

# **OPTIMIZACIÓN BASADA EN SIMULACIÓN EN UN SISTEMA DE TRÁNSITO PÚBLICO MASIVO**

**Eduardo Carbajal López**

Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, ecarbajal@pucp.pe

**Lucy Gabriela Aragón Casas**

Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, laragonc@pucp.edu.pe

**Carmen Blancy Dávila Cajahuanca**

Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, davila.cb@pucp.edu.pe

## **RESUMEN**

Los sistemas de tránsito público masivo constituyen los medios mas efectivo de reordenamiento vial en las principales ciudades sudamericanas. Particularmente en el caso de Lima, Perú se ha implementado hace dos años, un sistema de tránsito público masivo empleando buses denominado Metropolitano. El presente trabajo busca poder optimizar la atención de pasajeros en este sistema de tránsito vial minimizando los tiempos de espera en las horas punta a lo largo de las diferentes estaciones a lo largo de las rutas atendidas por los buses. Se emplea optimización basada en simulación con dicho fin, construyendo primero un modelo de simulación de eventos discretos del sistema de buses, el cual luego de ser validado servirá como base para probar diferentes parámetros de control y encontrar la combinación óptima que permita el mejor desempeño del sistema estudiado.

**Palabras clave:** Simulación de eventos discretos, Optimización basada en simulación, Distribuciones aleatorias, Sistemas de transporte público.

## **ABSTRACT**

The massive public transportation systems are the most effective tools for vial structuring in most of the main sudamerican cities. Particularly in the case of Lima, Perú, two years ago a massive public transportation system using buses was implemented. This system is called "Metropolitano". The present research focuses on optimizing the passenger attention in this system by reducing the waiting times in queue lines in the bus stations along all the routes attended. Optimization based on discrete event simulation is used for this goal, building and validating a discrete event model, that is used to proove different control parameters and to find the best set that allows the best perfomance of the studied system.

**Keywords:** Simulation, Optimization based on simulation, Random distributions, Public transportation systems

## **1. INTRODUCTION**

Uno de los principales problemas en las ciudades de los países de la región es el tema del transporte urbano. Existen diversos sistemas masivos de transporte urbano implementados en las ciudades capitales de los países de Sudamérica, que son responsables de atender las necesidades de transporte diario de un porcentaje significativo de habitantes. La existencia de los sistemas de transporte urbano masivo contribuye a la reducción del congestionamiento vial en zonas de altos tránsito y arterias urbanas principales. Puntualmente en Perú en los últimos dos años se han implementado dos sistemas de transporte masivo que frente al creciente nivel de demanda de transporte público han permitido aminorar el congestionamiento urbano en ciertas zonas de la capital. No obstante la inserción de estos sistemas de transporte ha traído problemas inherentes a un tema de manejo de red vial, pues en muchos casos se generan demandas excesivamente altas de pasajeros en horas punta y el diseño inicial de la red de transporte masivo es insuficiente para atender el volumen de pasajeros existentes. El presente estudio se centra en el análisis del desempeño actual del sistema de transporte masivo vial de Lima denominado Metropolitano.

El transporte Metropolitano de Lima comenzó a funcionar oficialmente el 28 de julio del año 2010, luego de 4 años de construcción. Está conformado por 38 estaciones en total: 35 Estaciones Intermedias distribuidas a lo largo de los 26 km de ruta troncal, dos Estaciones de Transferencia que se encuentran en Matellini (Chorrillos) y Naranjal (Independencia), además de la Estación Central ubicada bajo el Paseo de los Héroes. En la figura 1 se muestra los tramos comprendidos en la red vial del Metropolitano.



