

ANÁLISIS DE VARIABILIDAD EN ASIGNACIÓN DE PERSONAL PARA LA UNIDAD DE URGENCIAS
DE UN HOSPITAL

SERGIO DANIEL OCHOA BUITRAGO

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

2012

ANÁLISIS DE VARIABILIDAD EN ASIGNACIÓN DE PERSONAL PARA LA UNIDAD DE URGENCIAS
DE UN HOSPITAL

SERGIO DANIEL OCHOA BUITRAGO

Proyecto de grado para optar por el título de
Ingeniero Industrial

Asesor

CIRO AMAYA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

2012

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, a mi familia por el apoyo incondicional a lo largo de este proceso, a mis amigos y colaboradores en este proyecto y en especial a mi asesor, Ciro Amaya por su colaboración, dedicación y orientación en el desarrollo del presente proyecto. A los involucrados de forma directa o indirecta en la realización de este trabajo, muchas gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE URGENCIAS	4
2.1 CARACTERIZACIÓN DE TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA	7
2.2 NIVEL DE PERSONAL	8
3. MODELO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA	10
3.1 ESTADÍSTICOS DE INTERÉS	10
3.2 LONGITUD DE SIMULACIÓN, TIEMPO DE CALENTAMIENTO Y NÚMERO DE RÉPLICAS...11	
3.3 RESULTADOS PRELIMINARES	12
4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A VARIABILIDAD DE DEMANDA	12
4.1 DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO ENTRE ARRIBOS COMO PRIMERA FUENTE DE VARIACIÓN..13	
4.1.1 Resultados para tasas por hora.....	15
4.1.2 Resultados para tasas por turno	16
4.1.3 Resultados para tasa única diaria.....	17
4.2 SUPOSICIÓN DE TASAS DE ARRIBO POR INTERVALOS COMO SEGUNDA FUENTE DE VARIACIÓN.....	18
4.3 OBSERVACIONES GENERALES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	19
5. ASIGNACIÓN DE PERSONAL BAJO CARACTERÍSTICAS ESTOCÁSTICAS.....	21
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	27
BIBLIOGRAFÍA.....	29

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tiempos de actividades principales dentro del centro de urgencias.....	7
Tabla 2. Probabilidad de cada triage para los pacientes.	8
Tabla 3. Probabilidad de edad del paciente.	8
Tabla 4. Porcentaje de tipo de afiliación.	8
Tabla 5. Actividades y personal requerido.	9
Tabla 6. Cantidad de Médicos Generales y Especialistas por turno y día.	9
Tabla 7. Cantidad de Médicos Pediatras por turno y día.	9
Tabla 8. Hora de inicio de cada turno.....	9
Tabla 9. Resultados iniciales.	12
Tabla 10. Errores estimados por aproximación utilizada.	20
Tabla 11. Función objetivo y estadísticos para la mejor solución encontrada.	23
Tabla 12. Número de recursos asignados y estadísticos de interés para la mejor solución encontrada.	24
Tabla 13. Resumen del análisis de sensibilidad realizado. Se presentan los errores relativos a mínima variación.	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de pacientes en la unidad de urgencias	5
Figura 2. Diagrama de flujo para atención de pacientes con medicina pre-pagada (PRE).....	6
Figura 3. Diagrama de flujo para pacientes POS.....	6
Figura 4. Tasa de arribos por hora.....	7
Figura 5. Resultados en tasas por hora.. ..	15
Figura 6. Resultados en tasas por turno.....	16
Figura 7. Resultados tasa única diaria.. ..	17
Figura 8. Comparación del PIP promedio y máximo en cada división de tasa de arribos.	18
Figura 9. Comparación de tiempo en el sistema para cada división de la tasa de arribos.	19
Figura 10. Comparación de PIP promedio de los dos métodos de generación.....	20
Figura 11. Asignación de médicos generales.	22
Figura 12. Asignación de médicos especialistas.	22
Figura 13. Asignación de médicos pediatras.	22
Figura 14. Asignación de médicos generales.	24
Figura 15. Asignación de médicos especialistas.	24
Figura 16. Asignación de médicos pediatras.	24
Figura 17. Sensibilidad solución por optimización estocástica. Tasa promedio por hora.....	25
Figura 18. Sensibilidad solución por optimización estocástica. Tasa promedio por turno.	26
Figura 19. Sensibilidad solución optimización estocástica. Tasa promedio diaria.	26

INTRODUCCIÓN

En todas las organizaciones de gran importancia asignar personal calificado para cada actividad que se necesite, esto es determinante para la eficiencia de la empresa y la satisfacción lograda del servicio o producto que se proporciona al cliente. Por tal motivo el problema de asignación del personal es un tema muy popular en la literatura, en que se abordan sistemas que desde muy poco complejos hasta complejos y altamente restringidos (Puente, 2009).

