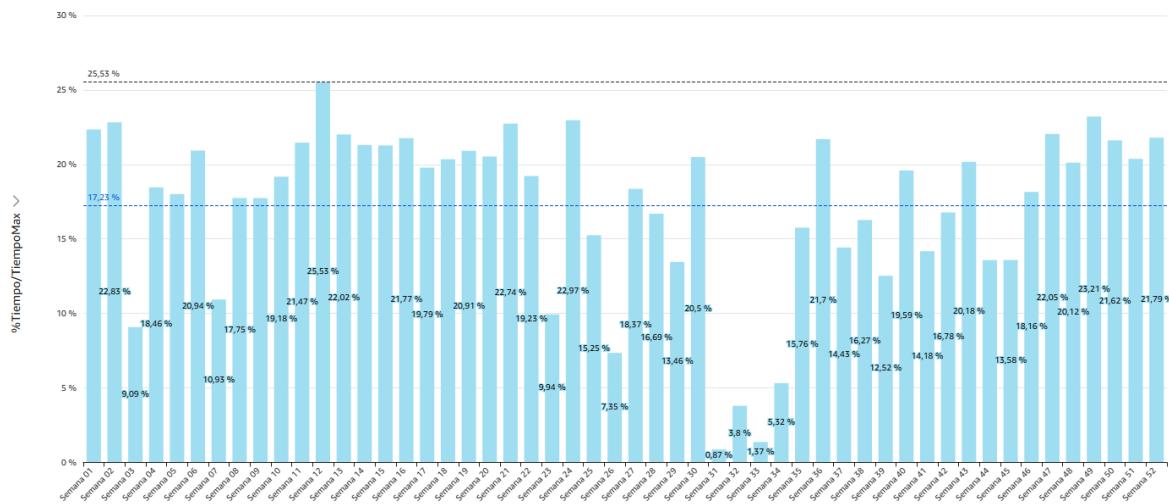


Figura 15 - Tiempo producido sobre tiempo total Caso Base

Una de las razones por las cuales el HC pidió hacer este estudio y analizar el comportamiento de la demanda era para optimizar la cantidad de principios activos que se cortan por semana, y, por consiguiente, por día. Esto se debe a que cada vez que se corta un principio activo hay que tener en cuenta el Lote de este y la fecha de vencimiento,

además de que cambiar de un principio activo a otro implica otros tiempos de trabajo durante el día, quitando así tiempo de cortado y producción.

Dada esta inquietud, es de interés observar cuánto es el promedio de SKU cortados por semana que el modelo dio como resultado. Con un máximo de 15 SKU en la primera semana, y una media de casi 7 durante el año, el modelo optimiza el cortado de SKU a 1,5 por día. En comparación contra la base histórica de la producción del HC, se baja la media de principios activos casi un 35% y optimiza los tiempos de cortado permitiendo obtener mayor unidosis al final de la semana. A continuación, en la Figura 16 se muestra una gráfica comparativa entre la base histórica de producción contra la producción brindada por el modelo matemático.

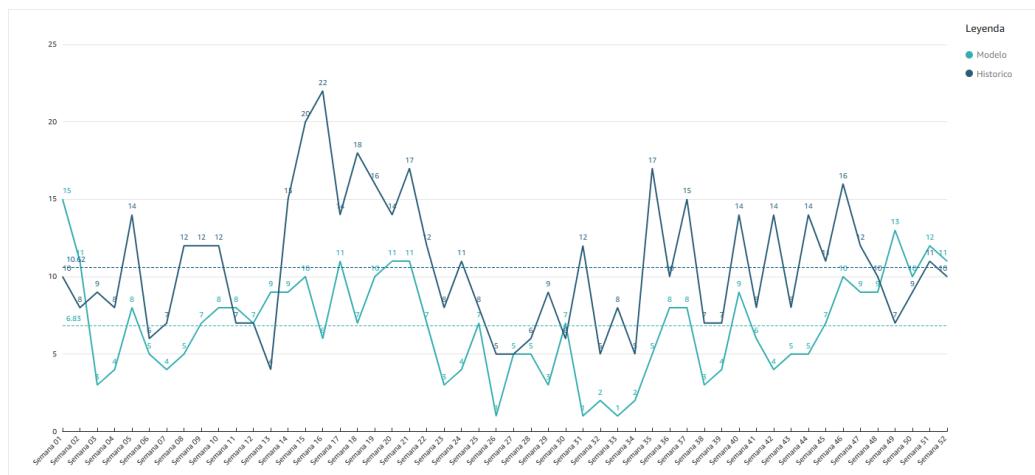


Figura 16 - Comparación Cantidad Principios Activos cortados por semana Base Histórica vs Modelo Matemático

A su vez, el modelo no solo disminuye la cantidad de principios activos, sino que también disminuye en su gran mayoría la cantidad de veces que se cortan estos. Los cinco principios activos que no disminuyeron las cantidades de semanas distintas de cortado son todos pertenecientes a los que tiene en la base histórica un porcentaje menor al 1,5% de la producción considerada para el estudio. Este resultado refuerza la optimización que hace la función objetivo, permitiendo cumplir con la demanda y maximizar la producción, cortando en menos veces cada principio activo.

Por último, como se mencionó previamente, si bien en el modelo matemático no tiene en cuenta la cantidad de unidosis que trae cada blíster de cada principio activo, para presentar los resultados dados por la función objetivo, se redondeó la cantidad de blísteres para poder obtener un resultado lógico para el HC. A continuación, se presentan la cantidad de unidosis y blísteres totales en las 52 semanas para cada SKU:

Tabla 5 5 - Cantidad de Blísteres por Principio Activo

Principios Activos	Cantidad de Unidosis	Cantidad de Blísteres
Aciclovir 200	3787	152
Acido Acetilsalicílico 100	11311	1135
Amlodipina 10	12711	1275
Bisacodilo 5	4357	439
Butilhioscina 10	5255	530
Carvedilol 12.5	7425	743
Carvedilol 6.25	5238	525
Cefalexina 500	4828,8	486
Ciprofloxacina 500	3184	322
Clonazepam 2	8977	903
Clorfenamina 4	7859	787
Cloruro de potasio 500	6661,5	670
Complejo B 40	4191	421
Dexametasona 8	4232	425
Diazepam 10	5878	240
Domperidona 10	2858	286
Enalapril 10	14049	1411
Enalapril 20	3742	378
Espironolactona 25	3016	302
Fluconazol 100	4342	439
Furosemide 40	10558	1058
Levomepromazina 25	3366	339
Levotiroxina 100	3643	365
Levotiroxina 50	6400	641
Loratadina 10	2901	292

Tabla 5 6 - Cantidad de Blísteres por Principio Activo (cont)

Principios Activos	Cantidad de Unidosis	Cantidad de Blísteres
Losartán 50	8226	824
Metoclopramida 10	9428	945
Prednisona 20	19973	2002
Quetiapina 100	4342	437
Quetiapina 25	10363	1041
Ranitidina 150	19599	1963
Sertralina 50	7141	716
Sulfametoxazol Trimetoprima 400 + 8	8841	887
Terazosina 5	4206	423
Tramadol 50	5809	581

5 Experimentación Numérica

5.1 Análisis de Sensibilidad

En esta sección, con el objetivo de entender la influencia de ciertas restricciones claves, se definieron y analizaron tres casos. Cada uno modifica condiciones específicas para observar cómo varía la producción de unidosis bajo diferentes configuraciones. A continuación, se detalla el comportamiento del modelo en cada uno de ellos.

5.1.1 Análisis de Sensibilidad 1 – Variación del Tiempo máximo de producción (T_{MAX})

En primera instancia, resulta de interés analizar las implicancias de una variación en el parámetro de tiempo máximo de producción semanal (T_{MAX}). Aunque en el Caso Base este tiempo presenta un margen holgado, se busca evaluar el efecto de incrementarlo o reducirlo en función del trabajo equivalente a una persona. Dicha variación impacta directamente en el valor de C dado que, tal como se detalla en la Sección 4.3.2.5, este parámetro fue estimado a partir de la producción histórica del personal. Los valores obtenidos en esta prueba fueron: $T_{MAX}=288.000$ segundos con $C=7.755$ unidosis y $T_{MAX}=144.000$ segundos con $C=3.877$ unidosis, respectivamente.

5.1.1.1 Aumento del Tiempo Máximo de Producción

El modelo arrojó una solución de 248.698 unidosis producidas en un horizonte de 52 semanas. La producción alcanzó un promedio de utilización del 61,67%, llegando al máximo de la capacidad únicamente en 12 semanas. En comparación con el Caso Base, la producción resulta significativamente más heterogénea, registrándose varias semanas con niveles inferiores al 30% e incluso una semana sin producción. El stock promedio descendió al 54,69%, aunque mantuvo un comportamiento similar al del Caso Base, finalizando en la semana 52 con el 100% del stock máximo alcanzable. A continuación, se presentan los resultados.

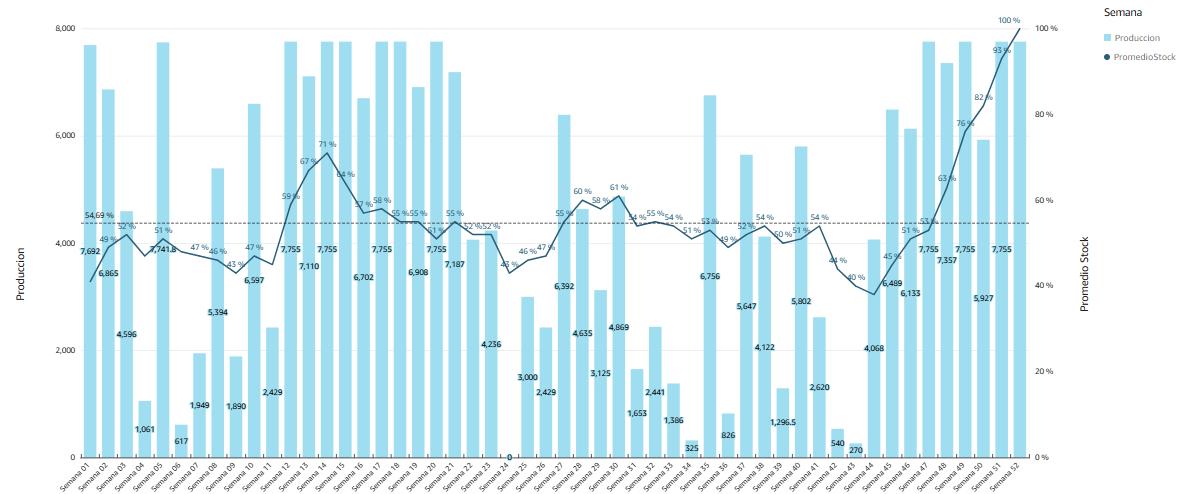


Figura 17 - Producción por semana Aumento Tiempo Máximo

Por su parte, el tiempo de producción promedio a lo largo de las 52 semanas fue de 12,92%, con un máximo de 24,66%. Esta disminución era esperable, dado que la función objetivo arrojó el mismo resultado que en el Caso Base aun con un incremento de T_{MAX} . En consecuencia, el sistema opera con mayor holgura: al disponer de más tiempo, se logra la misma producción. Se muestra a continuación los datos obtenidos para el tiempo de producción.