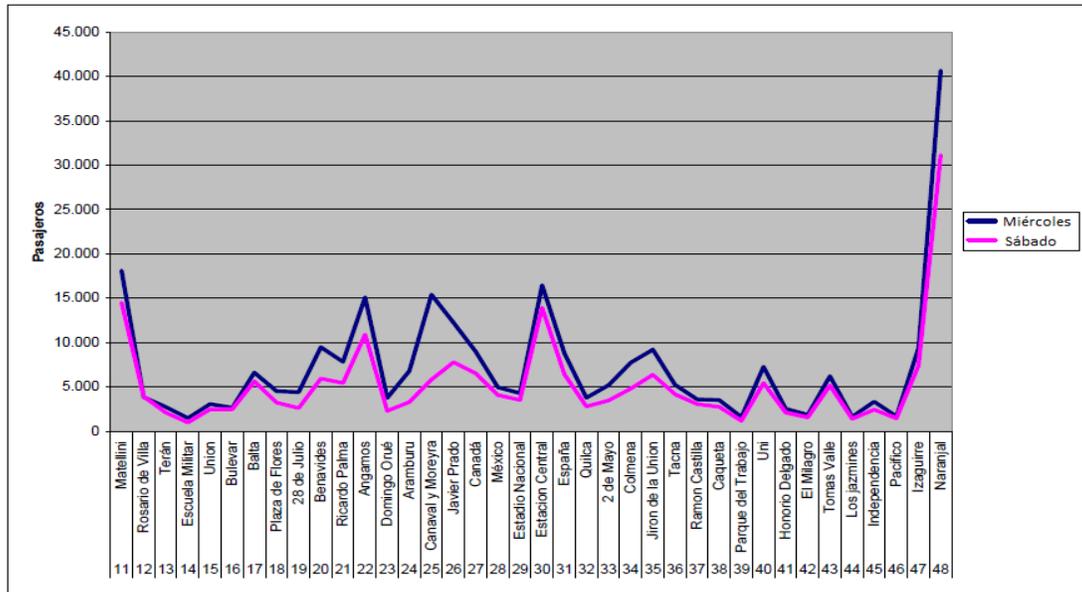
Figura 1: Red de transporte vial del Metropolitano

El flujo de pasajeros, en promedio de todas las rutas, que se produce por día es de 300 mil pasajeros. Se cuenta con dos tipos de buses: Bus Expreso que pasa solo por estaciones predeterminadas, y el Bus Regular que recorre todas las estaciones. Existen tres rutas del Bus Regular y cuatro rutas del Bus Expreso. Las rutas del Bus Regular se muestran en la Figura 2.



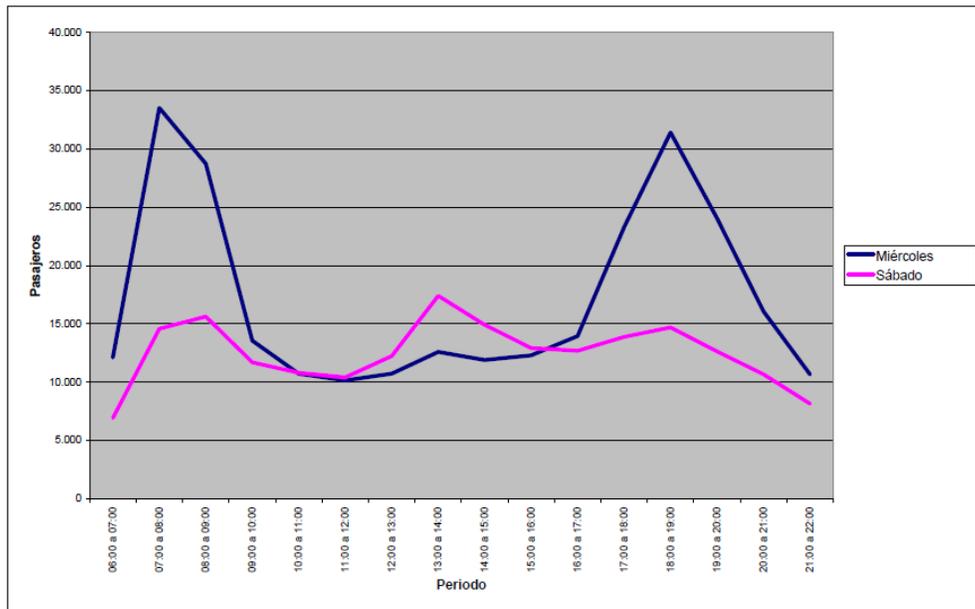
Figura 2: Rutas del Bus Regular

Desde la inauguración del servicio del Metropolitano he tenido una afluencia alta de pasajeros, en particular de aquellos que viajan entre las estaciones extremas, pues es la única vía de comunicación rápida entre diferentes sectores de Lima. En la Figura 3 puede verse la afluencia diaria de pasajeros en cada estación de la vía. Las estaciones con mayor afluencia son las iniciales en cada extremo de la vía y la estación central que se localiza justamente en el sector central de Lima.



