

Simulación y optimización de sistemas de vacunación con capacidad finita

Simulation and optimization of systems vaccination with finite capacity

Salvador Hernández González¹, José Alfredo Jiménez-García²,
Manuel Darío Hernández Ripalda³, Israel de la Cruz Madrigal⁴

DOI: 10.19136/hs.a21n3.4588

Artículo Original

• Fecha de recibido: 16 de junio de 2021 • Fecha de aceptado: 16 de febrero de 2022 • Publicado en línea: 31 de agosto de 2022

Autor de Correspondencia

Salvador Hernández- González. Dirección postal: Av. García Cubas 1200, Esquina Ignacio Borunda,
Celaya, Guanajuato, México, C.P. 38010, teléfono: 461 6117575
Correo electrónico: salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx

Resumen

Objetivo: Caracterizar y optimizar el flujo de pacientes dentro de un centro de vacunación, para los casos donde debe tomarse en cuenta que existe una capacidad finita en las colas frente a las estaciones.

Materiales y Métodos: Se asume que los sistemas de vacunación se comportan como una red cerrada de colas con capacidad finita; para caracterizar el flujo de pacientes, se aplica simulación y un diseño experimental Box-Bhenken, donde las variables son las capacidades en las colas (buffer); posteriormente se obtienen los metamodelos del tiempo de ciclo y del número de pacientes vacunados, finalmente se calcula la asignación óptima de los lugares en las colas aplicando programación matemática.

Resultados: Las colas de llenado de formatos, entrega de información y vacunación son las de mayor efecto sobre el tiempo de estadía; las colas de vacunación y el Triage son las de mayor efecto sobre la cantidad de pacientes vacunados. Si se maximiza la salida de pacientes, la mayor cantidad de lugares deben asignarse a la estación de vacunación y el resto de los espacios se distribuyen en las demás estaciones; por otra parte, si se minimiza el tiempo de estadía, entonces la mayor parte de los lugares se asignan a la estación Triage y a continuación a la estación de Vacunación, el resto de los espacios se asignarán dependiendo de la capacidad total del sistema.

Conclusiones: Los responsables de administrar esta clase de sistemas deben definir el criterio bajo el cual deben cuantificar el desempeño del sistema de vacunación y a partir de este, gestionar y controlar el proceso. Cuando la demanda supera las expectativas y no es viable incrementar la capacidad, entonces la alternativa es optimizar el flujo controlando la cantidad de personas dentro del sistema.

Palabras clave: Vacunación masiva; Utilización de Servicios de Salud; Tecnología para la Reducción de los Tiempos de Espera; Simulación por Computador; Análisis de Regresión

Abstract

Objective: Characterize and optimize the flow of patients within a vaccination center, for cases where it must be considered that there is a finite capacity in the queues in front of the stations.

Materials and Methods: Vaccination systems are assumed to behave as a closed queue network with finite capacity; To characterize the flow of patients, simulation and a Box-Bhenken experimental design are applied, where the variables are the capacities in the queues (buffer); Subsequently, the metamodels of the cycle time and the number of vaccinated patients are obtained. Finally, the optimal allocation of places in the queues is calculated by applying mathematical programming.

Results: The queues for filling out forms, delivery of information and vaccination are the ones with the greatest effect on the length of stay; the vaccination and triage queues have the greatest effect on the number of vaccinated patients. If the output of patients is maximized, the greatest number of places should be assigned to the vaccination station and the rest of the spaces are distributed in the other stations; On the other hand, if the length of stay is minimized, then most of the places are assigned to the Triage station and then to the Vaccination station, the rest of the spaces will be assigned depending on the total capacity of the system.

Conclusions: Those responsible for managing this class of systems must define the criteria under which they must quantify the performance of the vaccination system and, based on this, manage and control the process. When demand exceeds expectations and increasing capacity is not feasible, then the alternative is to optimize flow by controlling the number of people within the system.

Keywords: Mass vaccination; Health Services; Technology Applied to Waiting Lists; Computer Simulation; Regression Analysis

¹ Doctor en Ingeniería, Profesor-Investigador. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Celaya. Celaya, Guanajuato, México.

² Doctor en Ingeniería, Profesor de tiempo completo. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Celaya. Celaya, Guanajuato, México.

³ Maestro en Ciencias, Profesor de tiempo completo. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Celaya. Celaya, Guanajuato, México.

⁴ Maestro en Ciencias, Profesor de tiempo completo. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Celaya. Celaya, Guanajuato, México.

Introducción

La pandemia de COVID 19 ha provocado un cambio en el comportamiento de la sociedad, así como en la administración de las operaciones de los sistemas de salud, los cuales han sido los más afectados en la forma de administrar los recursos disponibles. Este escenario genera mucha presión sobre los sistemas de salud de los países, sobre todo de Latinoamérica, ya que una gran cantidad de la población no cuenta con cobertura de Salud ni seguridad social¹. A medida que la vacuna contra el virus esté disponible, la vacunación en masa tendrá un rol fundamental en el combate contra el virus. Al igual que en un desastre provocado por un huracán o un terremoto, la vacunación debe visualizarse dentro de las fases de respuesta y recuperación, donde los recursos deben canalizarse de forma eficiente².

Vacunar grandes cantidades de personas implica resolver problemas de envío, de seguridad, así como de diseño y manejo de los centros de vacunación, además las decisiones deben tomarse con rapidez en un ambiente donde los sistemas cuentan con alto nivel de complejidad y además están sujetos a factores aleatorios^{3,4}.

