

# SIMULACIÓN DE INGRESOS Y EGRESOS DE EMPLEADOS EN UNA FÁBRICA

Romera Nahuel; Caminos Andrés

*Facultad de Ingeniería, Universidad Argentina de la Empresa (UADE)*  
*nromera@uade.edu.ar*  
*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Cruz*  
*andrescaminos@frsc.utm.edu.ar*

## RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto analizar, mediante un modelo de simulación híbrido (Eventos Discretos y Modelos Basados en Agentes), la dinámica del comportamiento peatonal de los empleados de una importante fábrica del conurbano de la provincia de Buenos Aires, Argentina, a fin de evaluar los indicadores de interés (KPIs) tales como el tiempo promedio de espera y las longitudes promedio de las diferentes filas de espera, así como la distribución interna a los diferentes sectores de la fábrica. El modelo de simulación permite realizar ensayos de diferentes alternativas de apertura de accesos, cantidad de personal de seguridad para control de ingreso y egreso de los empleados y visitantes externos evaluando el rendimiento de cada alternativa. Debido a la numerosa cantidad de empleados que tiene la fábrica, el modelo de simulación permite, además, ensayar diferentes horarios de acceso en los distintos turnos de trabajo. Mediante el uso de las librerías verticales del software de simulación Anylogic se logró determinar la cantidad de accesos y personal de seguridad adecuados que permitieran lograr tiempos de acceso y filas de espera acordes contemplando el uso del personal de seguridad apostado en cada acceso. Al habilitar nuevos accesos para ingreso y control, en dependencia de las dimensiones (cantidad de molinetes posibles por espacio disponible), fue necesario simular diferentes escenarios considerando un análisis previo de la demanda de usuarios en diferentes horarios pico para ingreso y egreso a la fábrica. La coincidencia de ingresos y egresos también resultó clave a la hora de evaluar los cuellos de botella de los molinetes. El modelo fue validado contra la situación actual de ingreso y egreso y posteriormente utilizado para mejorar la situación con nuevas estrategias de accesos, horarios y personal de seguridad para soporte y control de empleados. La combinación de herramientas de análisis estadístico y el simulador permitieron evaluar la saturación del sistema y las demoras de acceso.

**Palabras Claves:** Simulación, Anylogic, Mejora de Procesos, Control de Accesos, Cuellos de Botella

## ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze, through a hybrid simulation model (Discrete Events and Agent-Based Models), the dynamics of the pedestrian behavior of the employees of an important suburban factory located in Buenos Aires Province, Argentina, in order to evaluate the indicators of interest (KPIs) such as the average waiting time and the average lengths of the different waiting lines, as well the internal distribution to the different sectors of the factory. The simulation model allows tests of different access opening alternatives, the number of security personnel to control the entry and exit of employees and external visitors, evaluating the performance of each alternative. Due to the large number of employees in the factory, the simulation model also allows testing different access times in the different work shifts. By using the vertical libraries of the Anylogic simulation software, it was possible to determine the number of accesses and adequate security personnel that would allow achieving access times and waiting lines according to what was desired, significantly reducing the cost of security personnel. By enabling new accesses for entry and control, depending on the dimensions (number of possible turnstiles per available space), it was necessary to simulate different scenarios considering a prior analysis of user demand at different peak times for entry and exit to the factory. The coincidence of income and expenses was also key when evaluating the bottlenecks of the turnstiles. The model was validated against the current entry and exit situation and later used to improve the situation with new access strategies, schedules, and security personnel to support and control employees. The combination of statistical analysis tools and the simulator allowed to evaluate the saturation of the system and the access delays.

**Keywords:** Simulation, Anylogic, Process Improvement, Access Control, Bottlenecks

## 1. Introducción

Los molinetes o torniquetes de ingreso o egreso son mecanismos de seguridad que regulan el acceso peatonal de individuos para poder controlar el paso o restricción del mismo a un área específica, ya sea mediante el uso de una tarjeta, la lectura de un código de barras o el uso de una credencial. Existen soluciones más sofisticadas consistentes, por ejemplo, en conteo por cámaras para alto volumen de tránsito o cámaras con identificación de personas, lectores de huellas digitales o de registros biométricos que suelen utilizarse en algunos organismos públicos, de seguridad o de accesos muy restringidos. También existen dispositivos de libre acceso dependiendo de cuál sea la modalidad y el lugar donde va a ser utilizado, ejemplo, eventos deportivos, transporte público, gimnasios, colegios, universidades, etc., algunos de ellos validan contra un ticket o una tarjeta de pago para facilitar el acceso otros en cambio pueden utilizar un código QR mostrando un celular por proximidad.

Los molinetes o torniquetes de acceso peatonal son ideales para ser usados en los espacios donde se desea controlar el paso y en algunos casos tener conocimiento de quienes ingresan a algún lugar específico. Entre los lugares que podemos mencionar donde son necesarios y de gran utilidad, tenemos: los institutos de enseñanza (escuelas, universidades), organismos públicos, museos, parques temáticos, empresas, industrias, fábricas y construcciones, entre muchos otros; que dependiendo de la seguridad que necesitan tener y el presupuesto que van a invertir en estos mecanismos escogerán el que se ajuste de mejor manera a sus requerimientos.

De acuerdo con la cantidad de personas que hagan uso del dispositivo se usarán distintos sistemas de seguridad que regulen el acceso; los más recomendados para empresas e instituciones de enseñanza, con acceso regular de los mismos empleados y los mismos estudiantes son: tarjetas de tecnología, teléfono celular y el uso de pantallas utilizando un software adecuado donde se puedan visualizar los datos de las personas registradas. Si el sistema detecta algo irregular como un acceso indebido, por ejemplo, lo hará saber por medio de alarmas visuales y/o de sonido. Existen muchas empresas nacionales e internacionales que proveen diferentes mecanismos de control y muchas de ellas o todas también suministran software para control de accesos como una solución integral.