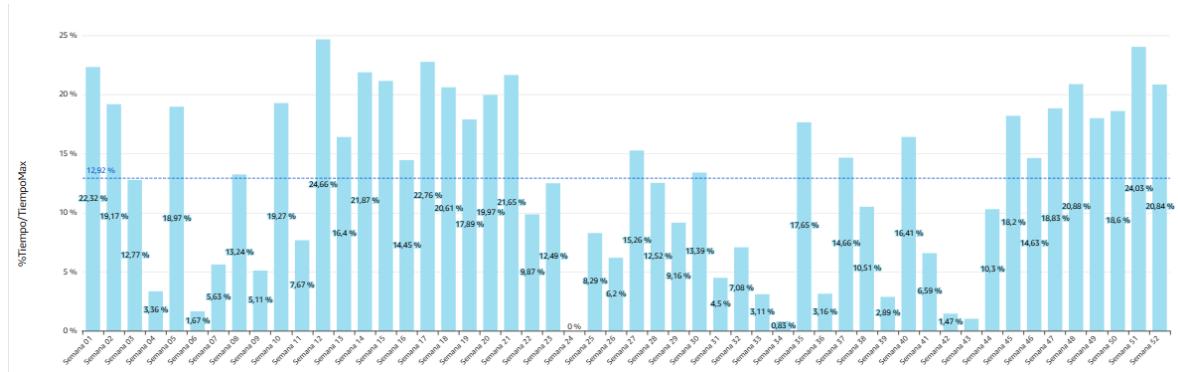


Figura 18 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Tiempo Máximo

Como puede observarse, el incremento de T_{MAX} no modifica la solución obtenida por la función objetivo, lo que confirma que este parámetro no constituye un factor determinante en el resultado del modelo.

5.1.1.2 Disminución del Tiempo Máximo de Producción

En este caso, al disminuir T_{MAX} a 144.000 segundos y C a 3.877 unidosis el modelo arrojó que no existe solución factible. La causa principal radica en que el promedio de producción requerido semanalmente es superior a la capacidad máxima disponible bajo esta restricción de tiempo. En otras palabras, al disminuir el tiempo asignado para la producción por trabajador, la capacidad total del sistema cae por debajo del umbral mínimo necesario para satisfacer la demanda proyectada.

Dado que la función objetivo busca cumplir los volúmenes de producción de manera consistente a lo largo de las 52 semanas, el modelo requiere disponer de una capacidad semanal que al menos iguale al promedio de producción exigido. Al no alcanzarse este valor, las restricciones de demanda y de stock entran en conflicto con la capacidad reducida, lo que deriva en la ausencia de solución factible. Este resultado confirma que, más allá de ajustes menores en la programación, el parámetro T_{MAX} constituye un límite estructural: si el tiempo máximo disponible es insuficiente frente al promedio de producción requerido, el sistema no puede operar bajo las condiciones planteadas.

5.1.2 Análisis de Sensibilidad 2 – Variación de la Capacidad (C)

En segunda instancia, interesa estudiar cómo influye el parámetro C en el modelo matemático. Para esta oportunidad, se asume una variación tanto positiva como negativa del 10% de la capacidad inicial del equipo de trabajo, determinando en 6398 y 5235 unidosis la misma. Dicha variación puede deberse tanto a mejoras en los procesos productivos como

desmotivación del equipo de trabajo respectivamente. A continuación, se presentan los datos obtenidos en ambos casos.

5.1.2.1 Aumento de la Capacidad

El modelo arrojó una solución de 248.698 unidosis cortadas en el período de 52 semanas. Si bien la distribución de la producción no es igual al Caso Base, la solución final brinda el mismo número. Esto indica que, en el caso del HC, aumentar simplemente su capacidad de producción en unidosis no genera cambios en la producción total en un horizonte de 52 semanas, sino que también debe evaluar la influencia de las demás restricciones del problema. Con una media de producción del 74.75% únicamente en 16 semanas produce al máximo de la capacidad. Sin embargo, el promedio de stock se mantiene de forma similar al Caso Base, finalizando la semana 52 con el 100% de stock. Esto último indica que el parámetro que es parte de la restricción crítica es P_{MAX_i} . A continuación, en la Figura 19, se presenta los resultados obtenidos.

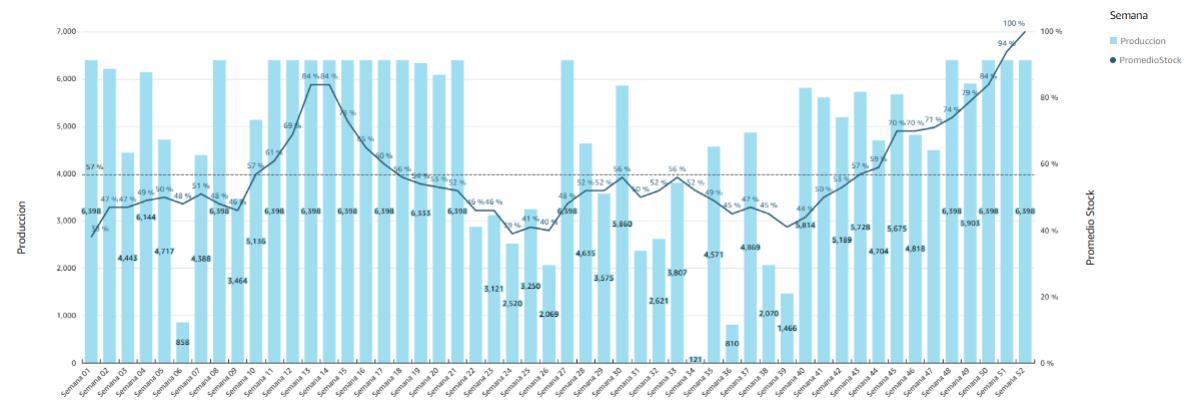


Figura 19 - Producción por semana Aumento Capacidad

En cuanto a los tiempos de producción se puede observar lo mismo que la producción. Si bien no se distribuye de la misma forma, el tiempo medio de producción sobre el tiempo total es de un 17,23% como se puede observar en la Figura 20 a continuación.

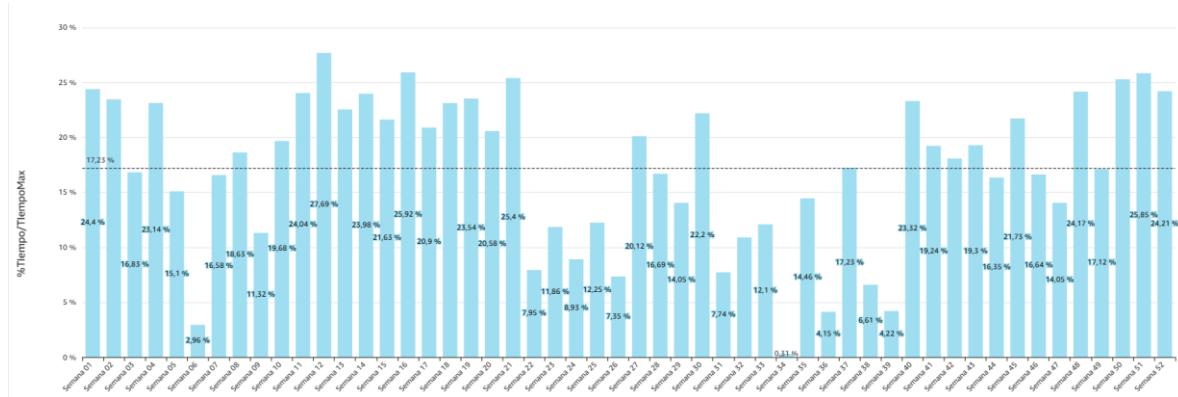


Figura 20 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Capacidad

5.1.2.2 Disminución de la Capacidad

Al reducir la capacidad en un 10%, el modelo alcanza la misma solución óptima de 248.698 unidosis, pero con un nivel de utilización de recursos significativamente mayor, lo que implica una menor holgura de capacidad disponible. La media de producción aumenta considerablemente a un 91.36%, trabajando en 29 de las 52 semanas al 100% de su capacidad. Al igual que en los casos anteriores, el modelo optimiza de forma global la producción para culminar en la semana 52 con el 100% del stock posible para cada SKU. En la Figura 21 se pueden observar los resultados obtenidos.



Figura 21 - Producción por semana Disminución Capacidad

En cuanto a los tiempos de producción, se observa que, aunque la capacidad disponible se utiliza con menor holgura, el comportamiento temporal mantiene características similares al Caso Base. Con un promedio del 17,23% de utilización sobre el tiempo total de producción, la reducción de la capacidad no impacta de manera significativa en la flexibilidad o margen de los tiempos productivos. En la Figura 22 se pueden observar los resultados obtenidos.

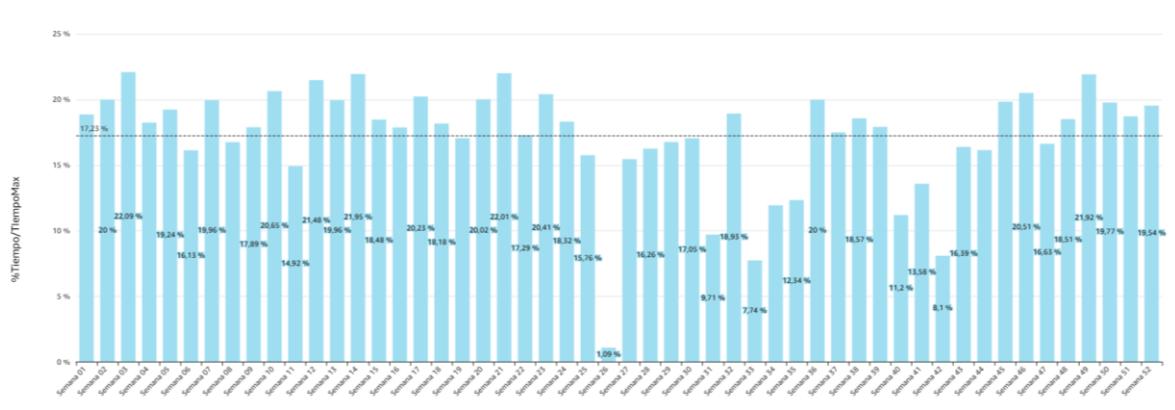


Figura 22 - Tiempo producido sobre tiempo total Disminución Capacidad

Por lo tanto, la reducción o el aumento de la capacidad no modifican la solución obtenida por el modelo. Esto evidencia que la restricción asociada a la capacidad de producción no resulta ser la limitante.

5.1.3 Análisis de Sensibilidad 3 – Variación del Stock Máximo (P_{MAX_i})

Por último y dado los resultados anteriores, otro parámetro que puede variar los resultados del modelo es P_{MAX_i} . Para esto, según el cálculo de dicho parámetro explicado en 4.3.2.10, se estudió el modelo con un Stock Máximo de guardado para 6 y 10 semanas, asumiendo un correcto almacenamiento y gestión de las fechas de vencimiento de cada uno de los lotes de comprimidos. A continuación, se presentan los resultados para cada caso.