**Figura 3: Afluencia diaria de pasajeros por estación**

El metropolitano cuenta con un sistema computarizado de control por tarjetas que permite a los usuarios recargar saldos y utilizarlo al momento de efectuar cada viaje en la red. El horario de atención usual es de 6:00 a.m hasta las 9:50 p.m. Durante los horarios picos de tránsito vehicular (identificados entre las 6am y 9am y entre las 5:00pm y 7:00pm, puede revisarse en la Figura 4) se generan problemas de atención en la red de metropolitano, debido a la alta afluencia de pasajeros, los pasajeros deben esperar lapsos de tiempos prolongados formando colas extensas en las estaciones principales.



**Figura 4: Afluencia diaria por hora**

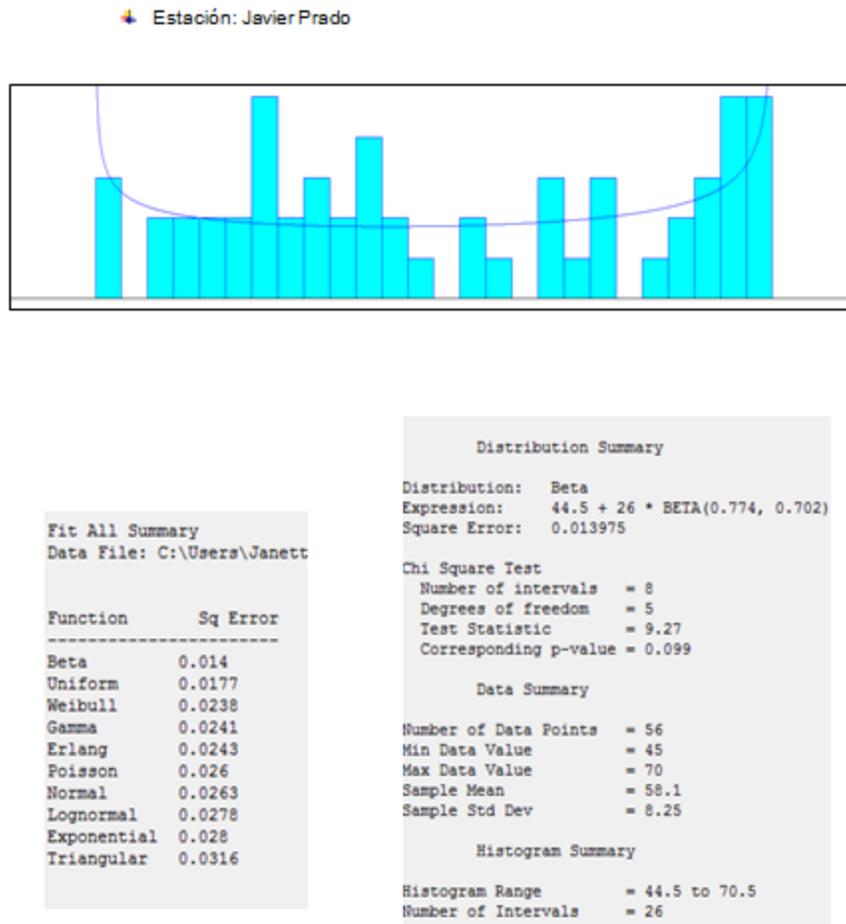
Se desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos que permitiera experimentar y realizar propuestas de mejora sobre el desempeño del sistema de atención del Metropolitano. Se empleo optimización basada en simulación con el fin de encontrar las condiciones que permitían encontrar un mejor desempeño del sistema de atención en función de disminución de tiempos de espera en cola durante los segmentos pico y con un nivel límite de presupuesto referencial, tomando como parámetros de control en el sistema del Metropolitano a la frecuencia de envío de buses desde cada estación , el número de unidades de transporte empleadas a lo largo de la red y la capacidad de los buses.

## 2. ANÁLISIS DE DATOS

Para la construcción del modelo de simulación fue necesario identificar las variables aleatorias relevantes en el sistema de atención del Metropolitano. La principal variable estocástica es el tiempo entre arribos de pasajeros a cada estación en el ruta. Dado que claramente existe undiferente comportamiento en cada estación y además por hoas del día el primer paso fue emplear pruebas de varianza y ANOVA para poder determinar cuando los segmentos horarios podían ser representados en cada estación por una misma variable aleatoria y cuando era necesario modelarlos independientemente. Luego de realizadas estas pruebas se determinaron los grupos de datos a emplear para la determinación de cada variable, calculando el tamaño de muestra adecuado por muestreo aleatorio simple en cada segmento considerando siempre un error no mayor de 10% sobre la media de las pruebas pilotos relevadas en cada caso a partir de una base de datos extensa con información histórica de un periodo de operación de 6 meses.