Analizamos autores como Cosentino [6], Ortiz [10], Vargas [14], Bravo Pareja [3], Teco [13] y Cabrera Rojo [4], quienes nos explican la implementación de control de accesos a distintas empresas tanto productoras como de servicios asistenciales y públicos y analizamos sus dificultades para incorporar a nuestro modelo de simulación. El trabajo de Vargas [14] resume el diseño conceptual de un proceso similar al analizado en este trabajo.

En este trabajo desarrollamos y aplicamos la metodología de teoría de colas o líneas de espera según los conceptos de evaluación presentados por Shortle [12] combinados con simulación híbrida que utiliza eventos discretos para pronosticar tiempos de arribos de cada individuo a un modelo de simulación, su tiempo de espera en cola, su tiempo de atención y con la utilización de sistemas basados en agentes, cada individuo de manera genérica (varón, mujer) es identificado y validado contra un sistema de control que permite el acceso o lo rechaza según exista o no algún criterio de restricción de acceso.

## 2. Descripción del problema a resolver

En esta ocasión, una empresa del rubro autopartes del conurbano de la provincia de Buenos Aires, que cuenta con una gran dotación de personal y varios turnos de trabajo, sumados a entradas recurrentes de personal, visitantes, clientes y proveedores, nos contacta con la finalidad de poder realizar un modelo de simulación que le permita optimizar la cantidad de puestos de accesos necesarios que debe habilitar para reducir el tiempo de acceso a la empresa.

La misma unidad de control (molinete o torniquete) también es utilizada para el egreso de la empresa, esto es, cuando una persona se retira de la empresa, se valida contra un sistema informático que permite o restringe el acceso al molinete. En el mismo instante también puede existir un grupo de personas que intentan ingresar producto de cambios de turno, visitantes, proveedores, etc. Los molinetes permiten el paso de las personas ante lectura de un código QR presente en los celulares de los empleados, por otra parte, los clientes, proveedores, invitados y otros casos, no poseen código QR y acceden con autorización del personal de seguridad previa verificación de identidades y autorización de ingresos mediante lectura de código de barras o un código QR impreso en una tarjeta de visitante.

La empresa nos pide analizar cuantos lugares de accesos que incluyen varios molinetes son requeridos para cumplir con dos objetivos a saber: minimizar los tiempos de espera en cola para acceder a los molinetes y minimizar la cantidad de empleados de seguridad a utilizar. Mientras se habilite una mayor cantidad de accesos se tendrán menores tiempos de acceso, pero implica una mayor cantidad de personal de seguridad para control. Por otra parte, mientras mayor cantidad de personal de seguridad haya por cada lugar de acceso, menor será el tiempo de espera para acceder a los molinetes debido a que se producen inconvenientes varios a la hora de pasar por los molinetes. Puede observarse entonces que son objetivos contrapuestos.

La empresa actualmente cuenta con una planta industrial que tiene cuatro puntos de acceso (ingreso y egreso) del personal y visitantes y está en construcción una ampliación de la misma que le permitiría aumentar hasta ocho (8) lugares de accesos para ingreso y egreso de personas. En principio, se nos ha pedido analizar la situación actual, consistente en cuatro accesos separados denominados acceso 1, acceso 2, acceso 3 y acceso 4 donde los accesos 1 y 3 cuentan con una línea de 11 molinetes cada uno, mientras que el acceso 4 cuenta con una línea de 7 molinetes (por restricción de espacio). Por otra parte, el acceso 2 no cuenta con líneas de molinetes propios, sino que, es una puerta de acceso que permite derivar a las personas al acceso 1 y/o al acceso 3 que se encuentran en cercanía. Al momento de realizar este trabajo la fábrica solamente utiliza 2 de los 4 disponibles (Acceso 1 y 4) con 2 personas de seguridad por cada acceso. Por lo tanto, se realiza la simulación del escenario base con esta configuración a fin de validar y verificar el modelo de simulación.

Los registros globales de los accesos (ingresos y egresos) indican picos de afluencia a los molinetes entre las 07:15 y las 08:50, entre las 13:30 y 14:30 y entre las 18:20 y 19:30hs. aproximadamente. Se registró una efectividad de lectura de códigos QR del 99% por lo que el 1% restante requirió asistencia del personal de seguridad que le indica al empleado que aumente el brillo de la pantalla o ponga el celular a una altura adecuada para la correcta lectura. El porcentaje aproximado de empleados que ingresa con problemas previos (sin batería en el celular, problemas al levantar la aplicación QR u otros problemas), llegada de clientes, proveedores e invitados es del 4 por mil.

Pensamos que la mejor manera de analizar este problema es mediante un modelo de simulación que emule el comportamiento de personas (a las que llamamos entidades), considerando la mayoría de los problemas que a diario ocurren en este tipo de sistemas de control de accesos y poderlo utilizar para determinar las mejores condiciones de operación del sistema, esto es optimizar la cantidad de recursos (seguridad, cantidad de accesos disponibles) que ayuden a reducir los tiempos de espera de entradas y salidas del personal. Los problemas habituales que ocurren en los accesos tienen que ver con la lectura fallida de códigos QR en los celulares de los empleados, celulares sin batería, invitados, clientes y proveedores que no cuentan con la tecnología QR y que deben ser registrados por personal de seguridad a fin de otorgarles credencial con código de barra y QR incluido en la misma.

### 3. Metodología de solución

Aplicando herramientas de la ingeniería industrial e informática, dinámica de sistemas (Barceló [2]), Ortiz Moctezuma [9]) decidimos desarrollar un modelo de simulación de **Eventos Discretos** basados en **Modelos de Procesos y Basado en Agentes**.

**Eventos Discretos** porque los procesos de entradas y salidas de personas no ocurren de manera instantánea sino que se presentan en momentos de tiempo discreto y respondiendo a algún modelo probabilístico que determine su frecuencia de arribo (en este caso, las lecturas se toman del histórico registrado en las bases de datos del cliente); basados en **Modelos de Procesos** porque las entidades consumen recursos (asistencia del personal de seguridad), consumen actividades (paso por molinetes) y realizan ruteos (según el tipo de entidad se dirige hacia algún lugar particular de la fábrica, esto es condicionante para elegir el acceso a la hora del egreso); y **Basado en Agentes** porque cada persona que ingresa o egresa del sistema simulado se le asignan propiedades y métodos como así también comportamientos individuales a través de transiciones y estados que permiten realizar un seguimiento individual desde el tiempo que consideramos que “llega” o ingresa al sistema de control hasta que se “retira” o egresa del mismo.