5.1.3.1 Aumento de Stock Máximo

En esta oportunidad, la función objetivo arrojó una solución de 257.946 unidosis producidas en las 52 semanas. Solo en 21 semanas de las 52, la producción de unidosis fue la máxima con 5816 unidosis cortadas. En el resto de las semanas, se tiene una media de producción de 75.33%, con un máximo de 99.89% y un mínimo de 9.28% de producción sobre la capacidad máxima producida definida. A diferencia del Caso Base, se puede observar que la distribución es más uniforme, con un descenso considerable de producción únicamente en la semana 30. A continuación, en la Figura 23, se puede observar la producción por semana y el promedio de stock:

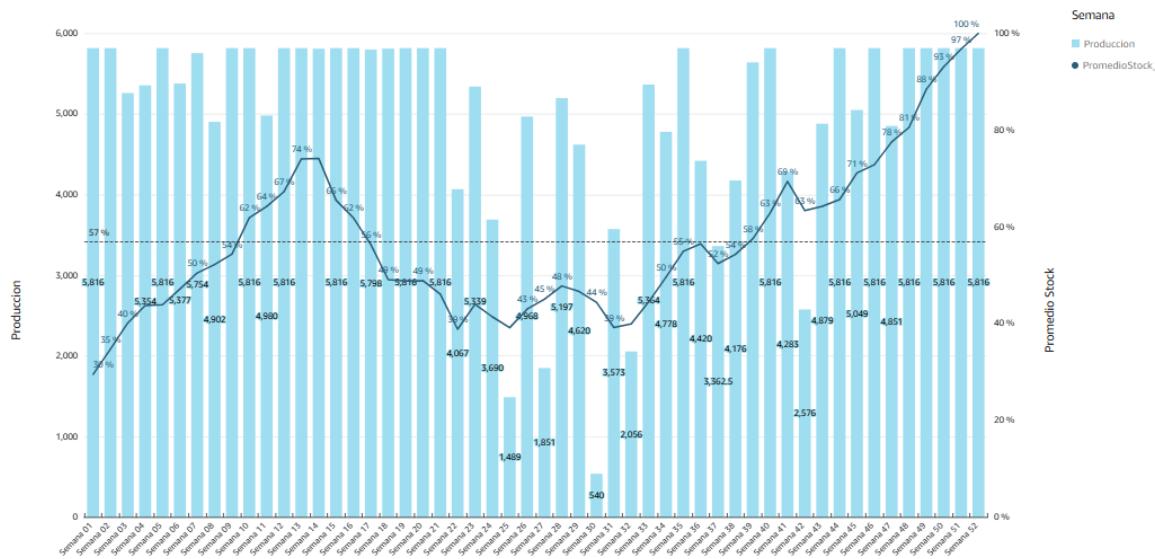


Figura 23 - Producción por semana Aumento Stock Máximo

El comportamiento del stock promedio semanal presenta características similares a las del Caso Base, mostrando un aumento uniforme hasta la semana trece, seguido de una disminución durante nueve semanas, para finalizar el año con un crecimiento que permite que, en la última semana, todos los SKU alcancen su stock máximo de guardado.

En cuanto al tiempo de producción se puede observar un leve aumento en la media del tiempo producido sobre el tiempo máximo de producción comparado al Caso Base. A continuación, se presenta en la Figura 24 los datos obtenidos:

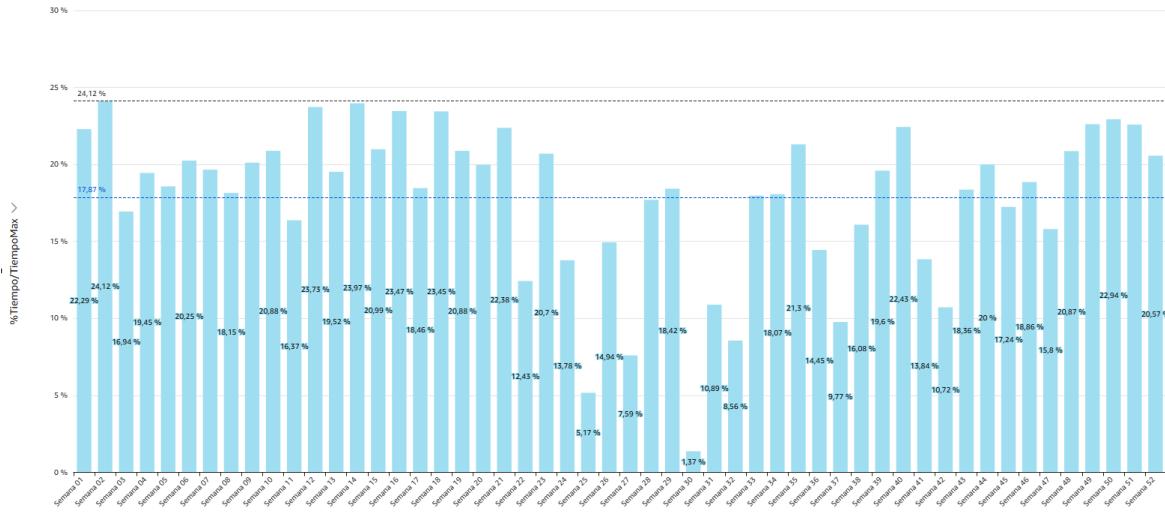


Figura 24 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Stock Máximo

Como puede observarse, aumentar 2 semanas la cobertura de cada principio activo permite producir casi un 4% más en el horizonte de 52 semanas.

5.1.3.2 Disminución de Stock Máximo

Disminuyendo a 6 semanas la cobertura de cada principio activo el modelo arrojó una solución de 239.455 unidosis producidas en las 52 semanas. Con una media de 77.96% de producción sobre la capacidad máxima producida definida, se tiene únicamente en 14 semanas el máximo de producción permitido. De todas formas, al igual que en el caso Base, el resultado de producción permite que se alcance la semana 52 con el máximo de stock permitido para los 35 SKU. A continuación, se presenta en la Figura 25 los resultados obtenidos para la distribución de la producción en este análisis de sensibilidad.

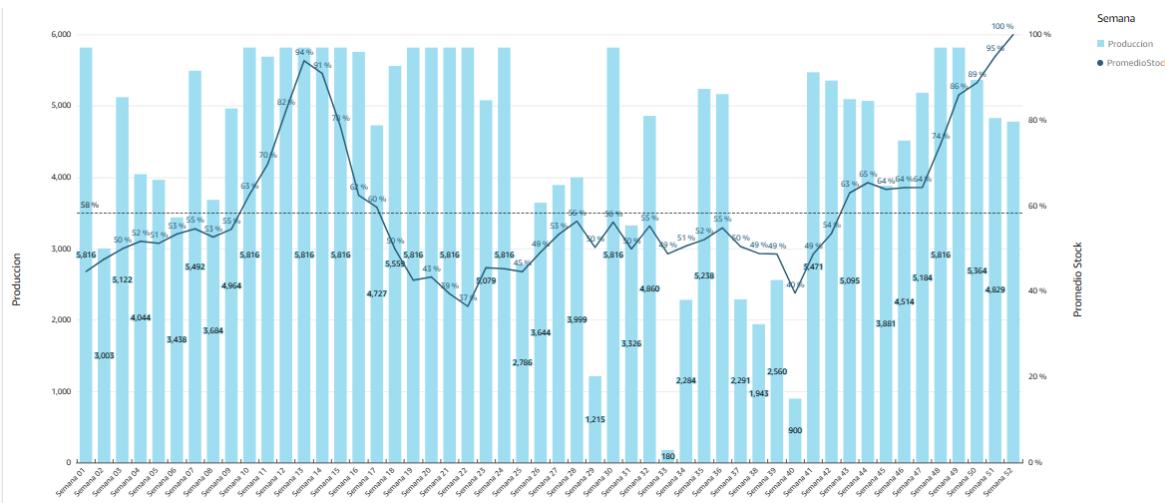


Figura 25 - Producción por semana Disminución Stock Máximo

En cuanto al tiempo se observa que la media del porcentaje del tiempo de producción sobre el tiempo permitido es de un 17%, levemente menor al Caso Base. A su vez, el pico máximo

del tiempo producido también es menor con un valor de 24%. A continuación, en la Figura 26, se pueden observar los resultados.

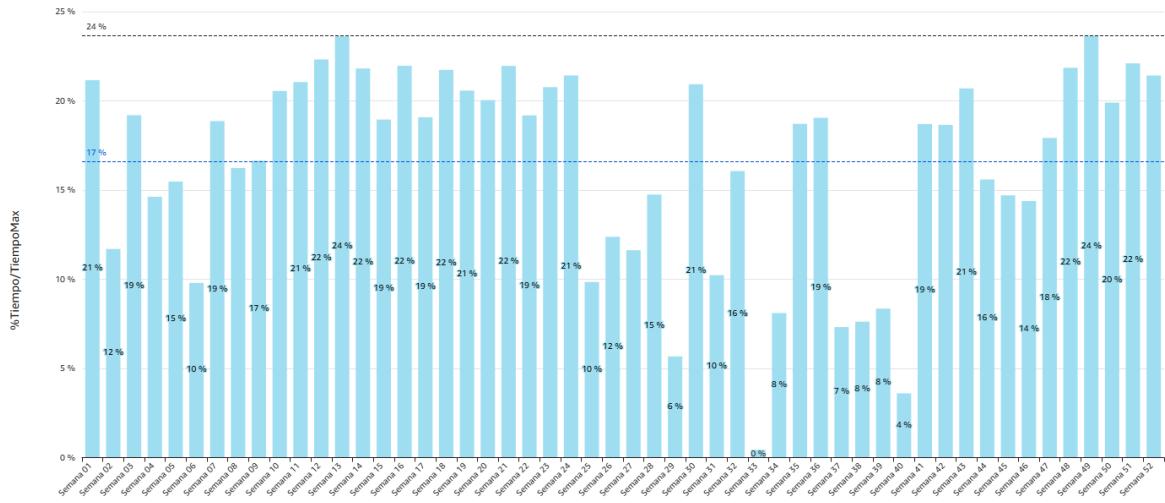


Figura 26 - Tiempo producido sobre tiempo total Disminución del Stock Máximo

De manera similar al incremento del Stock Máximo, se observa una variación del 4% en la producción total. Esto evidencia que P_{MAX_i} constituye una restricción con incidencia directa sobre el resultado final del modelo.

5.1.4 Conclusiones Análisis de Sensibilidad

Los análisis de sensibilidad realizados permitieron evaluar el impacto de variaciones en tres parámetros claves del modelo: el tiempo máximo de producción, la capacidad productiva y el stock máximo de guardado. Los resultados obtenidos muestran comportamientos diferenciados según el parámetro analizado, lo cual aporta evidencia sobre cuáles restricciones resultan determinantes en la solución óptima y cuáles no. Esta evaluación resulta fundamental, ya que brinda insumos concretos para priorizar los factores de gestión que efectivamente condicionan el desempeño del sistema de producción de unidosis.

En primer lugar, se constató que ni el tiempo máximo disponible para producir ni la capacidad de corte del personal representan restricciones críticas en el horizonte de 52 semanas. Aumentar o disminuir estos valores no altera la solución óptima obtenida, manteniéndose la misma cantidad total de unidosis producidas que en el Caso Base. Su influencia se refleja únicamente en la utilización relativa de los recursos: cuando el tiempo o la capacidad aumentan, la operación se vuelve más holgada, mientras que al disminuir se produce un mayor ajuste y número de semanas trabajando al máximo. Esto demuestra que, mientras dichos parámetros se mantengan en niveles factibles, no constituyen cuellos de botella estructurales para el modelo.

Por el contrario, la variación de P_{MAX} sí mostró un efecto directo sobre el resultado final. Incrementar el nivel de cobertura permitió aumentar la producción en torno a un 4%, mientras que reducirlo disminuyó en igual proporción el volumen total alcanzado. De este modo, queda en evidencia que el stock máximo constituye la restricción verdaderamente

limitante del modelo, ya que define la frontera productiva más allá de los recursos humanos o del tiempo disponible. En consecuencia, la gestión de la capacidad de almacenamiento y de las condiciones logísticas asociadas al stock debe ser considerada el factor clave a optimizar, siendo este el principal determinante de la planificación y de la posibilidad de expansión futura del sistema.