Los problemas de los sistemas vacunación masivos

Se han habilitado recintos de todas dimensiones (estadios, estacionamientos, centros de convenciones, pequeñas clínicas y centros de salud) para llevar a cabo la tarea de vacunar la mayor cantidad posible de personas⁵. La necesidad de disminuir el riesgo de contagio debido a la gran cantidad de gente reunida plantea el problema de eficientar el flujo de pacientes ya sea minimizando el tiempo de estadía o permanencia dentro del sistema (TC_s) o bien maximizando la cantidad de personas vacunadas por unidad de tiempo, también llamado egresos (Th), ambas son medidas de desempeño de uso regular en la gestión de los sistemas hospitalarios⁶.

Hay que tomar en cuenta que, ahora, es necesario disminuir el riesgo de contagio y que el número de personas que pueden permanecer formadas frente a cada estación es finito; lo anterior tiene como consecuencia que el número total de personas que pueden permanecer dentro de un recinto debe limitarse y además el flujo puede verse interrumpido debido a que los pacientes deben esperar autorización para pasar a cada una de las estaciones generando un incremento en el tiempo de permanencia dentro del sistema^{7,8}. En este sentido, se ha vuelto fundamental el empleo de herramientas matemáticas como auxiliares para reducir la incertidumbre asociada en la toma de decisiones^{9,10}.

El objetivo en este trabajo es caracterizar y optimizar el flujo de pacientes dentro de un centro de vacunación, para los casos

donde debe tomarse en cuenta que existe una capacidad finita en las colas frente a las estaciones. Se propone un enfoque de análisis basado en simulación, diseño de experimentos y optimización matemática.

Dinámica de un centro de vacunación

La literatura muestra que las fases esenciales en un centro de vacunación son Recepción, Llenado de formatos, Entrega de formatos, Triage e instrucciones y Vacunación. Los pacientes hacen fila a la entrada del recinto, cuando es su turno ingresan a la recepción, acto seguido se toma la temperatura, en la siguiente estación el paciente llena un formato donde se registran diversos datos, al terminar, el paciente entrega su formato y recibe información o instrucciones. En la etapa Triage hay una sola fila y en su turno el equipo evalúa la condición médica del paciente. Posteriormente los pacientes son canalizados a alguna de las filas frente a las estaciones de vacunación, donde reciben la inyección. La última fase es la de observación donde los pacientes permanecen un tiempo fijo para verificar que no se presenten reacciones secundarias que ameriten una atención especializada.

En cada estación existen servidores en paralelo para atender varios pacientes a la vez, estos servidores pueden ser personas como personal médico o de enfermería, pero también, como en el caso del llenado de un formato, el servidor puede estar representado por una silla o espacio bien definido para que el paciente efectúe la operación⁵. El tiempo de atención (t_s) en cada estación es una variable aleatoria, por lo que en cada estación se formará una fila de personas a la espera de ser atendidos.

Una vez que ha sido fijada la capacidad de atención y bajo el supuesto de que no es viable incrementarla para dar salida a los pacientes que arriban a las estaciones, entonces los esfuerzos se pueden dirigir a mejorar la eficiencia en el flujo distribuyendo los lugares en las filas frente a cada etapa, este problema se conoce como Problema de Asignación de Lugares (Buffer Allocation Problem, BAP)¹¹.

Para emular esta operación considerando las restricciones de capacidad de personas, se propone tratarlo como un sistema cerrado de líneas de espera con arreglo en serie, un tamaño de fila (buffer) limitado y población finita (Figura 1).

En esta clase de sistemas, la cantidad de trabajo en proceso (WIP, Work in process) se mantiene controlada en un nivel fijado de antemano. Cada que una persona termina su proceso de transformación, abandona el sistema por la última estación e inmediatamente se envía la respectiva señal para admitir un nuevo individuo; matemáticamente, esto es equivalente a unir la última etapa del sistema con la primera estación. No se admiten entradas de individuos por ninguna

otra estación; la cantidad de individuos atendidos por unidad de tiempo (T_h) corresponde a la salida de la última estación, en este caso corresponde a la aplicación de vacunas.

La dificultad de este problema radica en que tanto TC_s como T_h son parámetros que no tienen funciones analíticas directas, por el contrario, son resultado de la interacción del $t_{s,t}$ el número de servidores, la capacidad de la fila frente a la estación (buffer) y la cantidad de entidades admitidas dentro del sistema, por mencionar algunos, además están sujetos a la aleatoriedad propia del sistema¹², por lo tanto, decidir la cantidad de pacientes que pueden permanecer formados frente a las estaciones no es trivial.

Trabajos previos

A partir de la pandemia de influenza AH1N1 se han propuesto estudios de centros de vacunación masiva: una evaluación de los sistemas de vacunación en el vehículo (Drive-Thru) vs de las clínicas donde los pacientes ingresan por su propio pie demuestra las ventajas de los primeros para alcanzar una gran cantidad de personas¹³; en general el estudio se ha centrado en el número de servidores, tiempos de servicio¹⁴, cantidad de personal y la elegibilidad de los pacientes¹⁵.

Finalmente, a partir de la liberación de las vacunas contra el COVID 19, se han propuesto plataformas que emplean simulación e inteligencia artificial para apoyar la toma de decisiones en un período de tiempo corto^{3,16}.