Para analizar un modelo de simulación se necesitan datos que permitan definir algunas propiedades del sistema tales como las llegadas a los accesos, tiempos de permanencia en el edificio fabril, redireccionamiento del personal a cada área dentro del edificio para tener en cuenta las salidas de las distintas áreas y el tiempo estimado de “utilización” del servicio, esto es, cuanto tiempo ocupará su

pasaje a través del mecanismo de control. Este último tiempo se conoce como Tiempo Esperado de Servicio (TEP) y su inverso, la Tasa Promedio de Servicio (TPS).

La realidad nos indica que en una simulación que trabaja con parámetros de tiempos, nada es constante, por lo tanto, necesitamos definir los rangos de variación de estas variables y cómo se distribuyen dentro de los rangos, es decir, que modelo de probabilidades puede representar con una precisión relativamente importante el comportamiento de estas variables. De la misma manera que conocemos que el mundo no se comporta de manera “normal”, la distribución normal de probabilidades no resulta la más adecuada para representar estos comportamientos.

Decidimos analizar información muestral según procedimientos definidos en Canavos [5] y Martínez Bencardino [8], revisando del sistema informático el registro de cada una de las transacciones donde se detalla el tiempo de uso del QR a través del molinete entre ingreso y egreso y de esta manera estimar para cada persona el tiempo de uso del sistema. Analizamos miles de registros de los últimos tres meses y utilizando técnicas estadísticas de procesos de bondad de ajustes incluidas en el software Crystalball de Oracle [7], pudimos definir los tiempos de uso del sistema comprendidos desde que se activa la lectura del código QR hasta que se hace la apertura del molinete.

Respecto a la Tasa Promedio de Servicio (TPS), el proceso de bondad de ajuste del paso por molinete nos sugiere una distribución probabilística exponencial con un parámetro  $\mu$  de 0.666667 personas/segundo equivalente a un Tiempo Esperado Entre Servicios (TES) con un parámetro  $\lambda$  de 1.5 segundos por persona, siendo  $\lambda = 1/\mu$ . En la figura 1 se puede observar un ensayo de 10.000 simulaciones con la distribución exponencial con parámetro  $\mu$  de 0.666667. Se observa con una certeza del 62.61% que las ocurrencias se dan antes del tiempo medio de 1.5 segundos (porción de la curva representada en color azul). En el eje x se muestra el tiempo en segundos mientras que en el eje y (izquierdo) se muestra la probabilidad de ocurrencia de cada frecuencia y en el eje y (derecho) se muestra la frecuencia absoluta de las 10.000 muestras.

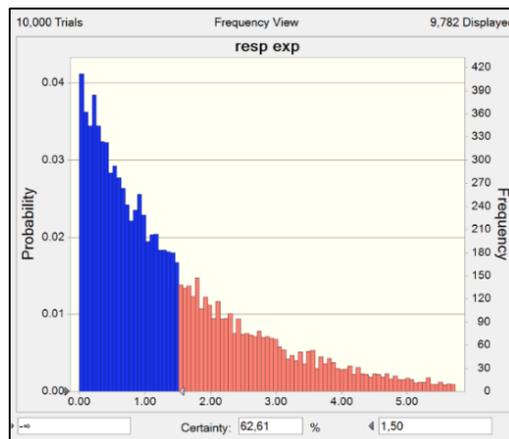


Figura 1 Distribuciones de Probabilidad. Fuente: Propia

La figura 2 representa un molinete de control típico de acceso a través de la cual una persona ingresa o egresa del sistema de control y se registra aparte de su horario de ingreso y salida, la permanencia dentro de la planta. El equipo tiene lectura de QR por ambos lados para detectar ingresos y egresos.



Figura 2. Molinete de ingreso y egreso. Fuente: Búsqueda en Internet

#### 4. Construcción del modelo

Analizando diferentes herramientas de simulación que combinarán eventos discretos con sistemas dinámicos basados en agentes, decidimos utilizar el software **Anylogic** [1] en su versión PLE (Personal Learning Environment) que dentro de sus limitaciones nos ha permitido analizar y simular el problema. Identificamos las siguientes variables que usaremos en el simulador:

- **Entidades** (Empleados de la empresa, visitantes, proveedores, otros.)
- **Atributos** (operario, personal administrativo, personal de limpieza, DNI, velocidades).
- **Variables** (Horario de ingreso, tiempo de uso del molinete, tiempo de servicio del personal de seguridad).
- **Recursos** (personal de seguridad, equipos celulares para generar QR en casos especiales, molinetes)
- **Colas** (Cola de espera en cada acceso)
- **Eventos** (llegada de personas, paso por el molinete)
- **Actividades** (Paso por el molinete con duración de tiempo aleatorio, atención de personal de seguridad en caso de problemas o accesos de invitados y proveedores)

## 5. Validación del modelo

Para validar el modelo se plantea la simulación del “Escenario Base” que utiliza las llegadas establecidas en un día determinado teniendo en cuenta que solamente dispone de 2 accesos habilitados (acceso 1 con 11 molinetes y acceso 4 con 7 molinetes); que el molinete funciona correctamente el 99% de las veces y que el 4 por mil de las personas que ingresaron fueron proveedores, invitados y empleados que tuvieron algún inconveniente con su celular y no pudieron utilizar el código QR o tuvieron algún inconveniente con la lectura de tarjeta de visitante.

Se compararon las mediciones reales vs las mediciones simuladas de los tiempos promedio de permanencia en cola para usar el molinete y longitudes promedio de cola de espera encontrándose un desvío promedio del 3% para los tiempos espera y un desvío promedio del 5% para las longitudes de cola con referencia a los datos obtenidos del sistema real. La empresa considera que estos desvíos son aceptables para una simulación teniendo en cuenta que las mediciones reales carecieron de un sistema de medición preciso como puede ser el caso de una cámara de video volumétrica que mida tiempos.