A continuación, se detalla un resumen comparativo de los tres análisis de sensibilidad contra el caso base:

Tabla 7 – Resumen Resultados Análisis de Sensibilidad

	Solución (unidosis)	Ratio entre Producción vs Capacidad Máxima Medio	Ratio entre Tiempo Producido vs Tiempo Total Medio	Porcentaje Stock Medio por semana
Aumento Tiempo Máximo	248.698	61,67%	12,92%	54,69%
Aumento Stock Máximo	257.946	85,29%	17,87%	57%
Aumento Capacidad	248.698	74,75%	17,23%	57%
Caso Base	248.698	82,23%	17,23%	57%
Disminución Tiempo Máximo	No hay solución	No hay solución	No hay solución	No hay solución
Disminución Stock Máximo	239.455	77,96%	17%	58%
Disminución Capacidad	248.698	91,36%	17,23%	58,08%

Más allá de los valores numéricos alcanzados por la función objetivo, los resultados permiten identificar implicancias prácticas para la operación diaria del sector de unidosis. Por ejemplo, cuando el modelo muestra semanas de baja producción aun disponiendo de capacidad, esto no refleja una ineficiencia del sistema sino una decisión estratégica orientada a cumplir con las restricciones de stock. En términos operativos, esto significa que el personal podría tener semanas con menor carga de trabajo en cortado para utilizar

esas semanas en otro tipo de trabajos administrativos, compensadas con semanas de producción intensiva, manteniendo siempre la cobertura necesaria de medicamentos.

5.2 Análisis de Escenarios

En esta sección se presenta el análisis de escenarios diseñado para evaluar el comportamiento del modelo bajo distintas condiciones y supuestos. El propósito de este estudio es explorar cómo la modificación de determinados parámetros incide en la capacidad de producción de dosis unitarias, con el objetivo de identificar estrategias que permitan ampliar la cobertura de abastecimiento. Como se mencionó antes, actualmente, el HC alcanza a cubrir únicamente un 30% de sus camas con el sistema de unidosis, mientras que la meta institucional se orienta a llegar al 90%. En este marco, los escenarios propuestos no solo permiten cuantificar los impactos de cambios en la capacidad, el tiempo o las restricciones operativas, sino también ofrecer una base de apoyo para la toma de decisiones que acerquen al hospital a dicho objetivo estratégico.

5.2.1 Análisis de Escenarios 1 – Mejora de Procesos Productivos

El primer escenario analizado consistió en aumentar la capacidad productiva sin necesidad de realizar inversiones significativas. Se trata de la alternativa más sencilla de implementar, dado que puede lograrse mediante mejoras en el proceso de cortado o a través de incentivos y estrategias de motivación al equipo de trabajo. En este sentido, representa una medida rápida y de bajo costo, que resulta natural considerar en primera instancia antes de proyectar escenarios que impliquen un mayor nivel de recursos financieros. En este caso, la capacidad se multiplicó por un factor de 2 y se determinó P_{MAX} en 24 semanas.

El modelo arrojó una solución de 322.648 unidosis para el horizonte de 52 semanas. Con una media de producción del 53,54%, el sistema trabaja tan solo en 7 semanas al 100% de su capacidad, mientras que en otras 3 semanas su producción es nula. Por otro lado, el promedio del stock sigue la misma dinámica observada en escenarios previos, alcanzando el 100% hacia el final del horizonte. Esto refuerza que el modelo tiende a maximizar el nivel de inventario disponible cuando la capacidad de almacenamiento lo permite, incluso si ello implica mantener una baja eficiencia en el uso del tiempo de producción. En la Figura 27 se muestran los resultados obtenidos.

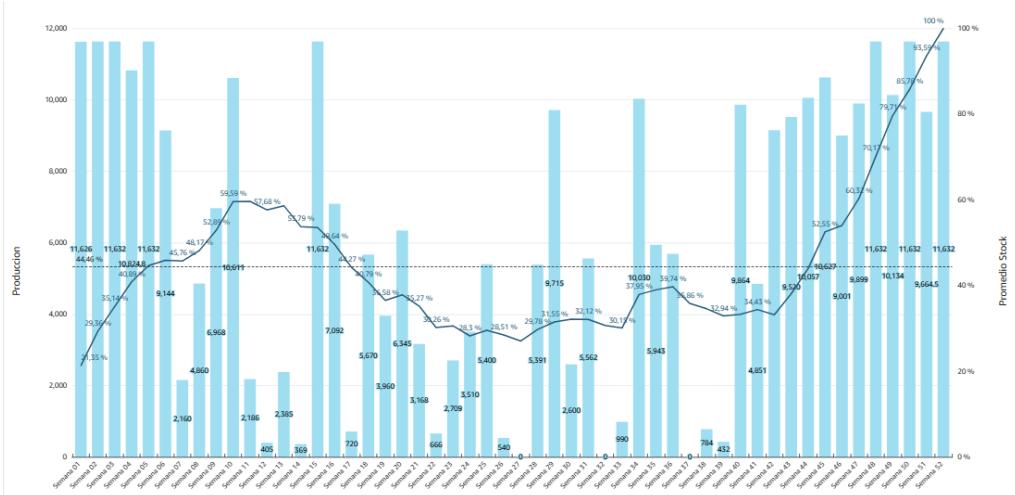


Figura 27 - Producción por semana Mejora Procesos

Por su parte, se observa, como era de esperarse, que la media del tiempo producido aumentara. Si bien el aumento es leve, se tiene una media de 22,35% con un máximo de 49,74% en las últimas semanas del período. Este aumento se debe a que el equipo de trabajo aumentara su producción sin aumentar sus tiempos de trabajo. A continuación, se muestra la Figura 28 con los resultados obtenidos.

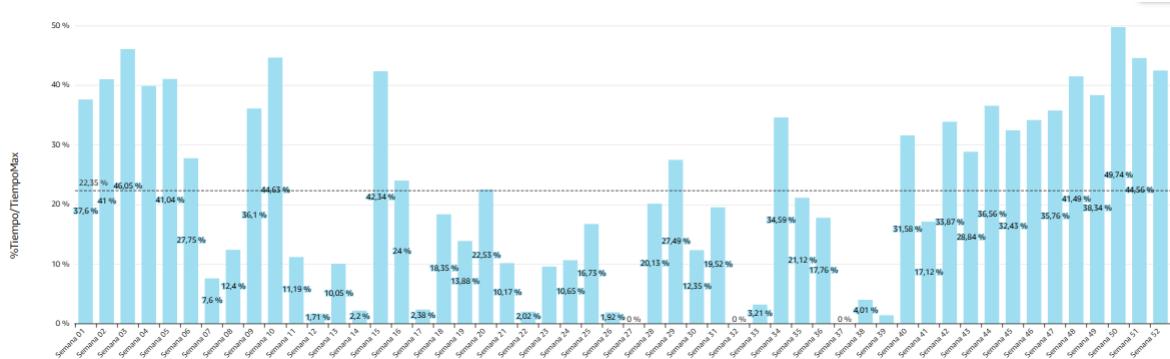


Figura 28 - Tiempo producido sobre tiempo total Mejora Procesos

Este escenario permite incrementar la producción total y mejorar levemente el uso del tiempo, de manera sencilla y de bajo costo para el hospital. No obstante, el volumen alcanzado resulta insuficiente para cubrir el 90% de las camas, por lo que no cumple con el objetivo planteado.

5.2.2 Análisis de Escenarios 2 – Aumento de Personal de Trabajo

Otro escenario considerado para incrementar la capacidad productiva consiste en la contratación de nuevo personal en el sector de cortado y envasado de unidosis. En este caso, se plantea un equipo de nueve personas distribuidas en dos turnos diarios de seis horas, sin superposición entre ellos. Cada turno dedicaría cuatro horas al proceso de

cortado, lo que permite alcanzar un tiempo máximo de producción (T_{MAX}) de 648.000 segundos semanales y una capacidad, (C), de 17.448 unidosis por semana.

Para el análisis también se ajustó el parámetro P_{MAX} , dado que los estudios de sensibilidad previos evidenciaron que constituye la restricción más limitante del sistema. Inicialmente, se fijó P_{MAX} en un horizonte de ocho semanas de almacenamiento, lo que resultó en la ausencia de solución factible. De todas formas, luego se extendió a 24 semanas y obtuvo una solución de 755.707 unidosis en el horizonte de las 52 semanas. Con una media de producción del 83,29%, el modelo opera 23 de las 52 semanas al 100% de su capacidad y en el resto de las semanas, mayoritariamente por encima del 50% de la misma. El comportamiento del promedio del Stock es igual al de todos los casos anteriores, finalizando en la semana 52 con el 100% del Stock posible en todos los SKU. A continuación, se presentan los resultados de la producción.

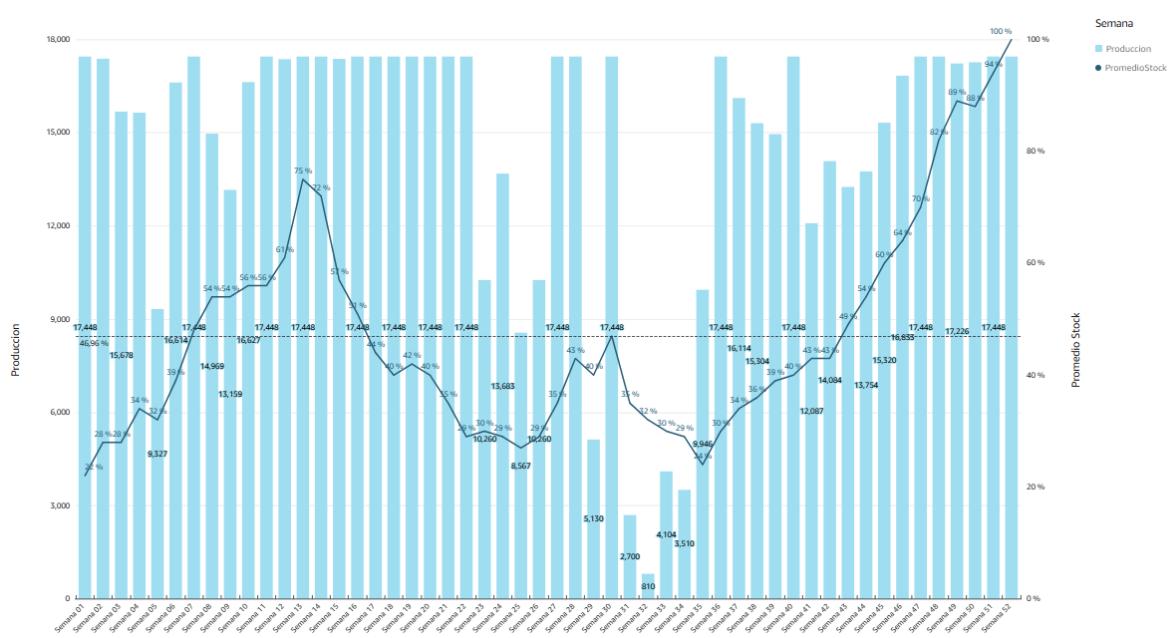


Figura 29 - Producción por semana Aumento Personal

En relación con el tiempo de producción, el comportamiento observado es similar al del Caso Base. Con un promedio de utilización del 17,45%, el equipo de trabajo operaría durante las 52 semanas del horizonte de planificación por debajo del 25% de su capacidad máxima en cuanto a tiempo. Este resultado evidencia una eficiencia operativa muy reducida, ya que, a pesar de la ampliación de la capacidad instalada, la utilización efectiva del recurso humano continúa siendo baja. A continuación, se observan los datos obtenidos sobre el tiempo de producción.