En todos los casos reportados se asume que, cuando la demanda supera las previsiones, entonces sólo basta incrementar la capacidad de atención de las estaciones agregando más servidores y no se considera el problema del límite en el tamaño de la fila, que, como ya se comentó, no siempre se cumple. No todas las ciudades cuentan con instalaciones de las dimensiones necesarias para implementar un sistema de vacuna en el auto, por lo que aún es común utilizar los centros donde las personas ingresan por su propio pie.

En conclusión, los estudios aplicados a sistemas de vacunación aún son dispersos, se han centrado en el sistema de vacunación en el auto y el problema del espacio para la espera o fila de pacientes aún no se ha reportado.

Tener límites en la cantidad de entidades formadas y la asignación de lugares frente a las estaciones (Buffer Allocation Problem o BAP) o etapas y el bloqueo en el flujo son problemas ampliamente estudiados en el área de manufactura: Weiss, Schwarz y Stolletz, realizan un análisis de la literatura, así como las diversas alternativas de enfocar y plantear medidas cuantitativas de desempeño¹¹.

Del estudio del BAP se han obtenido propiedades de las líneas de producción: en sistemas abiertos en serie confiables y con tiempos de servicio iguales, el valor del T_h sigue un comportamiento de un tazón invertido de acuerdo al número de estaciones y la cantidad de espacios asignados¹⁷; la asignación óptima de espacios concentra la mayoría de los lugares en las estaciones cercanas al final de la línea cuando los tiempos de servicio son iguales^{18,19}, sin embargo, cuando los tiempos de las estaciones son desiguales, la asignación óptima de espacios en líneas con tiempos desiguales es no-uniforme²⁰.

Estas son propiedades de los sistemas de líneas de espera con capacidad limitada, por lo tanto, se aplican en contextos diferentes como pueden ser los sistemas de vacunación y en general en los sistemas de salud.

El problema de los límites de espacio sí se ha tratado en el contexto de la administración de los sistemas de salud en las áreas de geriatría^{7,21}, psiquiatría y salud mental²², Urgencias^{23,24} y administración de hospitales²⁵.

La variable más común es la capacidad medida en el número de camas y las medidas de desempeño empleadas son el tiempo de permanencia^{7,21,23,25}, la probabilidad de bloqueo y el costo de operación²⁴.

Materiales y métodos

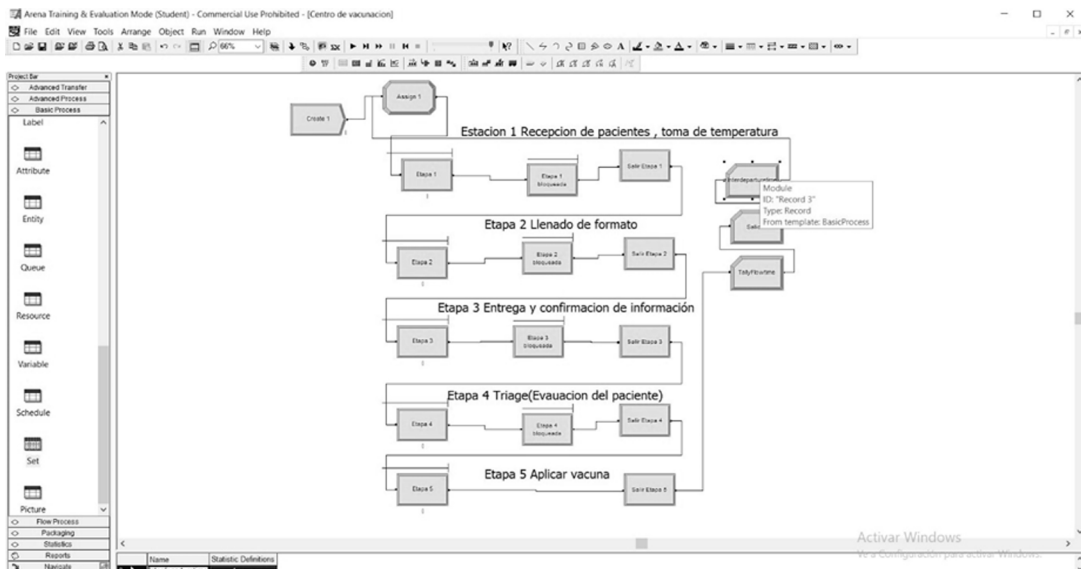
Se utilizó un enfoque de simulación de eventos discretos para estudiar un sistema de vacunación a pequeña escala y se construyó empleando el paquete ARENA. La descripción conceptual se presenta a continuación.

En cada estación, los pacientes entran al bloque Process donde son atendidos, al finalizar la atención la entidad se envía a un bloque Hold, en este se verifica si existe espacio en la fila del siguiente bloque Process, si no hay al menos un lugar disponible el paciente permanece en la estación y no se puede iniciar el proceso de atención del siguiente paciente, una vez que se libera al menos un lugar entonces la entidad pasa al siguiente bloque Release donde se le da la señal para seguir al siguiente proceso; este protocolo se conoce como bloqueo – después – de – servicio^{26,27,28}. Este modelo es una adaptación del sistema cerrado propuesto por Altiok²⁷.

Las estaciones Recepción, Llenado de formato, Entrega y Triage siguen el mismo protocolo; la estación Vacunación es la última y no se bloquea, la estación de Recepción siempre tendrá pacientes formados (Figura 1).