Asignación de personal es el proceso de construir horarios y tablas de trabajo con el fin de que una organización pueda satisfacer la demanda de sus bienes o servicios. La primera parte del proceso tiene que ver con determinar la cantidad de personal, con ciertas características y habilidades, necesario para suplir la demanda del servicio (Ernst, 2004). Los empleados son ubicados en diferentes horarios junto con las tareas que deban desarrollar a lo largo del turno. Esta asignación tiene regulaciones legales y organizacionales que se deben tener en cuenta para cada sistema particular. Estas regulaciones o restricciones para el problema, pueden ser bastante fuertes y dificultar significativamente la solución del problema.

Para sistemas de logística y transporte, los problemas de asignación incluyen a demás de personal, maquinaria y disponibilidad de áreas, con el fin de disminuir costos y satisfacer demanda bajo restricciones operacionales. Esto incluye restricciones que hacen al problema bastante complejo y difícil de solucionar.

En sistemas del sector salud como hospitales y clínicas, se busca garantizar una excelente atención al paciente, con bajo tiempo de espera y de calidad en todo el proceso de servicio, así como también se quiere disminuir los costos de personal para ello. Si en algún momento no se cuenta con personal, equipos o recursos para prestar el servicio al paciente, se puede afectar su integridad o poner en riesgo su vida y causarle la muerte. Si por el contrario, se cuenta con exceso de recursos, resulta poco beneficioso para el hospital en sentido financiero y operacional.

Para la solución del problema se han propuesto diferentes métodos pero en la gran mayoría se asume demanda determinística, es decir, puede ser cambiante a lo largo de un periodo, pero el factor de incertidumbre dentro del periodo se toma como nulo. El no tener en cuenta la variabilidad o incertidumbre de diferentes parámetros, principalmente los de demanda, se puede sesgar la decisión y cometer errores que hagan al sistema inestable y se realice una mala asignación, generando tiempos de cola mayores, congestión y prestación de un servicio de mala calidad.

En este trabajo se presenta un análisis de sensibilidad, frente a la incertidumbre en la demanda, para la toma de decisión en el problema de asignación de personal en la unidad de urgencias de un hospital tipo de Bogotá. Se hace énfasis en la primera fase mencionada anteriormente, en la que se quiere determinar el número de recursos humanos necesarios para lograr un servicio de muy buena calidad, sin incurrir en costos excesivos. En la siguiente sección se presenta una revisión de literatura para el problema. En las secciones posteriores se presentará la descripción del sistema, metodología de solución, resultados y conclusiones respectivas.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

Planeación de personal en hospitales es una tarea que consume bastante tiempo pero es vital para la operación. La falta de recursos apropiados puede generar aumentos en tiempos de servicio y espera que causan gran congestión, así como cuellos de botella. Una mala planeación de recursos puede generar sobrecargas de trabajo en el personal, desbalance de tareas y turnos, que se expresa en una disminución de calidad de los servicios prestados.

Con el fin de solucionar estos problemas, se puede abordar la situación identificando, en primera instancia, la cantidad de recursos de cierta naturaleza asociados a un turno específico para la realización de una tarea específica acorde con la demanda correspondiente. Posteriormente se hace una asignación para cada miembro, de tal forma que se programen sus actividades en el periodo de tiempo de planeación. La primera etapa mencionada se conoce como el problema de planeación, la segunda como el de programación de turnos(Ernst, 2004).

Ernst et al (Ernst, 2004) presentan un amplio detalle del estado del arte sobre programación de recursos en diferentes contextos como puertos, call centers y hospitales entre otros. Adicionalmente presentan numerosos métodos para solucionar los distintos problemas de asignación en múltiples aplicaciones. Parte del estado del arte presentado en dicho artículo se presenta en esta sección. Aunque el problema de asignación está presente en diferentes contextos, se hará énfasis en los trabajos centrados en el sector hospitalario, ya que es el centro del presente trabajo.

Spyropoulos(Spyropoulos, 2000), presenta una descripción y recomendaciones del uso de inteligencia artificial en planeación de personal para la mayoría de áreas de un hospital. En este editorial se presenta la influencia de diferentes métodos de asignación de personal en la administración del hospital.

Puente et al (Puente, 2009) presentan un método de solución que incluye el uso de algoritmos genéticos para generación de horarios automáticamente. Inicialmente se obtienen los requerimientos de personal, luego se identifican restricciones suaves y fuertes y se soluciona el problema para las restricciones fuertes. Posteriormente se incluyen restricciones suaves y se soluciona para alguna de ellas. Este modelo involucra heurísticas para la generación de la programación en cada paso. Mediante este método se logra llegar a una solución óptima para el problema, pero se obvian las condiciones de variabilidad que tiene un sistema como el estudiado.