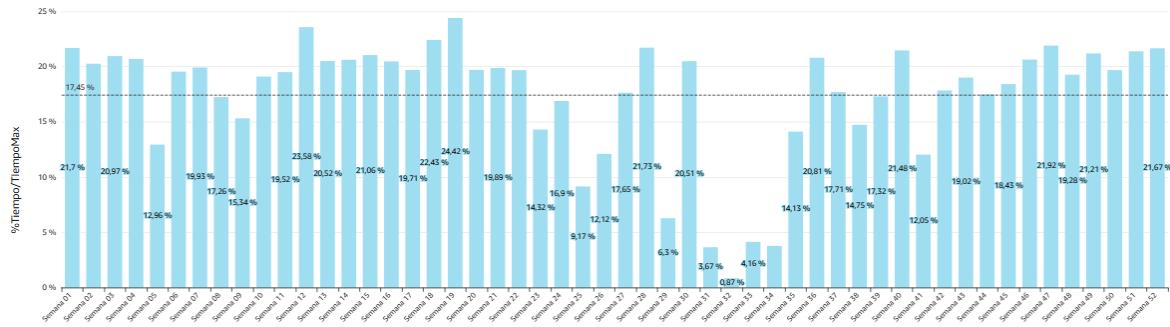


Figura 30 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Personal

Este escenario demuestra que la incorporación de nuevo personal y la reorganización de los turnos de trabajo permiten alcanzar el objetivo del HC. Sin embargo, también evidencia que este incremento en la producción no se traduce en un uso más eficiente del tiempo de trabajo. Esto refuerza la idea de que el principal factor restrictivo no reside en la disponibilidad de tiempo de producción, sino en la interacción entre la capacidad instalada y P_{MAX} . De este modo, si bien la medida contribuye a acercar al hospital a su meta de cobertura, resulta insuficiente por sí sola para garantizar un aprovechamiento óptimo de los recursos.

5.2.3 Análisis de Escenarios 3 – Incorporación de una máquina de corte

Por último, el HC cuenta con un fondo de inversión otorgado por el Estado que les permitiría adquirir una máquina específica para el cortado de unidosis. Esta máquina no solo aumentaría la velocidad de cortado, sino que también permitiría producir más unidosis en un tiempo más prolongado.

Se plantea, por lo tanto, un escenario en el que se incorpora una máquina específica para el cortado de unidosis. Con esta premisa, se ven modificados varios parámetros del modelo base. En primer lugar, se aumenta linealmente la demanda por un factor de tres, asumiendo que el 90% de las camas del hospital se abastecen desde el sector de unidosis. A su vez, se mantiene P_{MAX} de los demás escenarios, siendo la capacidad máxima de guardado la demanda de 24 semanas para cada SKU.

Por último, considerando la máquina que el HC tiene posibilidad de adquirir, se ajustan los parámetros C y T_{MAX} de acuerdo con la documentación de esta. Dado que la velocidad promedio de corte es de 2000 unidosis por hora [25], se definió C con un valor de 36000 unidosis, siendo 18 las horas de trabajo de la máquina. El valor de horas se definió teniendo en cuenta que el personal de trabajo es de tres personas, las cuales hacen 6 horas diarias. Se asumió una guardia escalonada que pudiera monitorear y empaquetar las unidosis que la máquina fuera cortando.

En este caso, la función objetivo alcanza el valor de 755.707 unidosis. El modelo logra una solución factible que multiplica por un factor de 3 la producción inicial y alcanza el volumen necesario para cubrir la demanda objetivo. Esto confirma que la incorporación de equipamiento adicional y una extensión en el tiempo de producción permitirían responder adecuadamente al crecimiento proyectado en la demanda. Por su parte, el promedio de

Stock disminuye a una media de 41,44%, sin embargo, la pendiente en las últimas semanas del período es mayor a todos los escenarios y pruebas anteriores. A continuación, en la Figura 31 se observa la producción semanal para este escenario:

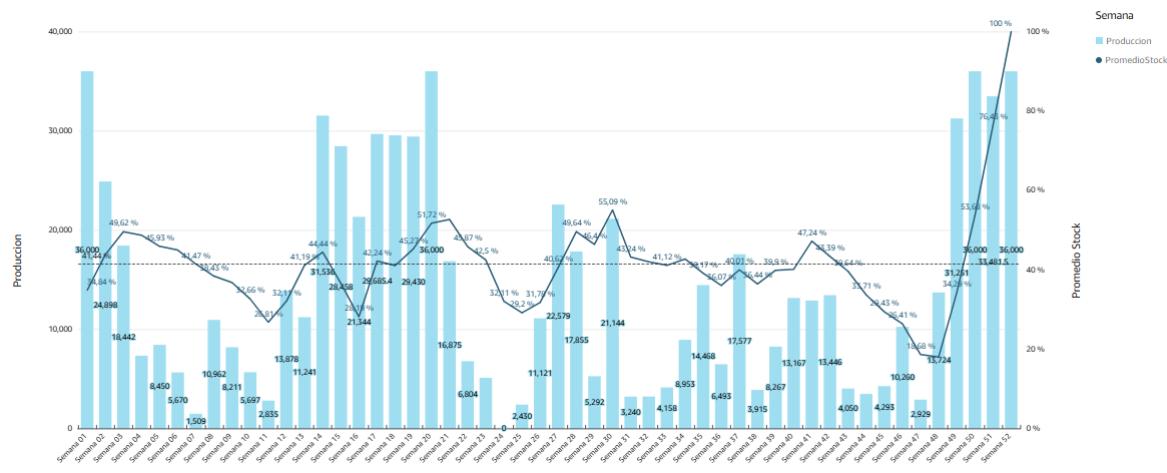


Figura 31 - Tiempo producido sobre tiempo total Aumento Personal

Por su parte, el tiempo de producción sobre el tiempo total presenta una alta variabilidad a lo largo de las 52 semanas con una media de tiempo del 34,91%. Se observan valores máximos cercanos al 90%, pero también valores por debajo del 20%. A continuación, se muestra la Figura 32 con los resultados obtenidos.

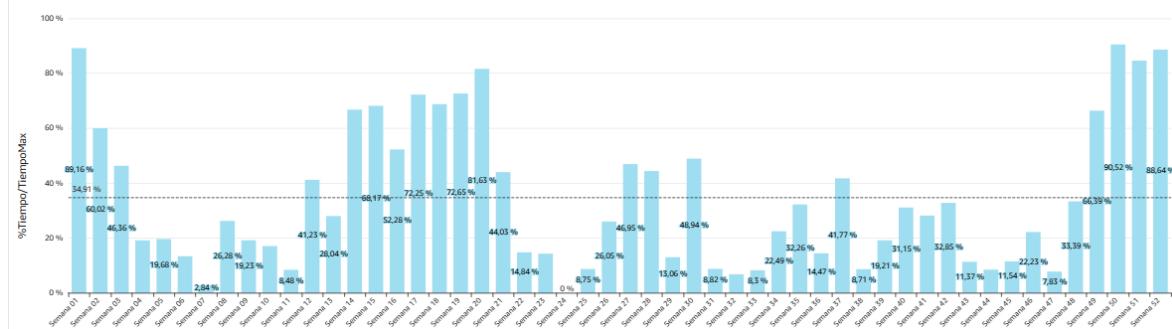


Figura 32 - Tiempo producido sobre tiempo total Incorporación Máquina

En conclusión, este escenario demuestra que la combinación de mayor equipamiento y la extensión en el tiempo de producción alcanzar la meta de cubrir el 90% de las camas. Si bien el nivel promedio de stock es inferior al de los escenarios anteriores, la fuerte pendiente observada en las últimas semanas refleja la capacidad del modelo de sostener la demanda y garantizar la disponibilidad de unidosis hacia el final del horizonte de planificación.

5.2.4 Conclusiones Análisis de Escenarios

Finalizadas los análisis de escenarios, se observa que el modelo responde de manera consistente frente a cambios estructurales en la capacidad instalada y en las restricciones operativas. El análisis de los tres escenarios evaluados permite establecer conclusiones claras sobre las estrategias más efectivas para optimizar la producción de unidosis en el HC.

En primer lugar, al aumentar la capacidad de almacenamiento del HC, se observa un incremento considerable en la producción de unidosis. Este resultado evidencia que la limitación principal que enfrenta actualmente el hospital no reside en la capacidad de producción del personal, sino en la capacidad de almacenar inventario. La disponibilidad de espacio para guardar dosis unitarias termina siendo el factor determinante que condiciona la producción y la posibilidad de abastecer a la demanda completa del hospital. En este sentido, cualquier estrategia orientada a incrementar la producción sin ampliar el almacenamiento resultaría insuficiente para mejorar el abastecimiento global.

Por otro lado, los resultados del Escenario 1 muestran que, aun aumentando la capacidad de almacenamiento y la capacidad de producción, lo generado por el equipo no alcanza para cubrir el 90% de las camas del HC. Esto indica que, aunque el almacenamiento ya no es el cuello de botella principal, la limitación en la capacidad de producción del personal sigue siendo un factor crítico. Si bien se logra un incremento en la producción gracias a un mayor espacio de guardado, este aumento resulta insuficiente para cumplir los objetivos de abastecimiento, lo que evidencia la necesidad de priorizar intervenciones que amplíen la capacidad productiva.

Por su parte, los Escenarios 2 y 3 alcanzan un valor idéntico de 755.707 unidosis, lo que demuestra que tanto el aumento de personal como la incorporación de equipamiento adicional permiten multiplicar por un factor de 3 la producción inicial y cumplir con los objetivos de abastecimiento del HC. La coincidencia en los resultados indica que existen distintas alternativas para ampliar la capacidad productiva; sin embargo, estas difieren significativamente en términos de sostenibilidad, costos operativos y dependencia de recursos humanos. Mientras el Escenario 2 depende directamente de la disponibilidad y gestión del personal, el Escenario 3 proporciona una solución más estable y predecible, al integrar maquinaria que asegura un aumento consistente de la producción sin aumentar la carga laboral del personal existente.

Desde una perspectiva operativa y estratégica, la incorporación de equipamiento adicional (Escenario 3) se perfila como la opción más recomendable. Esta alternativa no solo permite alcanzar el volumen necesario para cubrir la demanda, sino que también contribuye a la continuidad del servicio y a la planificación a largo plazo, reduciendo riesgos asociados a la variabilidad en la disponibilidad de personal. Además, este enfoque facilita la gestión del stock y la programación de la producción por SKU, ofreciendo al hospital una herramienta confiable que guía qué producir y en qué momento. En consecuencia, el Escenario 3 representa la alternativa más equilibrada, eficiente y sostenible, asegurando que el sistema de unidosis cumpla con sus objetivos operativos y de calidad de manera consistente.

A continuación, en la tabla 7, se muestra una tabla comparativa con los resultados obtenidos.

Tabla 8 - Resumen Resultados Análisis de Escenarios

	Solución (unidosis)	Ratio entre Producción vs Capacidad Máxima Medio	Ratio entre Tiempo Producido vs Tiempo Total Medio	Porcentaje Stock Medio por semana
Caso Base	248.698	82,23%	17,23%	57%
Mejora Procesos	322.648	53,54%	22,35%	44,46%
Aumento Personal	755.707	83,29%	17,45%,	46,96%
Incorporación Máquina	755.707	40,37%	34,91%	41,44%

6 Selección de Tecnologías

La optimización del proceso de preparación y distribución de medicamentos es un desafío clave para garantizar la seguridad del paciente y la eficiencia operativa. De acuerdo con la necesidad del aumento de demanda para satisfacer más pisos del HC, es imprescindible analizar alternativas tecnológicas que permitan sostener las necesidades de este.