Se asume que el número de pacientes permitidos dentro del sistema es constante, por lo tanto, la última estación se conecta nuevamente con la entrada, lo que equivale a que se

Figura 1. Vista del modelo en ARENA 27



Fuente: Elaboración propia

envía la señal para permitir el acceso a un nuevo paciente. A la entrada del sistema se registra la hora de acceso de cada paciente, a la salida de la estación de vacunación se registra el tiempo de ciclo y el tiempo entre salidas de los pacientes y se contabiliza la cantidad de pacientes vacunados.

En la Recepción siempre existirán pacientes formados y el tamaño de la población es finito y se asume que esta fila se encuentra fuera de las instalaciones por lo que el tiempo formado en esta etapa será un valor constante, por lo tanto, TC_s considera únicamente el resto de las estaciones²⁹.

Se asume que el tiempo de atención en cada estación es aleatorio y sigue una distribución de probabilidad exponencial; dado que este trabajo se centra en la sección donde los tiempos de servicio son aleatorios, la fase de Observación no se considera porque el tiempo es el mismo para todos los pacientes. El número de servidores en cada una de las estaciones se fijó con base en la capacidad deseada en el área de vacunación, para este ejemplo, se fija en 120 pacientes por hora lo que implica tener 5 servidores en paralelo donde se aplican las vacunas (Tabla 1). El resto de las etapas queda como sigue: 4 servidores en la recepción, 12 servidores para la sección de llenado de formatos, 12 servidores para la sección de registro de datos y 6 servidores para el Triage, con lo que se obtiene un sistema con la misma capacidad en todas las estaciones.

En sistemas cerrados, el valor de Th alcanza un máximo cuando el número de espacios disponibles es igual al número de entidades permitidas dentro del sistema³⁰; por otra parte,

en este caso se asumirá arbitrariamente que la cantidad de pacientes en cada fila está restringido a un máximo de 26 pacientes, por lo tanto, el número de pacientes en total es $26 \times 4 \text{ filas} + 39 \text{ servidores} = 143 \text{ personas}$ en el sistema.

Las medidas de desempeño propuestas son el TC_s (minutos) dentro del sistema, y Th (personas vacunadas por minuto). Se utilizó un diseño experimental Box-Behnken para obtener una expresión aproximada (metamodelo) de ambas medidas de desempeño, la variable es el número de espacios disponibles frente a cada estación; el diseño experimental genera el siguiente modelo cuadrático:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \xi \quad (1)$$

Cada factor cuenta con dos niveles, cada combinación cuenta con una sola réplica, además se generó un punto central con 5 réplicas. El nivel mínimo equivale a que en la operación no se admite la formación de fila frente a la estación y sólo pueden permanecer las personas que están siendo atendidas; por otra parte, en el nivel máximo de cada variable se admiten hasta 26 personas formadas.

En las pruebas del modelo se observó que el sistema alcanza un estado estable después de 1 hora de operación; para cada combinación del diseño el modelo de simulación se ejecuta durante 5760 minutos (96 horas) descartando los primeros 150 minutos (2.5 horas). El análisis de los resultados se realizó empleando el paquete Design Expert 12.



Tabla 1. Capacidad de las estaciones y niveles del diseño experimental

Estación	Notación	Unidades	Tiempo de servicio	Servidores	Capacidad mínima en la fila	Capacidad máxima en la fila
Recepción		pacientes	2 minutos	4 servidores	Sin límites	
Llenado de formato	(χ_1)		6 minutos	12 servidores	0	26
Entrega y registro	(χ_2)		6 minutos	12 servidores	0	26
Triaje	(χ_3)		3 minutos	6 servidores	0	26
Vacunación	(χ_4)		2.5 minutos	5 servidores	0	26

Fuente: Elaboración propia

Resultados

Se obtuvo un modelo significativo de TC_s , con un coeficiente de determinación es 0.939, es decir, explica el 93.9 % de la variabilidad; por otra parte, el estadístico falta -de -ajuste no es significativo, lo que indica que la curvatura dentro de la región está bien ajustada por el modelo cuadrático. Las variables x_1, x_2, x_3, x_4 , la interacción y el término cuadrático tienen un efecto significativo. El modelo (2) permite calcular el tiempo de ciclo en minutos:

$$TC_s = 25.04 + 0.655x_1 + 0.378x_2 + 0.237x_3 - 0.576x_4 - 0.01398x_3x_4 + 0.0189x_4^2 \quad (2)$$

Cada coeficiente de la expresión es la razón de cambio en el valor de TC_s , donde a_i está dado en a_{ij} está dado en a_{ii}^2 en ; por otra parte, el signo positivo del término cuadrático es indicativo de que la curvatura en la región cuenta con un mínimo.

Se obtuvo un modelo significativo de Th con un coeficiente de determinación es 0.9845, es decir, explica el 98.45 % de la variabilidad. En este caso todas las variables de orden 1 son significativas, así como las interacciones x_1x_3, x_1x_4, x_2x_4 y x_3x_4 . También son significativos los términos cuadráticos, lo que indica que en la región hay curvatura. El estadístico falta -de -Ajuste no es significativo, indicando que el modelo predice de forma adecuada el valor de Th en la región.