La gran mayoría de trabajos encontrados en la revisión de literatura se enfocan en el problema de programación de enfermeras, ya que éstas tienen una mayor rotación que los médicos debido a la facilidad para asignarles tareas variadas. Burke et al (E. Burke, Curtois, T, Post, G, Qu, R & Veltman, B, 2008) proponen el uso de algoritmos híbridos para solucionar el problema antes mencionado, basándose en algoritmos de búsqueda local para generar soluciones factibles y así lograr acercarse al óptimo. En dicho trabajo se hace una comparación del rendimiento de su solución frente a soluciones presentadas por software comercial. Burke et al (E. Burke, Li, J & Qu, R 2010) presentan en su trabajo un modelo híbrido de programación entera y búsqueda de variables por vecindario para solucionar este tipo de problemas altamente restringidos. En su trabajo se parte de la solución del problema entero únicamente con las restricciones fuertes y con un subconjunto de restricciones débiles, posteriormente por medio de la búsqueda por vecindario se adicionan restricciones para encontrar soluciones factibles, costearlas y acercarse al óptimo. En el trabajo de Chiaramonte et al (Chiaramonte, 2008) se presenta un modelo de optimización basada en la heurística de negociación competitiva de agentes, que se enfoca en las preferencias de cada enfermero. Estos métodos son de gran utilidad ya que permiten modelar los intereses y pertinencia de cada uno de los empleados que se deben asignar a cada turno y actividad. En los trabajos mencionados, no se tiene en cuenta la variabilidad de la demanda ya que se enfocan en una asignación en la gran mayoría de las áreas del hospital, pero sería de gran importancia establecer la influencia de la decisión si se incorporase dicho parámetro, ya que podría ser decisivo para cambiar la asignación final.

Aguirre et al (S. Aguirre, Amaya, C, Velasco, N & Castaño, F, 2008) presentan una revisión de la literatura en que se listan diferentes métodos para la solución del problema de asignación. El núcleo de lo presentado en dicho trabajo, es un modelo de asignación como un problema de programación lineal para las dos etapas mencionadas anteriormente (planeación y programación). En la primera parte se propone un modelo con una sola función objetivo, minimizar el número de empleados asignados en un turno específico para un día específico, cumpliendo con la demanda correspondiente. Para la segunda etapa se propone un modelo multiobjetivo, en el que se tiene en cuenta los costos por número de empleados, las preferencias de cada empleado por una tarea específica y la eficiencia al ubicar a un empleado en una actividad específica. En este trabajo se asume la demanda del centro de urgencias como parámetro determinístico, y al no tener en cuenta la variabilidad de dicho parámetro se puede incurrir en errores de asignación, especialmente para sistemas de la naturaleza del analizado, que tiene alta

volatilidad y variabilidad a lo largo del tiempo de observación. Es importante tener en cuenta la variación de la demanda para poder tomar decisiones precisas y útiles. El trabajo mencionado servirá de base para lo desarrollado en el presente artículo, ya que se tomarán parte de la información empleada y algunos de sus resultados para el análisis objetivo correspondiente.

Ahmed et al (Ahmed, 2009)proponen un método de solución para el problema de asignación de personal en el área de urgencias de un hospital en Kuwait, utilizando simulación y optimización. En su metodología se incluyen dos fases de solución ya que es un problema con función objetivo estocástica y restricciones tanto determinísticas como estocásticas. En primera fase se resuelve el problema con realizaciones de las variables aleatorias y en la segunda fase se escoge, por búsqueda local, la mejor solución. Esta aproximación es bastante interesante ya que involucra el componente aleatorio característico de este tipo de sistemas. El trabajo de Ahmed se utilizará como fuente para el desarrollo de la aproximación al planteamiento de optimización del problema que se aborda en el presente proyecto. En secciones posteriores se presentará la formulación de un problema de optimización basado en el artículo citado anteriormente.

En el presente trabajo se abordará el problema de asignación utilizando simulación de eventos discretos y una aproximación a optimización estocástica.

2. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE URGENCIAS

Para poder dar solución al problema, se definió un sistema de urgencias tipo basado en la información presentada en trabajos anteriores sobre un sistema real de urgencias en un hospital de la ciudad de Bogotá. Gutiérrez(Gutiérrez, 2005)presenta un modelo de simulación de eventos de la unidad de urgencias de un hospital de tercer nivel en Bogotá, así como la caracterización de llegada de pacientes, diagramas de flujo de proceso y tiempos de servicio para los procedimientos que se llevaban a cabo en ese momento. Por su parte Venegas (Venegas, 2008) presenta una nueva caracterización del mismo sistema modificando procesos según las reglamentaciones internas del centro. En su trabajo se encuentra el modelo de simulación para la evaluación de ciertos parámetros del sistema como tiempos en cola y congestión del sistema. Con base en la información de los dos trabajos citados anteriormente, se presentará la descripción del sistema, diagramas de flujo de pacientes, tiempos de servicio y generalidades que soportarán la simulación del sistema y el análisis propuesto, para el problema de asignación de personal.