En la figura 3 se muestra un ejemplo de una cámara volumétrica con software de conteo de un sistema real donde además de contar personas se puede establecer el tiempo promedio que tarda una persona en pasar entre dos líneas virtuales señaladas con los números 1 y 2. Si la empresa tuviera a disposición este tipo de tecnología, la simulación del “Escenario Base” (escenario que se utiliza de validación) sería prácticamente la misma que el caso real. En nuestro caso, el “Escenario Base” se construye con información obtenida sin cámaras volumétricas.



Figura 3. Software de conteo de personas. Fuente: Security One [11]

## 6. Experimentación con el modelo

La experimentación es una etapa primordial ya que permite explorar escenarios alternativos y evaluar sus resultados sin tener que exponerse a ensayos reales que llevarían horas de implementación, costos de servicio y molestias a los usuarios con el fin de obtener resultados empíricos. En este caso particular, además implica la ejecución de obra civil en la apertura de nuevos accesos por lo que es primordial

contar con resultados de simulación antes de decidir la incorporación de los nuevos accesos. Los principales resultados que resultan de interés para el directorio de la empresa son los siguientes:

- Densidad peatonal (nivel de saturación de los diferentes recorridos que toman las personas)
- Tiempo promedio en cola que se forman en los ingresos y egresos de los molinetes.
- Longitud promedio de las colas de espera.
- Utilización promedio de cantidad del personal de seguridad.
- Cantidad de personas que en promedio que son atendidos por personal de seguridad.

Para realizar la experimentación, primero se realiza un diseño de experimentos según procedimientos detallados en Canavos [6] ya que la multiplicidad de escenarios es muy grande debido a que se desean evaluar 4 factores con 2 niveles (los accesos), 1 factor con 3 niveles (las derivaciones del acceso 2), y 3 factores con 4 niveles (la cantidad de personal de seguridad por acceso que varía entre 2 a 5 empleados de seguridad). Esto da una combinación de 3072 escenarios posibles ( $2^4 * 3^1 * 4^3$ ).

Producto de la excesiva cantidad de combinaciones arrojadas por el diseño de experimentos factorial de múltiples niveles expresado en el párrafo anterior, se plantea al directorio de la empresa realizar un muestreo con 6 alternativas a fin de que brinde una visión del comportamiento de las métricas donde los accesos se mantienen de la misma forma (abierto / cerrado), el ruteo del acceso 2 pueda ir al acceso 1, acceso 3 o ambos accesos mencionados, y que la cantidad de personas de seguridad por molinete sea de 2 o 5. Si bien, la realización de 6 combinaciones es aceptada por la empresa, se plantea un nuevo condicionamiento atado al tiempo de procesamiento de cada escenario, es decir, debido a la complejidad del modelo de simulación, cada corrida de simulación de 1 día (1 iteración) dura 20 minutos aproximadamente proporcionando un valor para cada una de las variables de salida (KPIs) mencionadas anteriormente tal como se muestra en la figura 4.

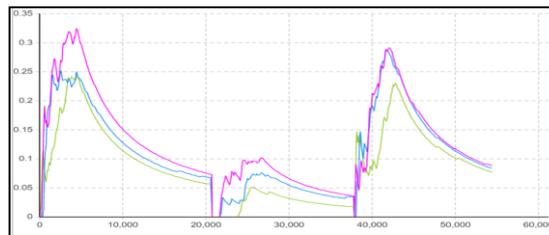


Figura 4. Ejemplo de resultado en la utilización del personal de seguridad (%) con 1 iteración. Fuente: propia

El estimador puntual del indicador de cada una de las salidas definidas es la media aritmética de los valores obtenidos en las distintas corridas de simulación, valor sobre el que se define un intervalo de confianza. En nuestro caso, para obtener un nivel de confianza del 95% requerimos realizar un mínimo de 30 iteraciones como se muestra en la figura 5.

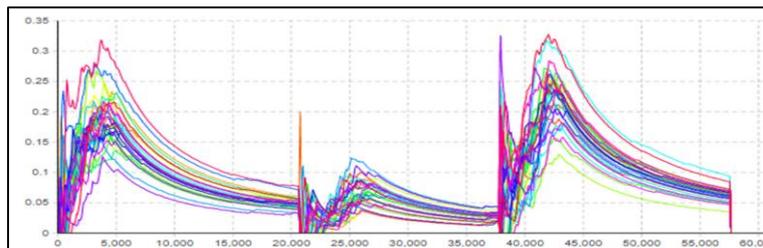


Figura 5. Ejemplo de resultado en la utilización del personal de seguridad (%) con 30 iteraciones. Fuente: propia

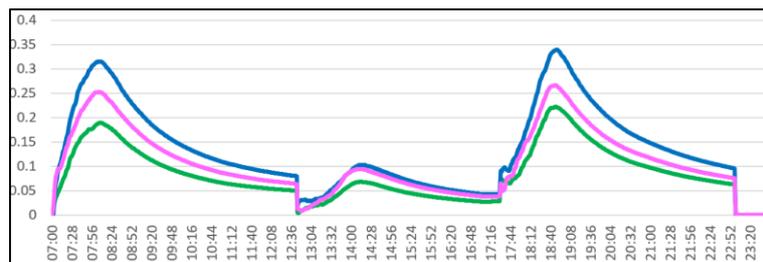


Figura 6. Ejemplo de resultado PROMEDIO en la utilización del personal de seguridad (%) con 30 iteraciones. Fuente: propia

En la figura 6 se observa el promedio de utilización del personal de seguridad de las 30 iteraciones para cada uno de los accesos. Entonces, si 1 iteración dura 20 minutos, 30 iteraciones duran 600 minutos que es el equivalente a 10 horas, lo que significa que si se corren 6 combinaciones (6 escenarios) se requiere un total de 60 horas netas de simulación más todo el tiempo de procesamiento de los resultados de cada métrica deseada. Las combinaciones de escenarios planteados fueron las siguientes, resumidas en la tabla 1.