Las variables aleatorias fueron determinadas empleando pruebas de bondad de ajuste Kolmogorox Smirnov y Chi Cuadrado. Se empleo en estos casos un nivel de significancia de 5%. Con el fin de mejorar la salida de los resultados una vez determinadas la distribución de probabilidad correspondiente a cada variable se calculo una matriz de varianza covarianza entre todas las variables, de manera que las variables aleatorias generadas no se asumieran independientes, sino que reflejaran la correlación histórica observada en los datos relavados. En la

Figura 5 se muestran los resultados de las pruebas mencionadas para determinar la distribución de probabilidad correspondiente a la variable de tiempos entre arribos para una estación de la ruta general.



**Figura 5: Pruebas de bondad de ajuste para tiempos entre arribos Estación Javier Prado**

La ruta del recorrido esta compuesta por tramos de tránsito exclusivo para los buses, en estos tramos los buses se desplazan a la velocidad reglamentaria, por lo que no se considera el desplazamiento entre estas estaciones como variable aleatoria. Hay algunos tramos en los cuales los buses si bien se desplazan por carriles independientes, estan sujetos a los semáforos que regulan el tránsito de las avenidas, en estos tramos si se considera una variable aleatoria para modelar una velocidad promedio como variable aleatoria, manteniendo la distancia de desplazamiento fija de acuerdo al tramo comprendido de análisis. No son requeridas otras variables aleatorias pues los tiempos de permanencia del bus en cada estación son fijos.

La generación de variables aleatorias se realiza en Risk, y se llevan como datos al modelo de simulación construido en Rockwell Arena 13.9 utilizando blocks de lectura de datos.

### 3. MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Empleando Rockwell Arena 13.9 se construye el modelo de simulación de eventos discretos del sistema de atención del Metropolitano. Se consideran en este modelo como entidades a los pasajeros. El modelo de simulación se compone de varios submodelos, cada uno representando a cada estación en los tramos recorridos. La lógica empleada es directa. Se simula el arribo de pasajeros a las terminales empleando la variable de tiempo entre arribos de pasajeros y en función de la selección de rutas se pueden modelar las diferentes colas de espera de los pasajeros. Los pasajeros esperasn hasta que llega el bus correspondiente a su ruta a la estación y suben dependiendo de que exista capacidad en los buses, de lo contrario quedan esperando en la esiación al bus próximo.

El sistema de flujo vehicular considera a los buses como entidades, y modela el desplazamiento entre submodlos empleando transportes, por lo que es necesario incorporar un plano de distancias de pares por puntos de todas las estaciones incorporadas en el modelo. De esta forma con las distancias conocidas y en función de la velocidad constante en algunos tramos (sin semáforo) y de velocidad variable en otros se puede iterar el tiempo de traslado entre estaciones. A la llegada a cada estación los pasajeros cuyo destino coincide con la misma descenden repitiendo la lógica previa descrita.

El modelo considera tamaños de grupos aleatorios, y permite en cada estación la selección de la cola mas corta para rutas iguales. Se implementan como variables de control a la cantidad de unidades disponible en la ruta, el tiempo entre salida de buses de las estaciones terminales y las capacidades de los buses. Se emplean como acumuladores estadísticos a los promedios, mínimos y máximo de los tiempos en cola de los pasajeros en horario punta de las estaciones principales del modelo. En la Figura 6 se observa un bosquejo de la animación 2D empleada en el modelo de simulación descrito. Cabe resaltar que los tiempos no se generan directamente como variables aleatorias en el mismo software de simulación sino que son leídos desde tablas externas en hojas de cálculo, donde se generan las variables citadas anteriormente empleando el software Risk.