Los pacientes que ingresan al sistema pasan por procedimientos diferentes, dependiendo de su edad, gravedad y tipo de afiliación a servicios de salud. Estos procesos se presentan en las figuras 1 a 3, que incluyen los diagramas de flujo general, pacientes pertenecientes al Plan obligatorio de salud (POS) y medicina pre-pagada (PRE).

En primera instancia se atiende a los pacientes de mayor gravedad o Triage 1(T1), si no es clasificado como tal, entra a ser valorado según su tipo de afiliación a servicios de salud. Los pacientes con POS entran a proceso de Triage, donde se evalúa la gravedad, de Triage 2 a 4 (T2, T3 o T4),y se solicita autorización para el ingreso. Posteriormente se realiza la consulta médica, si es autorizado por su entidad promotora de salud (EPS), y se determina la necesidad de realización de exámenes adicionales, remisión a Unidad de Cuidados Intensivos (UCI), observación en urgencias o salida del paciente.

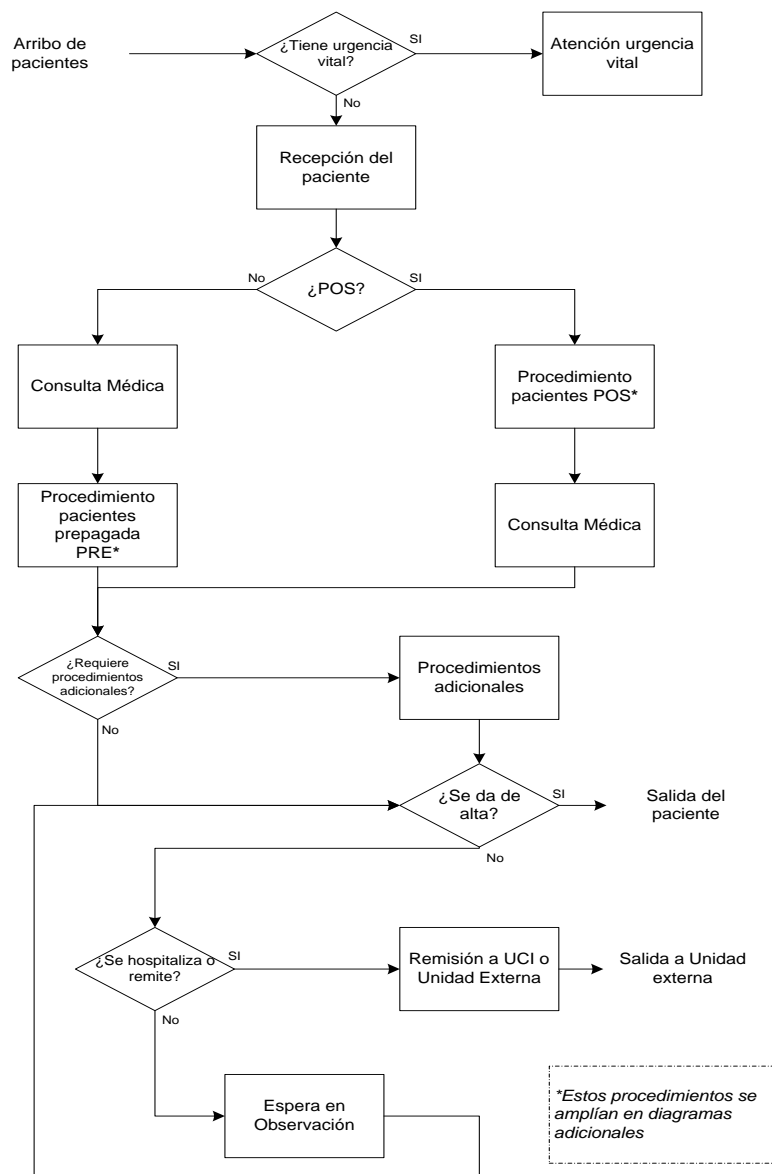


Figura 1. Diagrama de flujo de pacientes en la unidad de urgencias

En el proceso de autorización POS el paciente es clasificado según su edad y dirigido a sala de espera hasta que pueda pasar al Triage respectivo, en el que se asigna la gravedad del paciente en los niveles correspondientes según la reglamentación interna. Como política del hospital, los pacientes con T4 se deben derivar a otros hospitales de segundo y primer nivel donde se les puede dar la atención requerida o tramitarle una cite para que sea atendido por consulta externa, ya que su gravedad no requiere atención prioritaria. Finalizado este proceso, el paciente se dirige a la ventanilla de autorizaciones para validar el ingreso frente a la EPS correspondiente. Si el paciente es autorizado se prosigue a consulta médica, de lo contrario se debe remitir a algún otro hospital que le pueda prestar el servicio. El diagrama del procedimiento mencionado anteriormente se presenta en la Figura 3.