Tabla 1. Escenarios planteados. Fuente: propia

Escenario	Acceso 1	Acceso 2	Acceso 3	Acceso 4	% Deriva	cantSegA1	cantSegA3	cantSegA4
1	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Acceso 1 y 3	5	5	5
2	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Acceso 1 y 3	2	3	4
3	Cerrado	Abierto	Cerrado	Abierto	Acceso 1 y 3	2	3	4
4	Cerrado	Abierto	Cerrado	Abierto	Acceso 3	2	0	2
5	Cerrado	Abierto	Cerrado	Abierto	Acceso 1	0	2	2
6	Cerrado	Abierto	Cerrado	Cerrado	Acceso 1 y 3	2	2	0

A continuación, en la figura 7 a 9, se muestran los resultados promedio de los diferentes indicadores respetando el código de colores de la tabla precedente, o sea, cuando se muestre una curva en color verde, esta representa al escenario 6 con su valor promedio de las 30 iteraciones. Del mismo modo con cada color (azul para el escenario 1, rojo para el 2, gris para el 3, naranja para el 4 y celeste para el 5).

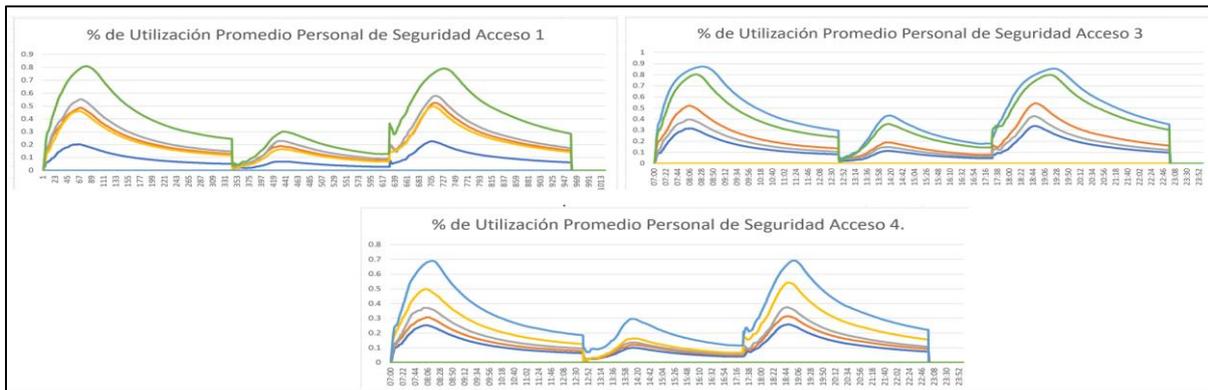


Figura 7. % de utilización promedio del personal de seguridad por acceso en cada escenario. Fuente: propia

Analizando por separado la figura 7, en el gráfico superior izquierdo observamos que la mayor utilización del personal de seguridad para los molinetes del acceso 1 se obtiene con el **escenario 6** que implica solamente abrir el acceso 2 y distribuir a las personas por el acceso 1 y acceso 3 (% Deriva) colocando además 2 personas de seguridad en cada línea de molinetes (en este caso cada acceso tiene 11 molinetes). Para el caso de los molinetes del acceso 3 (gráfico superior derecho) y molinetes del acceso 4 (gráfico inferior) la mayor utilización se obtiene con el **escenario 5** que implica abrir el acceso 4 y el acceso 2, y derivar el tráfico de este último por los molinetes del acceso 3 colocando 2 personas de seguridad en los accesos 3 y 4.

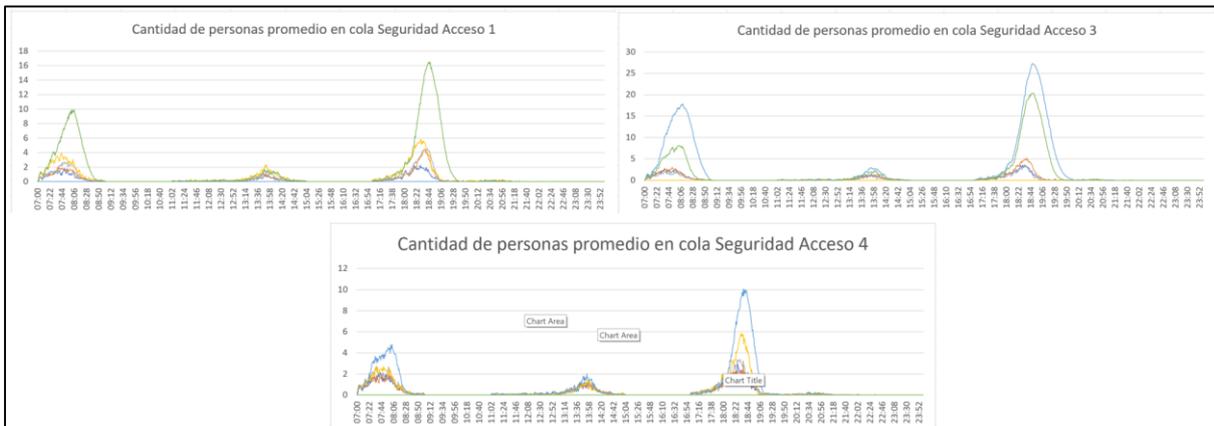


Figura 8. Cantidad de personas promedio en cola de seguridad por acceso sin QR. Fuente: propia

Analizando la figura 8 observamos que la menor cantidad de personas promedio esperando ser atendidas por personal de seguridad en los molinetes de los accesos 1; 3 y 4 se dan para los **escenarios 1 y 2** (trayectoria azul y naranja). En el primer caso con 5 personas en seguridad en cada acceso, y el segundo escenario con 2; 3 y 4 personas de seguridad respectivamente. Debido a la proximidad de resultados se opta como mejor alternativa al escenario 2 que conlleva utilizar una menor cantidad de recursos. **Nota:** no confundir con la trayectoria de color celeste que aparece en los accesos 3 y 4.