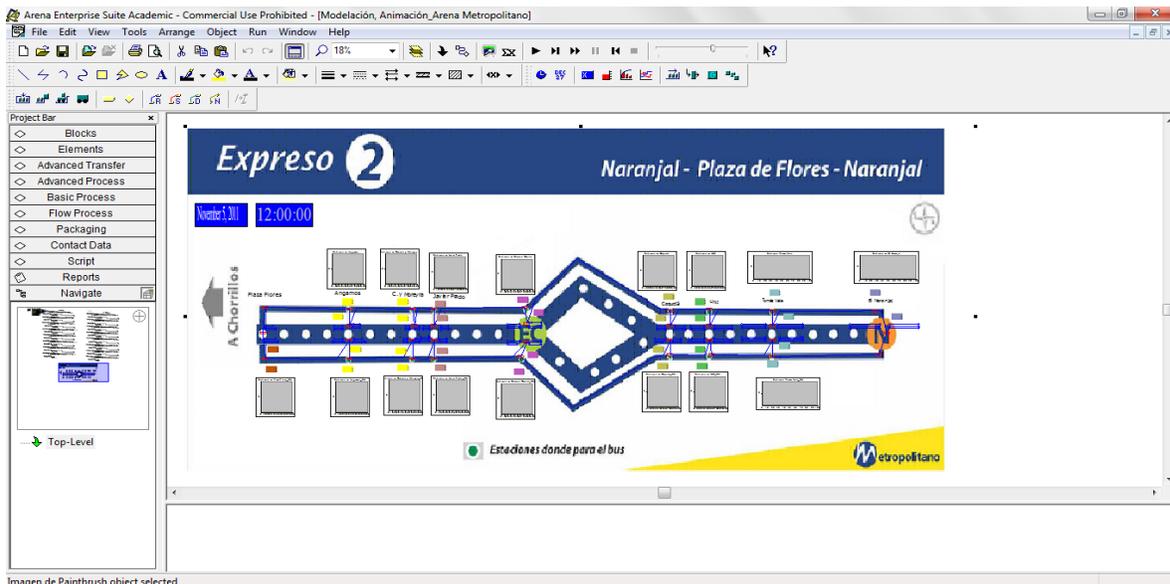


Figura 6: Modelo de simulación del Metropolitano

#### 4. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

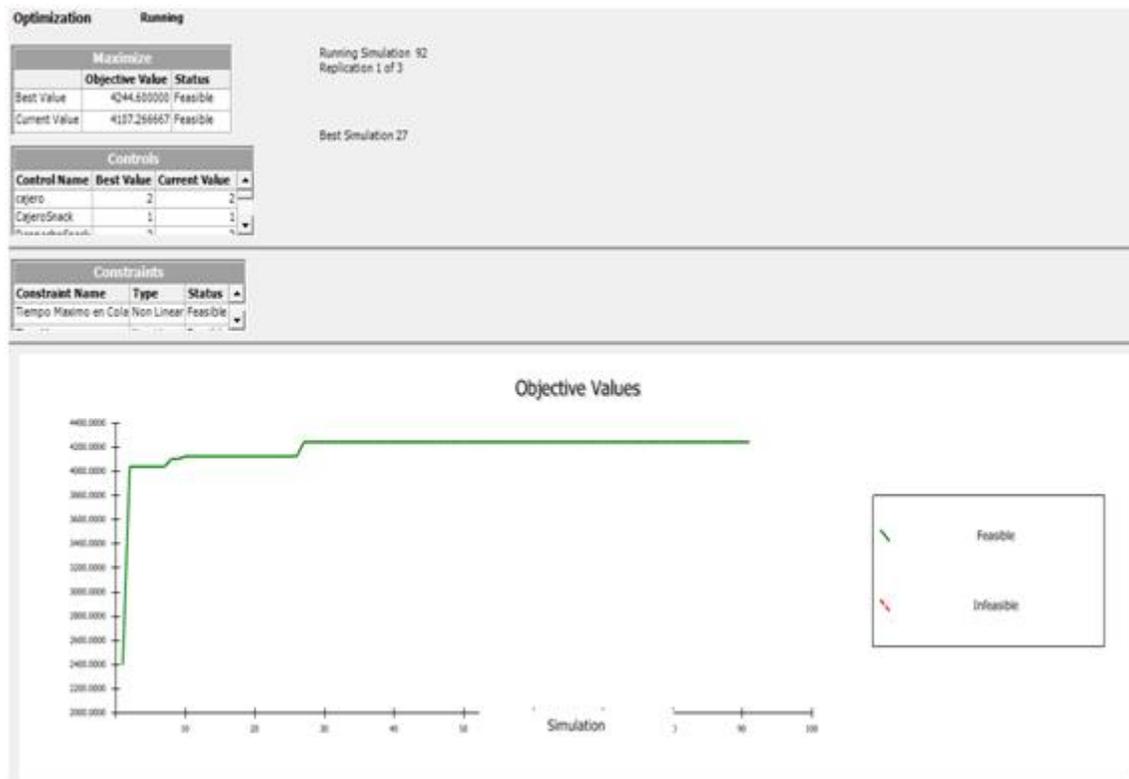
Una vez que se concluye el modelo de simulación se realizan las pruebas de validación para los indicadores de salida relevantes, que corresponden con los tiempos en cola en cada estación del modelo, en los segmentos pico. Se aplican pruebas de hipótesis y revisado que el modelo es validable en comparación con data real de los tiempos en cola se procede a determinar el número adecuado de réplicas a realizar. Se emplea como criterio una precisión de 0.5 minutos como referente para cada indicador de salida. En función de estos se determina el número de réplicas necesarias del modelo. En la Tabla 1 se muestra las salidas de las réplicas iniciales.