Esta sección presenta el análisis y justificación para la incorporación de tecnología automatizada en el sector de unidosis que permita cortar, envasar y etiquetar cada principio activo.

6.1 Necesidad de máquina de cortado y envasado automático

Según el Análisis de Escenario 2, la producción con la máquina aumentó más de cinco veces con respecto a lo que sería la producción actual de unidosis por el equipo de trabajo. Para poder llegar a cumplir con la demanda esperada del 90% de las camas del HC, se necesitaría más del doble del personal y el hospital no tiene la infraestructura necesaria en este sector para poder atender a los mismos.

Realizando una evaluación del proyecto y la importancia de que el HC pueda crecer y cumplir con casi la totalidad de las camas con unidosis, se sugiere la implementación de una máquina de cortado y envasado, de manera de mejorar la eficiencia y productividad del proceso actual.

6.1.1 Selección de máquina de cortado y envasado automático

Si bien existen varios modelos, el HC ya había tenido contacto con el proveedor Opuspac, que le había ofrecido la máquina de cortado y envasado Opus30X + BC 100. Opuspac es un proveedor brasileño con 17 años de experiencia en ser solución tecnológica para diversos hospitales de todo el mundo. Por su parte, la máquina ofrecida cuenta de dos partes. Por un lado, la máquina BC 100, es un cortador totalmente automático que puede recibir hasta 100 blísteres listos para cortar, mientras que la máquina Opus 30X envasa e imprime la información y códigos para cada una de las unidosis [25].



Figura 33 - Máquina BC100



Figura 34 - Máquina Opus 30X

El cortador de Blíster BC100 tiene unas medidas de 0,734 de ancho por 0,723 metros de profundidad y la máquina Opus 30X dispuesta para envasar las unidosis 1,05 de ancho por 0,65 metros de profundidad [25].

Actualmente, el HC cuenta con una envasadora automática que está ubicada dentro del sector de unidosis. Si bien es utilizada en algunos momentos, no es una tecnología moderna y suele trancarse durante el proceso de envasado. La misma se encuentra en un espacio cerrado, donde se podría ubicar estas dos máquinas. En la Figura 35 se muestra un plano del sector de preparación de pedidos, donde se encuentra el espacio donde podría ubicarse las máquinas mencionadas:

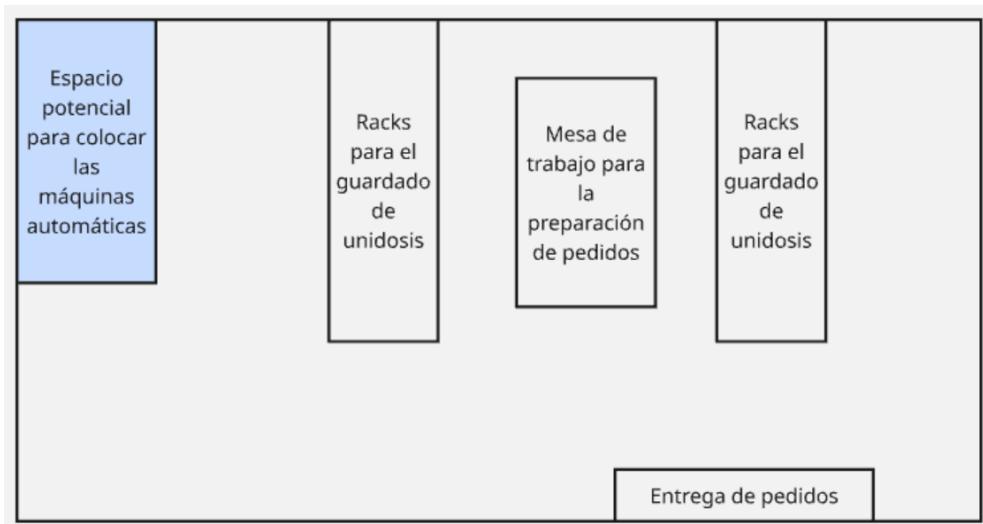


Figura 35 - Ubicación de las Máquinas Opus 30X y BC100

6.1.2 Ventajas de máquina de cortado y envasado automático

Dentro de las ventajas de la adquisición de ambas máquinas para el cortado y envasado de unidosis, se destaca la significativa reducción del margen del error humano en el proceso. Actualmente, es posible que dos operarios trabajen simultáneamente en la misma mesa manipulando diferentes principios. Esta práctica incrementa el riesgo de errores en la

identificación, dosificación y rotulado de medicamentos, así como también eleva la probabilidad de contaminación cruzada debido a la cercanía y falta de barreras físicas entre las tareas. La incorporación de la máquina permitiría aislar completamente cada proceso de corte y envasado, asegurando que solo un principio activo sea introducido en cada ciclo de trabajo. De esta manera, se asegura la trazabilidad de este y permitiría al HC alinearse de manera más estricta a los lineamientos de las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), mejorando la seguridad del paciente.

A su vez, la implementación de una máquina automatizada permitiría que todo el proceso se realizaría en línea, de forma continua e integrada. Esto implica que las etapas de cortado del blíster, envasado de la dosis unitaria y rotulado se llevarían a cabo de manera secuencial, dentro del mismo equipo, sin necesidad de intervención humana entre cada fase. La automatización de este flujo permite reducir significativamente los tiempos operativos, dado que se evitan los tiempos de traslado entre cada una de las etapas como se hace actualmente. Además, ayuda a disminuir los riesgos asociados a ese manejo manual, como la pérdida o mezcla de medicamentos, errores en la identificación o etiqueta incorrecta.

En conclusión, la incorporación de las máquinas Opus 30X y BC100 representa una solución concreta y viable a la demanda de unidosis del HC. Esta inversión no solo incrementaría exponencialmente la capacidad de producción sin necesidad de ampliar los recursos humanos del sector, sino que también garantiza una mejora sustancial en la calidad, seguridad y trazabilidad del proceso.

Cabe destacar que la incorporación de equipamiento automático y la correcta gestión de inventarios no solo permiten alcanzar los volúmenes de producción proyectados, sino que también fortalecen el cumplimiento de estándares nacionales e internacionales de farmacia hospitalaria. En particular, el Estándar Nacional de Buenas Prácticas de Farmacia Hospitalaria y las BPM enfatizan la necesidad de trazabilidad, control de calidad y reducción de errores de medicación.

En este sentido, el modelo matemático y las recomendaciones de este proyecto brindan una base técnica alineada con dichas normativas, asegurando que las decisiones de inversión no solo respondan a un aumento de capacidad, sino también a un marco regulatorio que prioriza la seguridad del paciente y la eficiencia en el uso de recursos.

6.2 Gestión del Cambio

La adquisición de las máquinas en el HC no solo implicaría una transformación en los procesos técnicos y operativos, sino también un cambio significativo en la dinámica del equipo de trabajo actual. Por este motivo, es fundamental implementar una estrategia de gestión del cambio que acompañe al personal en esta transición. Esta sección aborda las acciones necesarias para facilitar una transición progresiva y participativa, garantizando que el personal no solo conserve su rol dentro del HC, sino que adquiera nuevas competencias y responsabilidades acordes a las necesidades del servicio.

6.2.1 Identificación del impacto en el equipo actual

El área de unidosis del HC actualmente funciona con un equipo de tres personas encargadas de realizar de manera manual el corte de blísteres, el envasado de las unidades y el posterior rotulado. Este modelo de trabajo implica una carga de trabajo repetitivo y sujeta a errores humanos. Con la implementación de las máquinas, gran parte de estas tareas serán absorbidas por la automatización de la tecnología, lo que modifica la rutina diaria del equipo.

Es de fundamental importancia anticiparse al impacto que este cambio puede tener sobre el personal. Lejos de implicar una reducción de puestos de trabajo, la automatización permitiría liberar de tareas repetitivas y mecánicas a los trabajadores para reasignarlos a funciones que impliquen mayor capacidad técnica y que aporten más valor al proceso. Dentro de las funciones nuevas generadas se puede encontrar la supervisión del funcionamiento correcto de la máquina, el control de calidad de los productos terminados, la preparación de los lotes para cada principio activo que necesita el HC cortar y el conteo de stock.

Además, al aumentar la capacidad productiva para cumplir con la demanda que el HC necesita, se aumentan también las tareas de la parte de armado de pedidos y distribución dentro del HC. El actual personal a cargo de estas tareas también necesitará apoyo para cumplir con los tiempos y la distribución dentro del hospital, lo cual puede ser otra de las tareas para el personal a cargo del corte y envasado de unidosis actual.

6.2.2 Estrategia de reubicación y formación del personal

Este cambio en el proceso productivo del sector de unidosis necesita una planificación detallada en la reubicación del equipo de trabajo y en su capacitación. La estrategia debe empezar con una identificación de perfiles, habilidades e intereses de cada uno de los trabajadores actuales, de manera que ellos se involucren también en el cambio y reconozcan la oportunidad que tienen en este momento para crecer personal y profesionalmente.

Luego, se propone un programa de capacitación específico, que contemple contenidos técnicos de la operación y supervisión básica de la máquina, la carga de blísteres y resolución de errores comunes dentro del proceso de producción. Además, una capacitación adecuada de control de calidad, trazabilidad del producto y uso del software asociado a la máquina.

Al finalizar esta capacitación, los trabajadores podrán asegurarse de que cuentan con nuevas herramientas que los posicionarán como operadores calificados dentro del nuevo proceso automatizado, fortaleciendo su rol dentro del HC.

6.2.3 Plan de comunicación y acompañamiento

Para asegurar la aceptación del cambio por parte del personal, es imprescindible desarrollar un plan de comunicación interno que sea claro y participativo. Esto debe iniciarse desde los primeros momentos del proyecto, incluyendo reuniones informativas con el equipo afectado

donde se expliquen las razones del cambio, los beneficios esperados y los nuevos roles que se propondrán. Se debe dejar en claro desde el primer momento que la incorporación de las máquinas no implica despidos directos en el equipo de trabajo, sino más bien una transformación positiva de las tareas actuales.

Es de vital importancia mantener durante el proceso instancias de escucha activa y retroalimentación. El equipo de trabajo lleva haciendo estas tareas por varios años y son los que llevan adelante todo el proceso de producción del sector de unidosis. Su información es valiosa para tener en cuenta. Además, deben tener un espacio para expresar dudas, preocupaciones, sugerencias, y de ser necesario de acompañamiento emocional para asegurar una adaptación gradual y sin conflictos.

6.2.4 Evaluación y seguimiento del cambio

Toda gestión del cambio necesita un mecanismo de evaluación y seguimiento que permita monitorear cómo se desarrolla la transición, identificar dificultades y hacer los ajustes necesarios. Esta evaluación puede contemplar indicadores que ayuden a visualizar la evolución del cambio. Dentro de estos indicadores, se sugiere evaluar el nivel de cumplimiento de la demanda del nuevo flujo de trabajo automatizado, la frecuencia y el tipo de errores detectados luego de la implementación, el grado de involucramiento del personal, así como los niveles de satisfacción percibidos por el equipo de trabajo en la etapa posterior al cambio.

Además, se recomienda reuniones periódicas entre el equipo de trabajo y los responsables del proyecto para poder identificar percepciones, sugerencias y necesidades nuevas. Un seguimiento activo permitirá consolidar la sostenibilidad del nuevo modelo de trabajo.

7 Conclusiones

7.1 Conclusiones

En el proyecto de grado que se presenta en este informe, se estudiaron procesos dentro de la farmacia de HC, centrándose particularmente en el proceso de fraccionamiento de dosis unitarias. El objetivo fue la mejora del proceso de preparación y distribución de dosis unitarias de medicamentos con la proyección de incrementar el porcentaje de cobertura de camas con un servicio más eficiente y seguro, utilizando herramientas de modelado para lograr maximizar esta producción.