Los pacientes PRE no pasan a Triage sino que ingresan a consulta médica, posteriormente hacen su respectivo proceso de autorización y confirmación de datos. Finalmente, si han recibido autorización de su EPS pueden pasar a consulta médica en la que se le realizan los exámenes y tratamientos correspondientes, tal y como se mencionó para los pacientes POS. El procedimiento para este tipo de pacientes es presentado en el diagrama de la Figura 2.

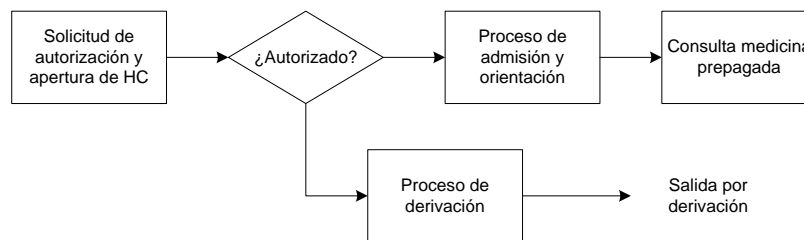


Figura 2. Diagrama de flujo para atención de pacientes con medicina pre-pagada (PRE)

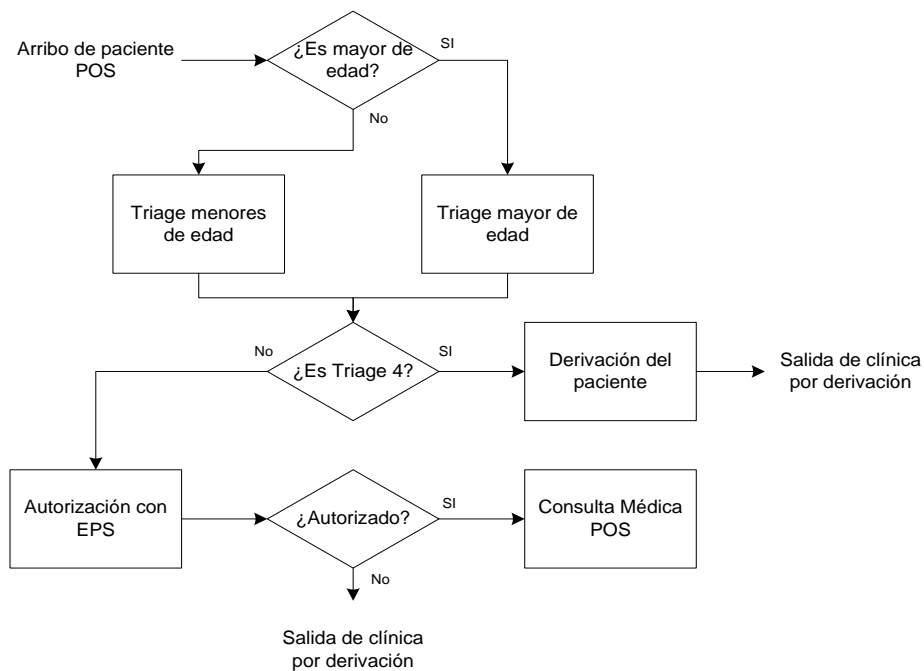


Figura 3. Diagrama de flujo para pacientes POS

2.1 CARACTERIZACIÓN DE TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA

Los tiempos de servicio utilizados en el presente trabajo se obtuvieron del proyecto presentado por Venegas (Venegas, 2008), en ese artículo se explican la metodología de obtención y las pruebas de bondad para cada uno. Dado que el alcance del proyecto no es modelar un sistema idéntico al del departamento de urgencias real de un hospital, sino acercarse al funcionamiento de este departamento para un hospital típico de la ciudad de Bogotá, no se tomaron datos y por tanto los tiempos de cada uno de los procesos que se llevan a cabo se tomaron del trabajo citado anteriormente.

Tabla 1. Tiempos de actividades principales dentro del centro de urgencias.