El modelo de Th en piezas por hora es el siguiente:

$$Th = 60 \times (1.575 + 0.00648x_1 + 0.00558x_2 + 0.00611x_3 + 0.00907x_4 + 0.000118x_1x_3 + 0.0001127x_1x_4 + 0.000107x_2x_4 + 0.000073x_3x_4 - 0.000243x_1^2 - 0.000169x_2^2 - 0.00021x_3^2 - 0.000342x_4^2) \quad (3)$$

El signo negativo de los términos cuadráticos es indicativo de que la región es cóncava hacia abajo y por lo tanto existe un máximo. Cada coeficiente de la expresión es la razón de cambio en el valor de Th , donde a_i está en a_{ij} está dado en , finalmente el término a_{ii}^2 está dado en

$\frac{\text{pacientes}}{(\text{minuto} \times (\text{paciente}_i \times \text{paciente}_j))}$, finalmente el término a_{ii}^2 está dado en $\frac{\text{pacientes}}{(\text{minuto} \times (\text{paciente}_i)^2)}$.

No se considera una reducción en el número de variables en ninguno de los modelos ya que, en ambos casos, cada variable

representa un espacio físico y la eliminación no tendría una interpretación en un sistema de vacunación real.

Distribución de espacios

Los resultados muestran que, si se desea minimizar el tiempo de permanencia dentro de las instalaciones, entonces el acomodo más conveniente es (0,0,13,13), con un tiempo de 23.837 minutos y un valor de Th igual a 1.687pacientes por minuto, o $1.687 \times 60 \times 12$ horas de operación ≈ 1214.64 pacientes. En este caso, los espacios disponibles se asignan en su mayoría a las dos últimas etapas, el flujo de pacientes se agiliza en las primeras dos estaciones (no deben esperar) y los lugares disponibles se reservan a las últimas dos fases. Por ejemplo, si se desea vacunar una población de 50,000 personas en 5 días, entonces serán necesarios (redondeando al entero superior) 9 centros de vacunación.

En cambio, si el criterio es maximizar la cantidad de pacientes vacunados, entonces el mejor acomodo es (26,13,26,13), con 1.8684 pacientes por minuto o 1345.24 pacientes en una jornada de 12 horas, el tiempo de permanencia será de 41.274 minutos. En este caso, el acomodo asegura que la estación de entrega de formatos y la estación de vacunación siempre se mantendrán ocupadas (tienen menos lugares). Finalmente, para inocular una población de 50,000 personas en 5 días serán necesarios 8 centros de vacunación.

Se observa también que maximizar la salida de pacientes no equivale a minimizar el tiempo de permanencia, por lo tanto, se debe seleccionar el mejor criterio de acuerdo con las circunstancias específicas.

Optimización de las filas

Si no es viable incrementar la capacidad de atención agregando más servidores, entonces el flujo dentro del sistema se puede agilizar asignando un número de lugares frente a cada estación; a continuación, se muestra un ejemplo de esta estrategia aplicando los metamodelos desarrollados.

Modelo 1:

En esta variante del problema la asignación asegura la mayor productividad del sistema y es la más común en manufactura. El modelo es¹¹:

Maximizar

$$Th = 60 \times (1.575 + 0.00648x_1 + 0.00558x_2 + 0.00611x_3 + 0.00907x_4 + 0.000118x_1x_3 + 0.0001127x_1x_4 + 0.000107x_2x_4 + 0.000073x_3x_4 - 0.000243x_1^2 - 0.000169x_2^2 - 0.00021x_3^2 - 0.000342x_4^2) \tag{4}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = B \tag{5}$$

$$0 \leq x_i \leq 26 \text{ y enteros} \tag{6}$$

Donde (4) es la cantidad de pacientes atendidos (convertido a pacientes por hora) en función de la cantidad de espacios disponibles, (5) es la cantidad total de personas que pueden permanecer formadas y (6) es el intervalo de lugares para cada estación.

Modelo 2

En este caso la asignación reduce el tiempo de permanencia dentro del sistema, el modelo es¹¹:

Minimizar

$$TC_s = 25.041 + 0.655x_1 + 0.378x_2 + 0.237x_3 - 0.576x_4 - 0.01398x_3x_4 + 0.0189x_4^2 \tag{7}$$

Sujeta a:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = B \tag{8}$$

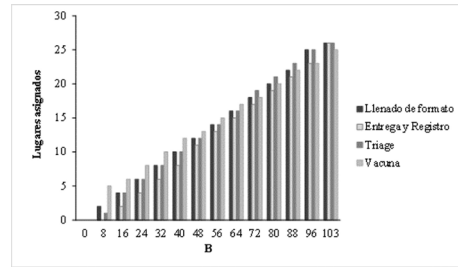
$$0 \leq x_i \leq 26 \text{ y enteros} \tag{9}$$

Donde (7) es el tiempo de ciclo en función de la cantidad de espacios disponibles, (8) es la cantidad total de personas que pueden permanecer formadas y (9) es el intervalo de lugares para cada estación. En ambos modelos de optimización, la constante B es el número total de espacios disponibles en las filas que los responsables deben fijar de antemano y que dependerá de las condiciones específicas o particulares del recinto.

Ambos modelos de optimización son del tipo Entero No lineal, y para resolverlos se empleó el paquete LINGO 13. Los modelos se resolvieron por separado para el intervalo $B = [0, 103]$, con incrementos de 8 unidades. En ambos casos el tiempo de ejecución para obtener la respuesta es razonable por lo que el empleo de una técnica de búsqueda metaheurística no está justificado.

En la figura 2 se muestran resultados del análisis paramétrico del Modelo 1 para cada escenario de B, se puede observar que, a medida que se incrementa el número total de espacios para formarse, el número de pacientes atendidos (Th) se incrementa, sin embargo, la mejora en Th es cada vez menor.