**Tabla 1: Tiempos promedios en cola por estación**

Identifier	Average	Half-width	Minimum	Maximum
DAVG(cola 1 estacion central.NumberInQueue)	1.2941	.04507	1.2233	1.4186
TAVG(cola 1 plazaflores sn.WaitingTime)	79.049	2.6942	71.787	84.864
TAVG(cola 2 angamos sn.WaitingTime)	82.314	1.5788	78.163	85.159
TAVG(cola 2 estacion central.WaitingTime)	85.650	1.9913	80.852	89.942
TAVG(cola 1 estacion central.WaitingTime)	73.270	1.8145	69.595	76.160
TAVG(cola 1 angamos sn.WaitingTime)	78.050	1.0840	74.976	80.487
DAVG(cola 2 estacion central.NumberInQueue)	1.0360	.04191	.96204	1.1511
DAVG(cola 2 tomas valle.NumberInQueue)	3.0235	.04277	2.9123	3.1031
TAVG(cola 2 plazaflores sn.WaitingTime)	77.100	1.9514	72.363	80.791
TAVG(cola 1 tomas valle.WaitingTime)	67.116	.63015	65.288	68.354
TAVG(cola 2 tomas valle.WaitingTime)	76.909	.80867	74.466	78.584
DAVG(cola 1 tomas valle.NumberInQueue)	3.4234	.04152	3.3171	3.5006
TAVG(cola 1 el naranjal.WaitingTime)	57.462	.04125	57.397	57.573
DAVG(cola 1 plazaflores sn.NumberInQueue)	1.6398	.03347	1.5422	1.6884
DAVG(cola 2 plazaflores sn.NumberInQueue)	1.1691	.03453	1.0669	1.2119
TAVG(cola 2 el naranjal.WaitingTime)	69.751	.06820	69.573	69.899
TAVG(cola 1 uni.WaitingTime)	70.739	1.1231	68.371	72.572

#### 5. OPTIMIZACION Y PLANTEAMIENTO DE MEJORAS

La optimización se construye con un modelo que busca la optimización del sistema del Metropolitano a través de una gestión operativa eficiente que se refleja en tiempos de espera máximo permitidos en horario pico. Fijando estos tiempos referenciales como restricción se emplea una función lineal que minimiza los tiempos totales en cola, tomando como variables de control a la capacidad de los buses, la frecuencia de salida de la estación principal, y el número de unidades disponibles por horarios. En función a esto se logra identificar una combinación idónea de los parámetros mencionados que podría ser implementada para mejorar el flujo de pasajeros en el sistema. En la figura 7 se muestra la curva de optimización de la función mencionada. Se emplean una cantidad de simulaciones suficiente para probar todas las combinaciones de los controles mencionados.



**Figura 7: Optimización en OptQuest for Arena**

## 6. REFERENCIAS

- Altiok, T. (2007). "Simulation Modeling and Analysis with Arena" *Academic Press*
- Banks, J, Barry, N., Carson, J. y Nicol, D.. (2004). "Discrete-Event System Simulation". Cuarta edición. *Editorial Prentice Hall International*.
- Kelton, David, Sadowwski, D. y Sadowwski, R. (2010). "Simulation with Arena" *Editorial McGraw-Hill*
- Rosseti, M.D. (2010). "Simulation Modeling and Arena", 3<sup>rd</sup> edition, *Wiley & Sons United States of America*