Actividad	Pediatrco	adultos	unidades
Recepcion e informacion	-6 + ERLA(0.604,12)		min
Consulta POS	TRIA(10,17.2,23.5)	TRIA(7,9,13)	min
Consulta	TRIA(8.12,15.6,27.3)	TRIA(10,15,21.2)	min
observación	TRIA(120,180,420)		min
reanimación	TRIA(20,30,50)		min
Traslado a uci o piso	TRIA(2,4.8,7)		h
Triage Adultos	TRIA(3.2,4,5.8)		min
Triage Niños	TRIA(4,5.33,7)		min
Autorizacion y apertura HC	TRIA(0.5,4,14)		min
Admision y orientacion a sala	TRIA(3,5,10)		min
Traslado paciente	TRIA(2,4.8,7)		h
observacion	TRIA(120,180,420)		min

La demanda de servicios del centro de urgencias del hospital fue tomada también del trabajo de Venegas, se ajustó y la tasa de arribos, por hora, durante un día promedio es presentada en la Figura 4.

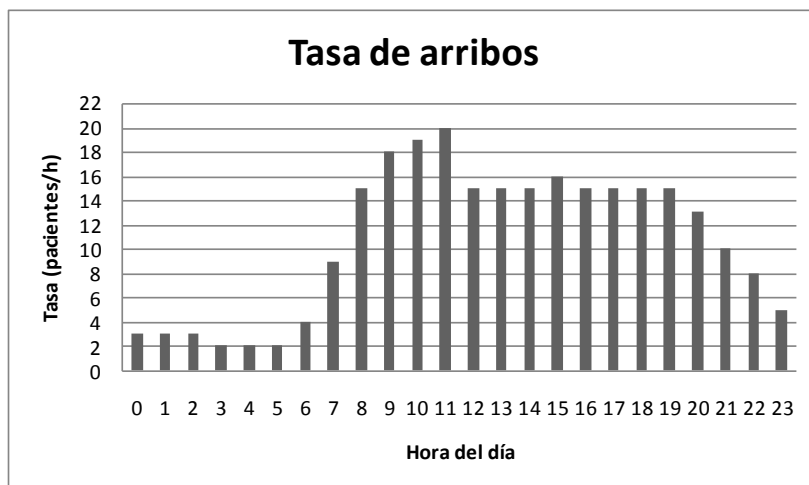


Figura 4. Tasa de arribos por hora

Estas tasas fueron ajustadas tomando también la información reportada en el trabajo de Arjona (Arjona, 2010), que presenta un análisis de congestión en la unidad de urgencias de un hospital de la ciudad. En la sección posterior se presenta la estrategia de solución y el ajuste respectivo de la información previa, principalmente de tasas de arribo.

Los datos adicionales de edad y triage de los pacientes fueron tomados del modelo de simulación de Venegas. Las tablas correspondientes se presentan de la 2 a la 4.

Tabla 2. Probabilidad de cada triage para los pacientes.

Triage	Porcentaje
1	0,0055
2	0,3885
3	0,4996
4	0,1064

Tabla 3. Probabilidad de edad del paciente.

Edad	Porcentaje
adultos	0,646
Pediatría	0,354

Tabla 4. Porcentaje de tipo de afiliación.

Tipo de afiliación	Porcentaje
POS	48,36%
PRE	51,64%

2.2 NIVEL DE PERSONAL

En cuanto a recursos humanos, se utilizaron los correspondientes al artículo de Aguirre (S. Aguirre, Amaya, C, Velasco, N & Castaño, F, 2008), en que se optimizaba el personal para el sistema objetivo del presente trabajo. La disposición de personal y las actividades respectivas se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5. Actividades y personal requerido.

Actividad	Cargo requerido
Triage	Enfermera Jefe
Consulta Adultos	Médico General o Médico Especialista
Consulta Niños	Médico Pediatra
Reanimación Adultos	Médico Especialista
	Enfermera
Reanimación Niños	Médico Pediatra
	Enfermera

La cantidad de personal necesario en el sistema se tomó del resultado de la optimización lineal de Aguirre(S. Aguirre, 2008). Se tomaron tres horarios a lo largo del día (mañana (M), tarde (T) y noche (N)) y se tomó la asignación para cada horario en cada día de la semana. Estos datos se presentan en las Tabla 6 y **Tabla 7**, en la Tabla 8 se presentan las horas de inicio de cada uno de los turnos.

Tabla 6. Cantidad de Médicos Generales y Especialistas por turno y día.

Día	General			Especialistas		
	M	T	N	M	T	N
Lunes	11	8	7	4	3	2
Martes	9	7	5	3	3	2
Miércoles	9	7	5	3	3	2
Jueves	9	7	5	3	3	2
Viernes	9	7	5	3	3	2
Sábado	8	6	5	3	3	2
Domingo	8	6	5	3	3	2

Tabla 7. Cantidad de Médicos Pediatras por turno y día.