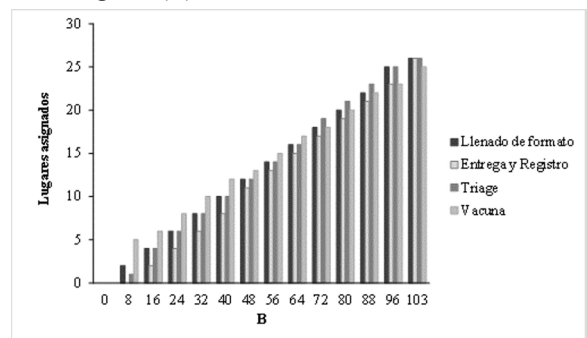
Figura 2. Th óptimo vs total de lugares (B)



Fuente: Elaboración propia

La figura 3 ilustra la asignación óptima de los lugares en las filas con el Modelo 1 y para cada escenario de B; se puede observar que las asignaciones no son uniformes: En el intervalo la distribución tiene como característica que las estaciones Entrega y Registro y Vacunación, tienen lugares suficientes para recibir pacientes en la fila provenientes del Llenado de Formato y Triage respectivamente; para las estaciones Llenado de Formato y Triage acumulan la mayor cantidad de lugares, esto asegura que las estaciones Entrega y Registro y Vacunación siempre tendrán pacientes, reduciendo la posibilidad de quedar vacías u ociosas. Finalmente, para el acomodo favorece la entrada de pacientes ocupando todos los espacios disponibles, asegurando que la estación de Vacunación (la última) siempre tendrá pacientes para atender reduciendo la probabilidad de que se encuentre ociosa o vacía (En manufactura se emplea la palabra “starving” en inglés).

Figura 3. Distribución de espacios en las filas para Th vs Total de lugares (B)



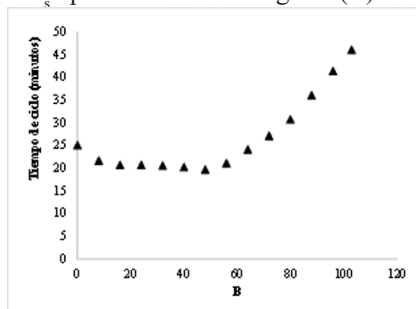
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se muestra el TC_s óptimo vs B, se aprecia que a medida que se permiten más lugares dentro del sistema, el tiempo de permanencia disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 19.67 minutos con $B = 48$, en este punto la asignación óptima es (0,0, 25, 23): los espacios deben asignarse exclusivamente a las estaciones Triage y de Vacunación; substituyendo esta solución en la ecuación (3)



se obtiene un valor $Th = 100.83$ pacientes /hora,

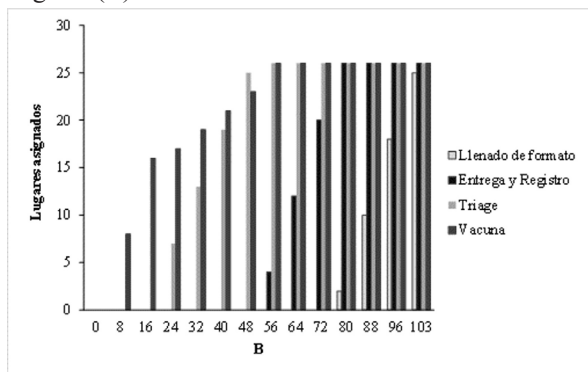
Figura 4. TC_s óptimo vs total de lugares (B)



Fuente: Elaboración propia

La figura 5 muestra el acomodo óptimo de los espacios en las filas utilizando el Modelo 2: para $B = 0, 8$ y 16 sólo la estación Vacunación tiene lugares para la espera, en consecuencia, TC_s únicamente reflejará el tiempo de servicio en cada estación más el tiempo de ésta fila; para $B = 24, 32$ y 40 el modelo comienza a distribuir los lugares al Triage, ahora TC_s reflejará el tiempo de espera en esta estación. Para $B \geq 48$ el modelo de optimización va “llenando” los lugares disponibles en cada estación.

Figura 5. Distribución de lugares para TC mínimo vs Total de lugares (B)



Fuente: Elaboración propia

Discusión

De los resultados del diseño experimental se desprende que la fila a la entrada es la de mayor efecto sobre TC_s ; en cambio, la fila frente a la estación de vacunación es la de mayor efecto sobre Th .

La presencia de términos cruzados en las ecuaciones (2) y (3) indican que TC_s y Th no se explican tomando las estaciones de forma aislada, sino que hay interacción entre pares de estaciones; si bien el empleo de los términos cruzados ya se ha considerado, su interpretación y el análisis ha sido relegado a segundo término^{19,31}.

En el caso del término de la expresión de (2), cuando (Vacunación) se fija en el nivel alto y se incrementan los espacios en la estación 3, el valor de TC_s disminuye; en consecuencia, es más conveniente permitir que se forme una fila en la estación 4 (la última). El término cuadrático en (2), muestra que, a medida que se agregan lugares a la estación 4, el valor de TC_s disminuye, sin embargo, la mejora entre dos valores consecutivos de B es cada vez menor hasta alcanzar un mínimo.

En el caso de la expresión 3, cuando o se fijan en el nivel alto, la salida de pacientes se incrementa a medida que se permiten más individuos en las filas de o y o respectivamente. Por otra parte, los términos cuadráticos muestran que, a medida que se asignan lugares en las estaciones 1 a 4 el valor de Th se incrementará, pero la mejora será cada vez menor hasta alcanzar un valor máximo.