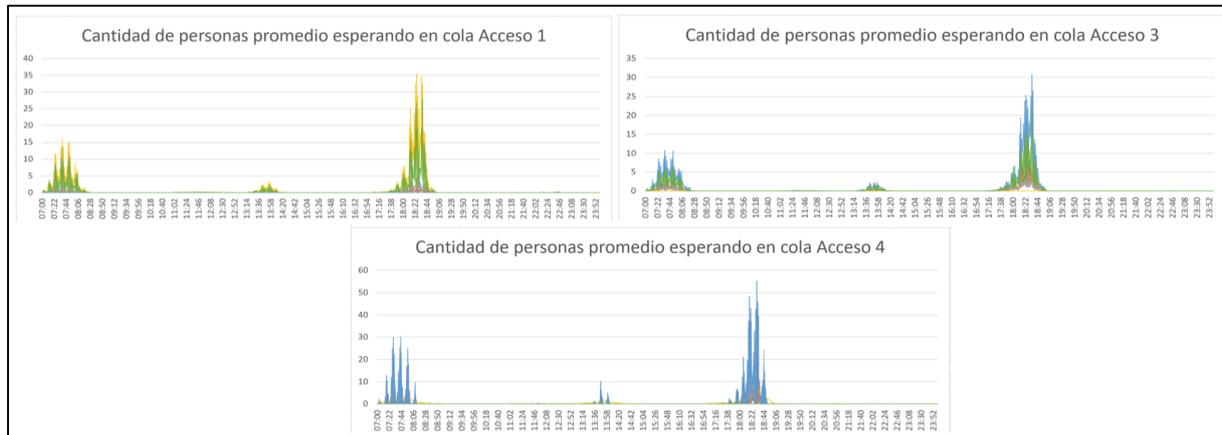


Figura 9. Cantidad de personas promedio esperando en cola. Fuente: propia

Analizando la figura 9 observamos que la menor cantidad de personas promedio esperando en cola en los molinetes para los accesos 1, 3 y 4 corresponde al **escenario 2** (trayectoria roja) que consiste en abrir todos los accesos y derivar el flujo del acceso 2 hacia los molinetes del acceso 1 y 3 colocando 2 personas de seguridad en la línea de molinetes del acceso 1; 3 personas de seguridad en la línea de molinetes del acceso 3, y 4 en los molinetes del acceso 4. Se observa en la figura 10 las medias aritméticas de cada escenario con sus límites superiores e inferiores que confeccionan el intervalo de 95% de confianza.

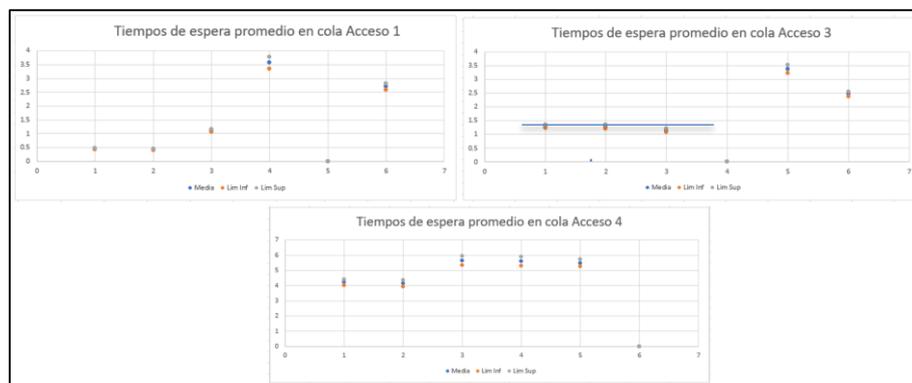


Figura 10. Tiempos de espera promedio esperando en cola para cada escenario. Fuente: propia

Para los molinetes colocados en el acceso 1 (gráfica superior izquierda), los **escenarios 1 y 2** son los que menor media e intervalo de confianza brindan. Como hay superposición de intervalos de confianza, no se puede discriminar cuál de los 2 escenarios es mejor para los molinetes del acceso 1, así que se elige el **escenario 2** por utilizar menor cantidad de recursos. El escenario 5 se descarta para los molinetes del acceso 1 ya que está cerrado el acceso 1.

Para los molinetes colocados en el acceso 3 (gráfica superior derecha), los **escenarios 1, 2 y 3** son los que proporcionan un menor tiempo de espera promedio en cola e intervalos de confianza para los molinetes del acceso 3. En este caso, por el mismo motivo explicado en el párrafo anterior, tampoco puede discriminarse cuál de los escenarios es mejor (ver línea transversal de color azul que indica la superposición), así que se elige el escenario 2 o 3 indistintamente.

Para los molinetes colocados en el acceso 4 (gráfica inferior) también son los **escenarios 1 y 2** los que tienen un menor tiempo de espera promedio e intervalos de confianza. Por el mismo motivo explicado anteriormente, se elige el **escenario 2** como mejor alternativa.

Por otra parte, en la simulación en tiempo real, se puede observar el movimiento de las entidades, detalles de las distribuciones, velocidades de acceso, tráfico e intensidad de tráfico como también el mapa de calor que se muestra en la figura 11 y, sobre todo, se pueden tomar decisiones en tiempo real abriendo y cerrando accesos.



Figura 11. Mapa de calor con los accesos remarcados. Fuente: propia

## 7. Optimización del Sistema analizado

Al intentar realizar un experimento de optimización de parámetros para los 3072 escenarios obtenidos en el diseño de experimentos de múltiples niveles nos encontramos con una restricción de licencia de la versión PLE del software Anylogic que no permite optimizar más de 7 parámetros y en nuestro caso son 8 parámetros y, por otra parte, esta versión solamente permite realizar 500 combinaciones de juegos de parámetros (iteraciones). Si la cantidad de combinaciones a realizar es menor al número indicado (500), sólo se realizarán las combinaciones necesarias sin que el número indicado sea obligatorio, pero, si se exceden, solamente se realizarán las 500 combinaciones y quedarán sin efecto las restantes. En nuestro caso quedarían 2572 combinaciones sin probar ( $3072 - 500$ ).