Día	Pediatra		
	M	T	N
Lunes	7	6	4
Martes	7	6	4
Miércoles	7	6	4
Jueves	7	6	4
Viernes	7	6	4
Sábado	6	4	4
Domingo	6	4	4

Tabla 8. Hora de inicio de cada turno.

Turno	Hora inicio
Mañana	6:00
Tarde	13:00
Noche	20:00

3. MODELO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Basado en los diagramas de flujo anteriores se construyó un modelo de simulación en Arena®, de tal forma que se pudieran especificar los procesos, decisiones y tiempos que se llevan a cabo en la unidad de urgencias de un hospital de la ciudad. Así mismo se utilizó la descripción de demanda y nivel de personal presentados previamente.

Conforme al comportamiento observado en otros centros médicos, se ajustó la demanda por día según la relación de personal requerido para cada uno. En dicho ajuste se tomó un día tipo como martes a viernes y se ajustaron las demandas de los días lunes, sábado y domingo. En principio se tomaron como procesos de arribos Poisson, lo que quiere decir que se usaron las tasas de arribo para generación de tiempos entre llegadas exponenciales. La información de demanda se incorporó al modelo mediante el módulo Schedule del software empleado para el modelamiento.

Cada uno de los elementos del personal se modeló como un recurso (módulo Resource en Arena) con capacidad basada en Schedule.

3.1 ESTADÍSTICOS DE INTERÉS

Principalmente se tomaron los estadísticos de tiempo en el sistema y cantidad de personas en el sistema (PIP), y se realizaron las réplicas necesarias para obtener niveles de error aceptables de tal forma que se pudiera realizar el análisis de sensibilidad propuesto. El análisis del efecto de la variabilidad de los parámetros de demanda se presentará en secciones posteriores junto con optimización de escenarios.

Tiempo en el sistema

$$\frac{\sum_i W_i}{N} \quad (1)$$

Donde W_i es el tiempo que tarda un paciente dentro del sistema y N el número de pacientes.

Dentro del programa de simulación se definió esta expresión como un Tally (promedio sobre el número de entidades).

Número de pacientes en el sistema (PIP)

$$\frac{\int_0^T L(t)dt}{T} \quad (2)$$

Donde $L(t)$ es el número de pacientes dentro del sistema en cada instante de tiempo y T es el tiempo total de simulación. Este estadístico es de tipo Time persistent, así se definió en el programa de simulación.

Adicionalmente, para el análisis posterior, se tomaron los máximos de tiempo en el sistema y PIP en el modelo.

3.2 LONGITUD DE SIMULACIÓN, TIEMPO DE CALENTAMIENTO Y NÚMERO DE RÉPLICAS

Basado en Banks et al (Banks, 2010), se estableció la longitud de simulación y en número de réplicas a realizar. Se asumió un criterio inicial para tomar la decisión de un error menor al 5% de valor del estimador, ya que permite obtener una estimación precisa.

Para el tiempo de calentamiento se corrió una simulación de un mes y 10 réplicas, se graficó el promedio suavizado (mediante promedios móviles) del tiempo en el sistema de cada entidad para las 10 réplicas y se notó que, aunque la variabilidad es bastante amplia, el sistema se estabiliza al primer día. Según Banks, el tiempo de simulación debería ser inicialmente diez veces el tiempo de calentamiento, por tanto se tomó este tiempo como parámetro inicial. Sin embargo se observó un comportamiento cíclico en el estadístico de prueba, debido a las características propias del sistema. Se encontró una longitud de ciclo aproximada de 24 horas, por tanto el análisis propuesto previamente se debe ajustar con el objetivo de obtener realmente la estimación del tiempo a partir del cual se estabiliza el estimador. Para tal fin se llevó a cabo una modificación del método de Welch, propuesto previamente por Banks, en la que se incluye el comportamiento cíclico presente en el sistema. Esta variación al método de Welch consiste en calcular el promedio del estadístico para cada ciclo y graficarlo para todos los ciclos recogidos en la simulación. Posteriormente se realiza una suavización por promedios móviles de tal forma que se pueda estimar un número de ciclo a partir del cual se estabilice el parámetro de interés. Finalmente se traduce el número de ciclo a tiempo, conociendo la longitud de cada ciclo (Law, 2000).

Basado en la modificación del método de Welch, se encontró que el sistema era estable desde los primeros ciclos, por lo que se tomó cercano a un ciclo de calentamiento. Después de correr la simulación con las réplicas y los

tiempos de calentamiento y total escogidos, se notó que el error no era inferior al porcentaje requerido, por lo que se decidió ampliar el tiempo de recolección hasta llegar a un mes y un número de réplicas de 30.