Para lograr el objetivo del proyecto fue necesario comprender como era el proceso, infraestructura y las interacciones dentro del HC. Para esto, se realizaron múltiples visitas al hospital en las que se pudo interactuar con el personal que se encuentra en el área de fraccionamiento. Además, se logró interactuar con otras áreas que están involucradas dentro del proceso, tanto directa como indirectamente. Obteniendo de esta forma la identificación de los principales cuellos de botella y todas las interacciones del proceso. En estas visitas se revelaron datos de tiempos, cantidades de todos los principios activos que son dosificados a pacientes del HC.

Para abordar el problema se desarrolló un modelo matemático de maximización de la producción. Este modelo permite la planificación semanal de los principios activos a cortar, con la información histórica de la demanda con las restricciones que implican la capacidad, los tiempos del personal y los niveles de stock.

El modelo fue validado mediante pruebas de validación. Se optó por tomar el período de tiempo a estudiar de un año ya que en este se pueden contemplar muchos principios activos que pueden ser zafrales y tener picos de demanda en cortos períodos de tiempo. Además, se seleccionaron los treinta y cinco principios activos con mayor demanda para realizar un estudio más específico de estos ya que son los que se deben tener presentes en todo momento y no tener un faltante de stock.

Se realizó el análisis de sensibilidad y la exploración de diversos escenarios del modelo, arrojaron resultados críticos para el diagnóstico. Se concluyó que, si bien el modelo optimiza la utilización de los recursos actuales, la infraestructura existente impone severas limitaciones. Específicamente, las principales restricciones que impiden alcanzar la cobertura del 90%, como es el principal objetivo del HC, son el espacio de almacenamiento disponible en el sector y la limitada capacidad de cortado y envasado manual de dosis unitarias. Por lo tanto, se demostró que el objetivo de cobertura no es alcanzable únicamente a través de la optimización de procesos, sino que requiere de una inversión en tecnología.

Se concluyó que la incorporación de una máquina automática para el cortado y envasado de unidosis, complementada con una correcta gestión de inventario, es la vía de mayor recomendación para superar la restricción de capacidad de producción y cubrir la demanda proyectada del 90%.

Los beneficios esperados de la automatización se traducen en un incremento notorio en la capacidad productiva, una reducción significativa de los errores humanos al proceso manual (mejorando la seguridad del paciente), y una liberación de tiempo del personal para dedicar a diferentes tareas dentro del sector que pueden contribuir para seguir mejorando el proceso.

El presente proyecto ofrece al Hospital de Clínicas una herramienta de planificación semanal robusta y operativa. Más allá de la implementación práctica del modelo, el mayor valor del trabajo reside en proporcionar la justificación cuantitativa para la posible adquisición de nuevas tecnologías.

Se entiende que esta contribución tiene un impacto directo en la calidad de la atención sanitaria que el HC brinda a la población, al permitir una distribución de medicamentos más segura y eficiente. El modelo desarrollado, junto con el análisis de las restricciones, es importante para la toma de decisiones estratégicas, logrando un balance entre la optimización de recursos actuales y la proyección de crecimiento futuro.

En conclusión, el proyecto demostró que mediante la aplicación de un modelo matemático de optimización es posible planificar de manera eficiente la producción de unidosis en el Hospital de Clínicas, identificando restricciones críticas y evaluando alternativas de mejora. Los análisis realizados confirman que la incorporación de una máquina automática de cortado y envasado representa la opción más sostenible y efectiva para responder al crecimiento de la demanda, al tiempo que reduce la presión sobre el personal y garantiza la continuidad operativa.

Más allá de los aspectos técnicos, este trabajo evidencia el impacto social de optimizar la gestión de unidosis en un hospital público universitario. Un sistema más eficiente no solo permite alcanzar la cobertura del 90% de camas proyectada, sino que también mejora la seguridad de los pacientes, fortalece la trazabilidad del medicamento y contribuye a la formación de profesionales en un entorno con estándares de calidad más elevados.

Finalmente, este proyecto aporta al Hospital de Clínicas una herramienta práctica de planificación semanal y una justificación técnica sólida para futuras inversiones. En términos más amplios, constituye un ejemplo de cómo la ingeniería de producción puede integrarse al ámbito sanitario para mejorar procesos críticos y generar un beneficio directo en la calidad asistencial y en la sostenibilidad del sistema de salud pública.

7.2 Trabajos a futuro

A lo largo del desarrollo de trabajo surgieron diversas oportunidades de profundización, mejora o ampliación, tanto en términos tecnológicos como estratégicos. Estas posibles líneas de investigación futura permitirían enriquecer los resultados obtenidos, adaptarse a contextos cambiantes y acompañar un proceso de mejora continua. A continuación, se presentan algunos de los posibles trabajos a futuro identificados.

7.2.1 Integración con Sistemas de Información Hospitalaria

En primer lugar, como trabajo a futuro a corto plazo, que será de gran interés para el sector de unidosis, consiste en la integración del modelo propuesto con los sistemas de información hospitalarios actualmente en uso, como web-pharma, el cual el HC lo está adaptando a la mayoría de sus áreas. Esta integración permitiría automatizar la recopilación de datos relacionados con la demanda y los niveles de inventario, lo cual reduciría la incidencia de errores asociados a la entrada manual de información y favorecería una planificación más precisa y oportuna, basada en datos en tiempo real. Asimismo, se plantea un posible desarrollo en el diseño de una interfaz funcional que permita la conexión directa entre el modelo de planificación y los sistemas.

Es importante que para que se puedan integrar el modelo con el sistema del HC, que este último sistema esté actualizado y que todos los operarios tengan acceso y conocimiento de cómo usarlo. El HC estaba incorporándolo en todas las áreas ya que lo que más le interesaba era poder tener un control de stock digitalizado y en tiempo real. Esto es clave que ya esté operativo para que se pueda integrar con el modelo propuesto y que el modelo de como resultado lo que realmente se requiera producir.

Una vez que se integre el modelo con el sistema, se podría implementar funcionalidades avanzadas como generación de alertas automáticas cuando algún SKU llegue al punto de pedido ante un evento no habitual. Esto no solo facilitará la implementación del modelo, sino que también permitirá a los usuarios visualizar de forma más clara cuándo conviene priorizar cada principio activo al momento de tomar decisiones de corte.

7.2.2 Incorporación de incertidumbre en la demanda mediante modelos estocásticos

El proyecto asume una demanda determinística basada en datos históricos, pero en un hospital real la necesidad de medicamentos en unidosis puede variar por factores como estacionalidad, cambios en prescripciones o fluctuaciones en la ocupación. Por eso, una línea futura importante es incorporar esta incertidumbre mediante programación estocástica, que permite modelar la demanda como variable aleatoria y generar planes de producción más robustos frente a escenarios inesperados.

Un enfoque adecuado sería la programación estocástica en dos etapas: primero se decide cuánto producir sin conocer la demanda real y, luego, una vez revelada, se realizan ajustes como reprogramar cortes o gestionar excedentes. Este tipo de modelos, ya aplicado en estudios recientes como el de Aalto University [26], ha demostrado reducir faltantes al usar técnicas como muestreo Latin Hypercube [27] y restricciones probabilísticas. Integrar este enfoque al sistema de Soporte a la Decisión permitiría mejorar la planificación bajo incertidumbre y enriquecer el modelo con datos reales acumulados.

7.2.3 Modelos de Aprendizaje Automático para Pronóstico de Demanda

Otra mejora posible es desarrollar herramientas más precisas para anticipar la demanda de unidosis mediante técnicas de aprendizaje automático, capaces de detectar patrones complejos y dinámicos en los datos históricos e incorporar variables externas que afectan

el consumo. Entre los métodos más adecuados se encuentran las redes neuronales recurrentes (RNN) y sus variantes LSTM, que permiten modelar dependencias temporales, así como modelos basados en descomposición estacional y tendencias, como Facebook Prophet [28].

Las RNN y LSTM son útiles para capturar relaciones temporales en series históricas, aunque las LSTM implican mayor complejidad y costo computacional. En cambio, Facebook Prophet combina componentes estadísticos clásicos en un modelo aditivo, es robusto ante cambios abruptos y resulta sencillo de usar e interpretar. Por estas razones, se recomienda comenzar con Prophet en el HC, ya que permite generar pronósticos rápidos y confiables sin requerir conocimientos avanzados en modelos de deep learning [29] [30].

7.2.4 Análisis de Riesgos en la Cadena de Suministro

Por último, una acción de largo plazo sería analizar cómo responde el proceso de unidosis ante interrupciones o eventos disruptivos, como fallas en equipos, escasez de medicación o falta de personal. Esto podría abordarse mediante la simulación de distintos escenarios de riesgo para identificar los puntos más vulnerables del sistema, por ejemplo, cuánto tiempo podría mantenerse el abastecimiento ante la falla de la nueva máquina recomendada o cuántos días de stock permitirían sostener la producción manual priorizando los principios activos clave.

Con los resultados de estas simulaciones, sería posible definir estrategias de mitigación, como establecer stocks de contingencia, priorizar insumos críticos o incorporar mayor flexibilidad en la planificación. Este enfoque fortalecería la capacidad del sistema para adaptarse y recuperarse ante situaciones adversas, mejorando la sostenibilidad operativa del modelo propuesto.

Referencias

- [1] Decreto Ley N°15703. Ley de farmacias, 11 enero 1985. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/15703-1985>. [Último acceso: Abr, 2025].
- [2] Decreto N° 18/989. Información y publicidad de medicamentos, 24 enero 1989. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/18-1989>. [Último acceso: Abr, 2025].
- [3] Decreto Ley N° 14294. Ley de estupefacientes, 11 noviembre 1974. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/14294-1974>. [Último acceso: Abr, 2025].
- [4] "Estándar de buenas prácticas farmacia hospitalaria", Asociación de Química del Uruguay, 2022.
- [5] Hospital de Clínicas. "Nuevas instalaciones Farmacia Unidosis.". 2021 [En línea] Disponible en: <https://www.hc.edu.uy/index.php/portada-noticias/92-nuevas-instalaciones-farmacia-unidosis> [Último acceso: Dic, 2024].
- [6] Jacobs y Chase, Administración de operaciones, producción y cadena de suministro. Decimoquinta edición. 2019.
- [7] Schroeder, M. Goldstein y M. Rungtusanatham, Administración de operaciones. Quinta edición, 2011.
- [8] Ballou, Logística Administración de la cadena de suministro. Quinta edición, 2004.
- [9] "¿Qué es el "lead time" en logística? Como optimizarlo" 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.mecalux.com.uy/blog/lead-time-logistica> [Último acceso: Mar, 2025].
- [10] "Método ABC de inventarios en almacén" 2021. [En línea] Disponible en: <https://www.ar-racking.com/co/actualidad/blog/calidad-y-seguridad-4/metodo-abc-de-clasificacion-de-inventarios-origen-caracteristicas-y-ventajas#>. [Último acceso: Mar 2025].
- [11] "How a 2 bin Kanban system works". [En línea] Disponible en: <https://www.planview.com/resources/articles/lkdc-2-bin-kanban-system/>. [Último acceso: Mar 2025].
- [12] "2-Bin Kanban, an innovative approach to inventory management" – Bellevue Medical Center case study.
- [13] "Two-Bin inventory control: definition, how it works and Example" [En línea] Disponible en: https://www.investopedia.com/terms/t/two-bin-inventory-control.asp?utm_source=chatgpt.com [Último acceso: Mar, 2025].
- [14] M. Gebicki, "Evaluation of hospital medication inventory policies", Health Care Management Science, Volumen 17, Número 3, páginas 215-229, 2014.
- [15] Manuel Uribe Ángel, "Manual para la gestión integral de inventarios de medicamentos, dispositivos médicos e insumos", revisión 1, 2019.
- [16] Texto Ordenado de Contabilidad y Administración Financiera (TOCAF). Vigencia desde junio de 2012. Disponible en: [Texto Ordenado de Contabilidad y Administración Financiera \(TOCAF\) | ARCE](https://www.arce.org.uy/TOCAF/TOCAF_ARCE.html).