Con respecto a la asignación óptima de espacios, el resultado obtenido para el Modelo 1 confirma lo reportado en el área de manufactura en que asignar la misma cantidad de espacios a todas las filas no asegura un Th máximo^{19, 20}.

Para el Modelo 2, los resultados indican que es más conveniente reservar los lugares disponibles para las estaciones cercanas al final de la línea cuando el espacio total para formarse está muy restringido; a medida que el espacio (B) se incrementa, entonces se deben permitir la formación de filas en las siguientes estaciones hacia atrás. También se encontró que existe un valor B donde el tiempo de permanencia es mínimo, aunque existen otros valores de B que en un caso real pueden considerarse.

Conclusiones

La pandemia de COVID 19 es un evento disruptivo que ha generado nuevas necesidades en la gestión de sistemas hospitalarios en general y los sistemas de vacunación en particular. La administración de los sistemas de vacunación es la siguiente etapa en los esfuerzos por mitigar los efectos de esta enfermedad.

En un centro de vacunación, la cantidad de lugares en la fila es finita, y no siempre será viable incrementar la capacidad de atención para reducir el número de pacientes formados ya que el espacio disponible para colocar más servidores (mesas, personal, equipos) no siempre será suficiente.

Cuando la demanda supera las expectativas, entonces se propone controlar el flujo de pacientes realizando una asignación de los lugares disponibles dentro del centro de vacunación, de acuerdo con las necesidades del responsable de las políticas y la gestión de esta clase de recintos, TC_s y Th son las dos medidas de desempeño más utilizadas.



En el estudio presentado, se encontró que la asignación de lugares difiere de acuerdo con la medida de desempeño empleada: Minimizar TC_s no asegura el máximo valor de Th y viceversa, la selección de un criterio depende de las necesidades específicas, sin embargo, los modelos aseguran una asignación eficiente de los lugares y proporcionan un soporte cuantitativo para el análisis de escenarios y la toma de decisiones.

Las consideraciones de este trabajo están limitadas a las condiciones descritas para el diseño experimental, pero tienen la intención explicar el comportamiento del flujo de pacientes y se propone además un método para los responsables de planificar la capacidad, diseñar y administrar esta clase de sistemas.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo del Tecnológico Nacional de México a través de la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, clave 13755.22-P

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés

Contribución de los autores

Conceptualización y diseño, S.H.G., J.A.J.G., M.D.H.R., I.D.C.M.; Metodología, S.H.G., J.A.J.G., M.D.H.R.; Adquisición de datos y Software, M.D.H.R., I.D.C.M.; Análisis e interpretación de datos, J.A.J.G., M.D.H.R.; Investigador Principal, S.H.G., Redacción del manuscrito—Preparación del borrador original, S.H.G.; Redacción revisión y edición del manuscrito, J.A.J.G., M.D.H.R., I.D.C.M.; Supervisión y Adquisición de fondos, S.H.G.

Referencias

1. Candia-Calderon AG, Olivera-Villaruel SM. Índice de vulnerabilidad del sector salud en México: La infraestructura hospitalaria ante la COVID-19. *Horizonte Sanitario*. 2021[cited 2021 04 13]; 20(2): p. 217-225. Available from: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-74592021000200218&script=sci_arttext
2. Sathish Kumar J, Zaveri M. Resource Scheduling for Postdisaster Management in IoT Environment. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019; 2019(7802843): p. 1-19. doi:10.1155/2019/7802843

3. Asgary A, Zarko Valtchev S, Chen M, Najafabadi MM, Wu J. Artificial Intelligence Model of Drive-Through Vaccination Simulation. *Environmental Research and Public Health*. 2021; 18: p. 1-10. doi: 10.3390/ijerph18010268

4. Peng Q, Yang J, Strome T, Weldon E, Chochinov A. Bottleneck Detection and Reduction Using Simulation Modeling to Reduce Overcrowding of Hospital Emergency Department. *Journal of Modeling and Optimization*. 2020; 12(2): p. 100-109. doi:10.32732/jmo.2020.12.2.100

5. Bourgeois N, Franke C, O'Connor S, Shaw H, Hum S, Dunn S. Preparing for an influenza pandemic: model of an immunization clinic in an urban family practice. *Canadian Family Physician Medecin de Famille Canadien*. 2011; 57(10): p. 367-372. Available from: <https://www.cfp.ca/content/cfp/57/10/e367.full.pdf>

6. Moscoso NS, Pisani MV. Internaciones inadecuadas: su impacto en la eficiencia del uso de la cama hospitalaria. *Revista de Ciencias Sociales*. 2017[cited 2021 04 13]; XXIII(3): p. 39-47. Available from: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/280/28056735004/html/index.html>

7. El-Darzi E, Vasilakis C, Chausalet T, Millard PH. A simulation modelling approach to evaluating length of stay occupancy, emptiness and bed blocking in a hospital geriatric department. *Health Care Management Science*. 1998; 1(143): p. 143-149. doi:10.1023/A:1019054921219

8. Gómez P, Rivera J. Un problema social: tiempos de espera en la consulta externa del Hospital Carlos Andrade Marín. *Estudios de la Gestión. Revista Internacional de Administración*. 2019[cited 2021 04 13]; 2019(5): p. 121-145. Available from: <https://revistas.uasb.edu.ec/index.php/eg/article/view/1198>