Teniendo en cuenta ambas restricciones se elige dejar fija en 5 unidades a la cantidad de personas de seguridad de los molinetes del acceso 1 y simular la apertura de todos los accesos ( $2^4$ ), la derivación ( $3^1$ ), y las opciones de 3 o 5 personas de seguridad para los accesos 3 y 4 ( $2^2$ ). Esto da un total de 192 combinaciones. Luego se tienen en cuenta las restricciones artificiales que implican **no simular** las combinaciones de seguridad cuando:

- Seguridad de molinetes de acceso 1 cuando el acceso 1 y acceso 2 están cerrados.
- Seguridad de molinetes de acceso 1 cuando el acceso 1 está cerrado y además el acceso 2 tiene derivación solamente al acceso 3.
- Seguridad de molinetes de acceso 3 cuando acceso 3 y acceso 2 están cerrados.
- Seguridad de molinetes de acceso 3 cuando el acceso 3 está cerrado y además el acceso 2 tiene derivación solamente al acceso 1.
- Seguridad de molinetes de acceso 4 cuando el acceso 4 está cerrado.
- “% Deriva” en 0; 0.5 y 1 cuando el acceso 2 está cerrado.

### 7.1 Parámetros de optimización

La tabla 2 resume los parámetros que se utilizarán para realizar la optimización de los recursos y variables explicadas precedentemente.

Tabla 2 Parámetros de optimización. Fuente: Propia

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Paso	combinaciones
Acceso 1	Cerrado	Abierto	-	2
Acceso 2	Cerrado	Abierto	-	2
Acceso 3	Cerrado	Abierto	-	2
Acceso 4	Cerrado	Abierto	-	2
% Deriva	0	1	0.5	3
Seguridad Acc.1	5	5	-	0
Seguridad Acc.3	3	5	2	2
Seguridad Acc.4	3	5	2	2

“% Deriva” = 0 significa que el flujo peatonal se deriva por los molinetes del acceso 3.

“% Deriva” = 1 significa que el flujo peatonal se deriva por los molinetes del acceso 1.

“% Deriva” = 0.5 indica que el 50% del flujo peatonal se deriva por los molinetes del acceso 1 y el resto por los molinetes del acceso 3.

En el apartado 6 se analizaron diferentes escenarios y su impacto en distintos KPIs como longitud promedio de colas en molinetes, tiempos promedio de espera en molinetes y utilización promedio de los recursos de seguridad. Luego de analizar los KPIs mencionados, la empresa decide prestar mayor importancia a los tiempos promedio de espera en cola por lo que la función objetivo a optimizar se establece como:

**Minimizar (tiempos promedio en las colas de los molinetes del acceso 1 + tiempos promedio en las colas de los molinetes del acceso 3 + tiempos promedio en las colas de los molinetes del acceso 4)** que incluye el tiempo de aquellas personas que presentaron inconvenientes en ingresar y están siendo atendidas por personal de seguridad y que luego son derivadas nuevamente a los molinetes.

## 7.2 Resultados de optimización

En la figura 12 se plasma el resultado final que muestra que en la iteración 30 se obtiene el mínimo de 2.344 segundos de espera promedio en cola.

	Actual	El Mejor
Iteración:	96	30
Objetivo: ↓	3.306	2.344

Figura 12. Resultados de optimización. Fuente: propia

En la figura 13 se muestra el resultado gráfico de la optimización con las siguientes consideraciones:

La línea de color azul se conforma con los diferentes puntos que minimizaron la función objetivo. A medida que avanzan las iteraciones (combinaciones de parámetros) se evalúa si el valor obtenido es mayor, menor o igual al último resultado de minimización.

Si en la iteración siguiente, el valor obtenido es mayor, entonces la línea azul continúa en el último punto de minimización y además se escribe un punto de color gris con la iteración “Actual”. Si en cambio, el valor de la siguiente iteración es menor al último valor mínimo obtenido, la curva azul desciende hacia el nuevo mínimo encontrado. Si es igual entonces continúa la trayectoria.

Se observan entonces puntos de color gris muy por encima de los óptimos encontrados y otros que están muy cercanos al óptimo. En la iteración 30 se produce un pequeño quiebre de la trayectoria de color azul producto de que el valor objetivo disminuye levemente para esa combinación de parámetros específica. Este quiebre no se aprecia con mucho detalle debido a los puntos de color gris que tienen valores entre 250 y 300 segundos de espera promedio y están lejos de los 2.344 segundos en promedio que arroja el óptimo.

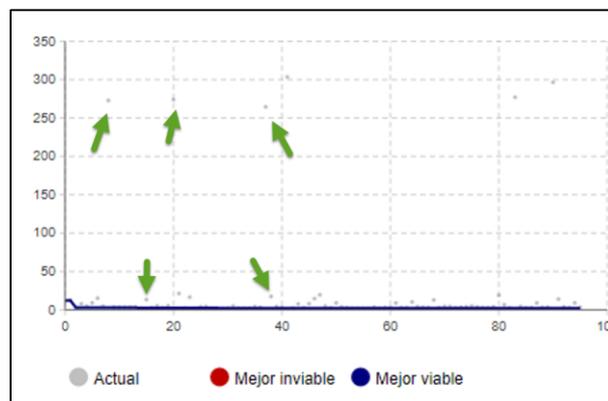


Figura 13. Resultados de optimización. Fuente: propia

Los valores de los parámetros que optimizan la función objetivo en la iteración 30 son los siguientes

Tabla 3 Resultado de los parámetros de optimización. Fuente: Propia

Parámetro	Valor
Acceso 1	Abierto
Acceso 2	Cerrado
Acceso 3	Abierto
Acceso 4	Cerrado
% Deriva	- (No aplica con acceso 2 cerrado)
Seguridad Acceso 1	5 (fijo)
Seguridad Acceso 3	5
Seguridad Acceso 4	0 (No aplica con acceso 4 cerrado)

A modo de resumen, en la tabla 4 se realiza una comparación de las distintas combinaciones encontradas a fin de valorar la solución en términos de tiempos promedio en las colas de los molinetes de los accesos 1, 3 y 4. Todos los tiempos están considerados en segundos.