- [17] "La gestión del cambio: una habilidad básica para las empresas y las personas en el siglo XXI" ,2022. [En línea] Disponible en: <https://www.iberdrola.com/talento/que-es-gestion-del-cambio#:~:text=La%20prestigiosa%20consultora%20KPMG%20establece,la%20resistencia%20a%20los%20mismos>. [Último acceso: Abr, 2025].
- [18] A. Iacoviello, E. Whiteford y A. Downie, "¿Qué es la gestión de cambios?", 2024 [En línea] Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/change-management>. [Último acceso: May, 2025].
- [19] M. Cortes A. "Guía para la implementación de la gestión del cambio", 2022. [En línea] Disponible en: <https://www.implementandosgi.com/deio/gestion-del-cambio/> [Último acceso: May, 2025].
- [20] T. Pool Bacab, "Administración de la producción" sección "2.6 Selección de la tecnología", 2015. [En línea] Disponible en: <https://taydesofia.weebly.com/26-seleccioacuten-de-la-tecnologiacutea.html> [Último acceso: Abr, 2025].
- [21] S. Mahendran. "Pasos para elegir la tecnología de integración para tu organización", 2019. [En línea] Disponible en: <https://www.chakray.com/es/pasos-para-elegir-la-tecnologia-de-integracion-adecuada-para-tu-organizacion/> [Último acceso: Abr, 2025].
- [22] R. Uthayakumar, S. Priyan, 2013. "Pharmaceutical supply chain and inventory management strategies: Optimization for a pharmaceutical company and a hospital".
- [23] Echeguía, Farolini, Quinelli. Proyecto Final de Grado, carrera Ingeniería de Producción, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, 2021. "Optimización de operaciones logísticas en farmacia hospitalaria".
- [24] Artecona, Bonilla, Buschiazza. Proyecto Final de Grado, carrera Ingeniería de Producción, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, 2017. "Gestión de inventario de insumos médicos especializados".
- [25] Máquinas de reempaque, Al pharma. [En línea] Disponible en: <https://www.alpharma.com.co/maquinas-de-reempaque/> [Último acceso: Dic, 2024].
- [26] Nikzad, Erfaneh; Bashiri, Mahdi; Oliveira, Fabricio, "Two-stage stochastic programming approach for the medical drug inventory routing problem under uncertainty", 2019.
- [27] Muestreo de hipercubo latino, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.statisticshowto.com/latin-hypercube-sampling/> [Último acceso: Abr, 2025].
- [28] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. "Long short-term memory. Neural Computation, 9(8)." ,1997.
- [29] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. "Deep learning." , 2016.
- [30] Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. "Statistical and machine learning forecasting methods: Concerns and ways forward", 2018.

Anexos

Anexo I: Listado de SKU relevados

El listado total de los SKU relevados se muestra en la Tabla 8, se incluye el total de producción anual, el tiempo total de cortado y la demanda promedio para cada uno de ellos. Se verifica que se toman los primeros 35 del listado ya que representan el mayor volumen.

Tabla 9 - Listado total de SKU relevados

SKU	Cantidad total recortada	Segundos Totales	Promedio Producción Semanal
1	19210	150000	369.42
2	18800	120300	361.54
3	13560	72300	260.77
4	12240	104100	235.38
5	10860	75000	208.85
6	10200	72600	196.15
7	10010	72900	192.50
8	9100	58500	175.00
9	9000	80700	173.08
10	8700	66300	167.31
11	7980	53400	153.46
12	7600	52500	146.15
13	7200	60900	138.46
14	6900	51000	132.69
15	6435	57600	123.75
16	6200	32100	119.23
17	5700	49200	109.62
18	5600	59700	107.69
19	5550	61500	106.73
20	5100	39600	98.08
21	5100	40800	98.08
22	4652	32400	89.46
23	4220	35700	81.15
24	4211	48900	80.98
25	4110	39900	79.04
26	4090	41100	78.65
27	4000	21900	76.92
28	3750	45000	72.12

SKU	Cantidad total recortada	Segundos Totales	Promedio Producción Semanal
29	3690	19200	70.96
30	3620	24300	69.62
31	3600	18300	69.23
32	3300	19800	63.46
33	3000	17700	57.69
34	2850	18300	54.81
35	2800	28980	53.85
36	2400	13200	46.15
37	2400	13500	46.15
38	2190	15900	42.12
39	2000	17100	38.46
40	1800	12000	34.62
41	1800	15900	34.62
42	1800	9300	34.62
43	1760	15900	33.85
44	1700	14400	32.69
45	1650	8700	31.73
46	1500	15000	28.85
47	1500	12000	28.85
48	1500	13500	28.85
49	1500	11400	28.85
50	1400	12600	26.92
51	1300	10500	25.00
52	1200	10800	23.08
53	1200	12000	23.08
54	1000	11700	19.23
55	900	5700	17.31
56	800	5700	15.38
57	800	4500	15.38
58	750	10500	14.42
59	720	9300	13.85
60	700	10800	13.46
61	700	9900	13.46
62	700	9900	13.46
63	700	4500	13.46
64	680	5400	13.08

SKU	Cantidad total recortada	Segundos Totales	Promedio Producción Semanal
65	600	9000	11.54
66	600	3900	11.54
67	600	5400	11.54
68	600	8700	11.54
69	600	5100	11.54
70	600	4800	11.54
71	600	5400	11.54
72	600	5400	11.54
73	600	1800	11.54
74	600	4800	11.54
75	560	5700	10.77
76	510	6300	9.81
77	510	3000	9.81
78	510	7200	9.81
79	500	3600	9.62
80	500	3600	9.62
81	420	2400	8.08
82	420	6600	8.08
83	400	7200	7.69
84	390	3000	7.50
85	360	2400	6.92
86	320	1800	6.15
87	300	1800	5.77
88	300	3000	5.77
89	300	3600	5.77
90	300	3600	5.77
91	300	5400	5.77
92	300	2100	5.77
93	300	1200	5.77
94	300	900	5.77
95	300	1800	5.77
96	300	5400	5.77
97	300	3900	5.77
98	300	2400	5.77
99	290	2400	5.58
100	280	1200	5.38
101	240	1800	4.62

SKU	Cantidad total recortada	Segundos Totales	Promedio Producción Semanal
102	240	600	4.62
103	210	3600	4.04
104	200	3600	3.85
105	200	3600	3.85
106	200	1200	3.85
107	200	3600	3.85
108	200	1800	3.85
109	200	1500	3.85
110	200	1800	3.85
111	200	2700	3.85
112	200	1800	3.85
113	200	1200	3.85
114	180	2400	3.46
115	180	1800	3.46
116	180	2400	3.46
117	160	3900	3.08
118	120	1320	2.31
119	120	1200	2.31
120	120	3000	2.31
121	120	2700	2.31
122	100	600	1.92
123	100	900	1.92
124	100	900	1.92
125	100	600	1.92
126	100	1800	1.92
127	90	1500	1.73
128	90	600	1.73
129	80	1800	1.54
130	70	900	1.35
131	60	600	1.15
132	60	600	1.15
133	60	600	1.15

Anexo II: Modelo Matemático

Código ejecutable del modelo

```
# Modelo de maximización de la producción
param N; # Cantidad de principios activos
param S; # Número de semanas
param C; # Capacidad de producción semanal
param M; # Valor suficientemente grande para activar la producción
param Q{i in 1..N, j in 1..S}; # Demanda esperada para cada producto y semana (90% de lo cortado)
param T{i in 1..N}; # Segundos necesarios para cortar cada producto
param T_MAX; # Límite de segundos de trabajo semanales
param S_MAX{i in 1..N}; # Límite de semanas de trabajo para cada principio activo
param PP {i in 1..N}; # Punto de pedido para cada principio activo
param P_Max{i in 1..N}; # Stock máximo para cada principio activo
param SI {i in 1..N}; # Stock Inicial para cada principio activo

var x{i in 1..N, j in 1..S} >= 0 ; # Cantidad de producto i producido en la semana j
var z{i in 1..N, j in 0..S} >= 0; # Nivel de stock para cada producto y semana
var y{i in 1..N, j in 1..S} binary; # Define las variables binarias que representan la selección de productos por semana

# Función objetivo: Maximizar la producción total
maximize ProduccionTotal: sum{i in 1..N, j in 1..S} x[i,j];

# Restricciones

# Capacidad de producción semanal
s.t. CapacidadProduccion{j in 1..S}: sum{i in 1..N} x[i,j] <= C;

# Límite de minutos de trabajo semanales
s.t. LimiteMinutosTrabajo{j in 1..S}: sum{i in 1..N} (x[i,j] * T[i]) <= T_MAX;
```

Activación de la producción

s.t. ActivacionProduccion{i in 1..N, j in 1..S}: $x[i,j] \leq M * y[i,j]$;

Límite de semanas de trabajo

s.t. LimiteSemanasTrabajo{i in 1..N}: $\sum\{j \text{ in } 1..S\} y[i,j] \leq S_MAX[i]$;

Condición inicial del stock

s.t. StockPrimero{i in 1..N}: $z[i,0] = S_I[i]$;

Actualización del stock

s.t. ActualizarStock{i in 1..N, j in 1..S}: $z[i,j] = z[i,j-1] + x[i,j] - Q[i,j]$;

Stock siempre por encima del Punto de pedido

s.t. LimitePP{i in 1..N, j in 1..S}: $z[i,j] \geq PP[i]$;

Stock siempre por debajo de una cantidad máxima

s.t. Matlock{i in 1..N, j in 1..S}: $z[i,j] \leq P_Max[i]$;

end;

Archivos de datos, salidas y análisis

1. Ejecución original
 - a. Datos ingresados para el resultado. Anexo electrónico, archivo “ProyectoDatos.dat”
 - b. Solución del modelo. Anexo electrónico, archivo “SolucionFinal.sol”
2. Verificación y validación del modelo
 - a. Archivos de datos de validación del modelo. Anexo electrónico carpeta “Validación del modelo” archivos “DatosPruebaValidacion1.dat” del 1 al 8.
 - b. Salida obtenida para la validación del modelo. Anexo electrónico carpeta “Validación del modelo” archivos “SolucionValidacion1.sol” del 1 al 8.
3. Análisis de sensibilidad
 - a. Archivos de datos del análisis de sensibilidad del modelo. Anexo electrónico carpeta “Análisis de Sensibilidad” archivos “DatosSensibilidad1.dat” del 1 al 6.
 - b. Salida obtenida para los análisis de sensibilidad. Anexo electrónico carpeta “Análisis de Sensibilidad” archivos “SolucionSensibilidad1.sol” del 1 al 6.
4. Análisis de escenarios
 - a. Archivos de datos del análisis de escenarios del modelo. Anexo electrónico carpeta “Análisis de Escenarios” archivos “DatosEscenario1.dat” del 1 al 3.
 - b. Salida obtenida para los análisis de escenarios. Anexo electrónico carpeta “Análisis de Escenarios” archivos “SolucionEscenario1.sol” del 1 al 3.