9. Vejar-Aguirre T, Jáuregui-Ulloa E, Gallo-Sánchez K, Zavala-Hernández R, Arredondo-López AA. Evidencias y tendencias para tomar decisiones sobre medidas de contención y mitigamiento de la COVID-19 en Jalisco, México. *Horizonte Sanitario*. 2020[cited 2021 04 13]; 19(3). Available from: <https://revistas.ujat.mx/index.php/horizonte/article/view/3832>

10. Uribe Gómez JA, Barrientos Gómez JG. Modelo de simulación sistémica para el dimensionamiento de camas hospitalarias en una institución de salud de alta complejidad utilizando la metodología de dinámica de sistemas. *Revista Gerencia y Políticas de Salud*. 2020[cited 2021 04 13]; 19(2020): p. 1-20. Available from: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/gerepolsal/article/view/29393>

11. Weiss S, Schwarz JA, Stoltetz R. The Buffer Allocation Problem in production lines: Formulations, solution methods, and instances. *IIE Transactions*. 2019; 51(5): p. 456-485. doi:10.1080/24725854.2018.1442031
12. MacGregor Smith J, Cruz FRB. The buffer allocation problem for general finite buffer queueing networks. *IIE transactions*. 2005; 37(4): p. 343-365. doi:10.1080/07408170590916986
13. Reid DE. What Are the Efficiencies of a Mass Vaccination Drive-Through Clinic Compared to a Walk-In Clinic? [Online].; 2010 [cited 2021 04 13]. Available from: Homeland Security Digital Library (hsdl.org)
14. Gupta A, Evans GW, Heragu SS. Simulation and Optimization Modeling for Drive-Through Mass Vaccination – A Generalized Approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2013; 37(9): p. 99-106. doi:10.1016/j.simpat.2013.06.004
15. Beeler MF, Aleman DM, Carter M. A simulation study of mass immunization clinics to control pandemic influenza. In Mustafee N. *Operational Research for Emergency Planning in Healthcare: Volume 1*. London: The OR Essentials series. Palgrave Macmillan; 2014. p. 190-223. doi:10.1057/9781137535696_9
16. Asgary A, Najafabadi M, Karsseboom R, Wu J. A Drive-through Simulation Tool for Mass Vaccination during COVID-19 Pandemic. *Healthcare*. 2020; 8(469): p. 1-21. Doi:10.3390/healthcare8040469
17. Papadopoulos HT, Vidalis MI. Minimizing WIP inventory in reliable production lines. *International Journal of Production Economics*. 2001; 70(2): p. 185-197. doi:10.1016/S0925-5273(00)00056-6
18. Kose SY, Kilincci O. Hybrid approach for buffer allocation in open serial production lines. *Computers and Operations Research*. 2015; 60(August): p. 67-78. doi:10.1016/j.cor.2015.01.009
19. Hernández-Vázquez JO, Hernández-González S, Jiménez-García JA, Hernández-Ripalda MD, Hernández-Vázquez JI. Enfoque híbrido metaheurístico AG-RS para el problema de asignación del buffer que minimiza el inventario en proceso en Líneas de producción abiertas en serie. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2019; 2019(16): p. 447-458. doi:10.4995/riai.2017.10883
20. Shaaban S, McNamara T, Dmitriev V. Asymmetrical buffer allocation in unpaced merging assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*. 2017; 109(2017): p. 211-220. doi:10.1016/j.cie.2017.05.008
21. Zychlinski N, Mandelbaum A, P, Cohen I. Bed Blocking in Hospitals due to Scarce Capacity in Geriatric Institutions - Costs Minimization via Fluid Models. *Manufacturing & Service operations Management*. 2019; 22(2): p. 396-411. doi:10.1287/msom.2018.0745
22. Koizumi N, Kuno E, Smith T. Modeling Patient Flows Using a Queueing Network with Blocking. *Health Care Management Science*. 2005; 8(1): p. 49-60. doi.org/10.1007/s10729-005-5216-3
23. Lin D, Patrick J, Labeau F. Estimating the waiting time of multi-priority emergency patients with downstream blocking. *Health Care Management Science*. 2014; 17(1): p. 88-99. doi:10.1007/s10729-013-9241-3
24. Xiaodan W, Rongrong W, Li J, Khasawneh MT. A simulation study of bed allocation to reduce blocking probability in emergency departments: A case study in China. *Journal of the Operational Research Society*. 2018;: p. 1-16. doi:10.1080/01605682.2018.1506430
25. Shi P, Chou MC, Dai JG, Ding D, Sim S. Models and Insights for Hospital Inpatient Operations: Time-Dependent ED Boarding Time. *Management Science*. 2016; 62(1): p. 1-28. doi:10.1287/mnsc.2014.2112
26. Balsamo S, Nitto-Persone V, Onvural R. *Analysis of Queueing Networks with Blocking Berlin*: Springer; 2000. doi:10.1007/978-1-4757-3345-7
27. Altiock T. *Simulation Modeling and Analysis with Arena San Diego*: Academic Press; 2007.
28. Wood RM, Murch BJ. Modelling capacity along a patient pathway with delays to transfer and discharge. *Journal of the Operational Research Society*. 2019; 71(10): p. 1530-1544. doi: 10.1080/01605682.2019.1609885
29. Hopp WJ, Spearman ML. *Factory Physics Long Grove, Illinois*: Waveland Pres; 2011.
30. Lagershausen S. *Performance Analysis of Closed Queueing Networks Berlin*: Springer; 2013. doi: 10.1007/978-3-642-32214-3
31. Amiri M, Mohtashami A. Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume. 2012; 62(1-4): p. 371-383. doi.org/10.1007/s00170-011-3802-8