Tabla 4. Resumen de Variables en el proceso de optimización. Fuente: propia

Escenario	Tiempo promedio en molinetes del acceso 1	Tiempo promedio en molinetes del acceso 3	Tiempo promedio en molinetes del acceso 4	Suma del Tiempo promedio de cada acceso
<b>Caso Base</b>	2.3147	0	6.8462	9.1609
<b>1</b>	0.4432	1.3002	4.2219	5.9654
<b>2</b>	0.4262	1.2835	4.1369	5.8466
<b>3</b>	1.1135	1.1389	5.6329	7.8854
<b>4</b>	3.5665	0	5.5876	9.1541
<b>5</b>	0	3.3742	4.4845	8.8587
<b>6</b>	2.6974	2.4661	0	5.1635
<b>Optimización</b>	-	-	-	<b>2.344</b>

Se puede apreciar que la suma de los tiempos promedios de los escenarios 1; 2 y 6 son los que tienen menor tiempo promedio de espera en cola respecto al Caso Base, pero el escenario de optimización aún ofrece un mejor rendimiento en términos de tiempo.

## 8. Conclusiones

La toma de decisiones incluye identificar un problema, elegir una entre varias alternativas y evaluar la eficacia de cada una basada en la evaluación de escenarios futuros posibles. El análisis de escenarios realizado permite entonces evaluar la eficacia de cada métrica seleccionada (utilización promedio del personal de seguridad, cantidad promedio de personas esperando ser atendidos por personal de seguridad, cantidad promedio personas en las colas de acceso, tiempo promedio en que las personas están en las colas de acceso y mapa de calor entre otras que no se exponen en este resumen tales como tráfico promedio e intensidad de tráfico promedio).

En el problema analizado se plantean objetivos contrapuestos que equivalen a disminuir la cantidad de personal de seguridad (reducción de costos) y aumentar la cantidad de accesos que conlleva menores tiempos de espera y longitudes de cola (aumento de servicio). Habilitar más accesos supone incorporar más personal de seguridad por lo que lleva a querer minimizar los accesos para reducir los costos.

Si la cantidad de accesos aumenta, se puede jugar con la cantidad de empleados de seguridad por acceso hasta un cierto punto, como es una restricción artificial que supone nunca menos de 2 personas de seguridad por línea de molinetes, u otras restricciones de rendimiento en longitud y tiempo en cola.

El tiempo promedio en cola de los molinetes y la cantidad promedio de personas esperando en los molinetes, está directamente asociada a la cantidad de accesos abiertos y también a la cantidad de personas de seguridad que ayudan a resolver los problemas de lectura de QR cuando los empleados pasan por los molinetes, de modo que si un empleado que llega al molinete y tiene problemas de acceso, requiere de asistencia de seguridad, pero si hay pocas personas de seguridad, que probablemente estarán atendiendo proveedores, invitados o resolviendo otros casos, no podrán resolver el problema del empleado que no puede acceder y esto conlleva a que aumente el tiempo de espera en el molinete.

El escenario de optimización nos muestra (teniendo en cuenta la restricción de que la cantidad de personal de seguridad de los molinetes del acceso 1 es de 5 personas) que el mínimo tiempo promedio de espera en cola de molinetes se logra habilitando los accesos 1 y 3 con 5 personas de seguridad en cada acceso y sin necesidad de abrir los accesos 2 y 4. Esta opción mejora aún más el tiempo promedio obtenido para el escenario 6.

El procedimiento de solución explicado mediante el modelo de simulación puede en principio resultar complejo, pero queremos resaltar la aplicación de los conceptos de la ingeniería de procesos, los métodos estadísticos y el conocimiento de excelentes herramientas permiten que muchos problemas similares pueden ser analizados con los conceptos de nuestra metodología aplicada.

## 9. Referencias

- [1] Anylogic, <https://www.anylogic.com/>, sitio web
- [2] Barceló J. (1998), “*Simulación de Sistemas Discretos*”, 1ra ed. Madrid España: ISDEFE
- [3] Bravo Pareja J. (2019), “*Diseño e implementación de un sistema de control de acceso a los campus de la Universidad Tecnológica del Perú – UTP*”, Tesis de Maestría, Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12867/2717>
- [4] Cabrera Rojo A.M. (2018), “*Sistema de control de acceso para refinería YPFB en la ciudad de Santa Cruz y Cochabamba, Bolivia*”. Tesis de grado. Recuperado de: <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/21671>
- [5] Canavos G. (1988), “*Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y Métodos*”, 1th ed. USA: Mac Graw Hill
- [6] Cosentino, L. (2019), “*Control de Accesos. Conceptos, historia y esquema básico*”. *Negocios de Seguridad* (45), 152-160. Recuperado de: [http://negociosdeseguridad.com.ar/revistas/045/RNDS\\_045.pdf](http://negociosdeseguridad.com.ar/revistas/045/RNDS_045.pdf)
- [7] Oracle Corp, <https://www.oracle.com/ar/middleware/technologies/crystalball/>, sitio oficial
- [8] Martínez Bencardino C. (2012), “*Estadística y Muestreo*”, 13th Ed. Bogotá Colombia: ECOE Ediciones
- [9] Ortiz Moctezuma M (2015), “*Sistemas Dinámicos en Tiempo Continuo. Modelado y Simulación*”. México: OmniScience (Omnia Publisher S.L.), Universidad Politécnica de Victoria
- [10] Ortiz, E. M. (2014). “*Sistemas de control de acceso para unidades militares*”. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/12070>.
- [11] Security One Argentina, imagen recuperada de: <https://youtu.be/eWDWwkcRaGM>
- [12] Shortle J., Thompson J. (2018), “*Fundamentals of Queueing Theory*”, 5th ed. USA: John Wiley and Sons
- [13] Teco N.F. (2005), “*Análisis y evaluación de escenarios de sistemas de control de acceso y asistencia para Renault Argentina*”, Tesis de grado, Universidad Siglo 21. Recuperado de: <https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/handle/ues21/12589>
- [14] Vargas, F. J. (2016). “*Diseño Conceptual de un Sistema de Control de Acceso y Alarmas para Pequeñas Instalaciones*”. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/4106>.