3.3 RESULTADOS PRELIMINARES

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la simulación con la demanda observada del departamento de urgencias, que como se mencionó antes, se basó en el trabajo de Venegas y se ajustó con la asignación de Aguirre.

Tabla 9. Resultados iniciales.

	Promedio	HW 95%	Máximo
Tiempo en el sistema (h)	0,8598	0,0043	2,6899
Número de pacientes	11,064	0,09	38

Se puede observar que no hay congestión en el sistema, ya que los niveles de PIP promedio y máximo son relativamente manejables. Esto se debe a que la situación inicial, de cantidad de recursos, se basó en la solución del problema de optimización lineal para asignación de personal presentado por Aguirre. Es importante destacar que dado que en dicho trabajo se resolvió el problema desde el enfoque determinístico, no se tuvo en cuenta la variabilidad de los parámetros de demanda al servicio de urgencias.

El no tener en cuenta dicho factor, puede hacer que el sistema sea inestable frente a la presencia de variabilidad alta en la cantidad de pacientes que llegan a solicitar el servicio durante un día, lo cual implica que la asignación puede no ser útil en este tipo de situaciones. Si se presenta alta variabilidad, se esperaría que la asignación actual no sea suficiente para responder a la demanda y este problema se expresaría en altos tiempos de servicio, congestión en el sistema y utilización significativamente alta de recursos, generando fatigas y mala prestación del servicio.

Como análisis de estabilidad de la asignación frente a cambios de variabilidad de la demanda al servicio, se propone alterarse parámetro utilizando distribuciones de probabilidad de los tiempos entre arribos con mayor y menor variabilidad que la escogida en primera instancia. Este análisis y sus resultados se presentarán y discutirán en la sección siguiente.

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A VARIABILIDAD DE DEMANDA

Dado que el problema de asignación puede estar sujeto a la variabilidad de diferentes parámetros entre los que se encuentra la demanda, para el desarrollo de este trabajo es importante centrarse en el efecto de la variabilidad de la tasa de arribos de los pacientes al sistema. En gran parte de la literatura revisada, se habla de asignación y

modelos empleados para asignación y programación de recursos en el sector hospitalario, pero se obvia el comportamiento variable que puede tener la demanda, es decir no siempre se va a contar con la misma tasa de arribo de pacientes al sistema de urgencias, ya que esto puede variar por hora, por día, incluso por mes y temporadas. Es por esto que se decidió tomar diferentes valores de índice de variación en demanda y analizar la estabilidad de la asignación frente a dichos cambios.

Como análisis complementario, se analizó la variación que se presenta al asumir tasas de arribo en ciertas divisiones del día, es decir, este parámetro se puede analizar por hora, por un periodo de varias horas en el día o por día. Se decidió esto ya que, según la información obtenida, el perfil de tasas de arribo tiene un cambio significativo durante el día, y la asignación puede verse afectada según la manipulación que se haga de las mismas. En el trabajo de asignación analizado (S. Aguirre, 2008), se tomó una tasa de arribo por intervalos equivalentes al turno establecido para los empleados en el sistema, en el presente trabajo se tomaron diferentes divisiones de tasas de arribo en un día y se diferenciaron los días de la semana según la información hallada para el sistema.

4.1 DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO ENTRE ARRIBOS COMO PRIMERA FUENTE DE VARIACIÓN

En primera medida se partió de la solución al problema lineal de asignación de personal, basado en el trabajo de Aguirre. Con la cantidad de personal y con la demanda observada en el sistema, después del ajuste mencionado con anterioridad, se corrió la simulación. Para incorporar el factor de variabilidad de la demanda se tomaron diferentes valores de coeficiente de variación sobre el tiempo entre arribos de pacientes al sistema y se realizaron las simulaciones correspondientes. Adicionalmente, se tomaron diferentes divisiones de intervalos de tiempo durante un día, para analizar la variación de la demanda a lo largo del día y su efecto en la congestión del sistema.

El coeficiente de variación fue escogido como medida de variabilidad ya que es indicador de la relación entre desviación estándar y media (Walpole, 2012). Este estimador se describe según la ecuación 3.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

Es importante aclarar que aunque el coeficiente de variación es sensible a cambios de signo y valores pequeños de escala (cambios en unidades), es decir medias o desviaciones cercanas a cero, en este caso es útil ya que se trata de medias de tiempos entre arribos que, por su naturaleza, no toman valores negativos y si se usan en unidades adecuadas pueden dar valores que no se acercan demasiado a cero. En el libro *Factory Physics* (Hopp, 2008) se describe una escala de coeficientes de variación para estabilidad de tiempos de producción en general, se

presentan como bajos los coeficientes menores a 0,7; medios los que se encuentran entre 0,7 y 1,3 y los que superan el último valor son considerados con variación significativamente alta. Como aclaración, dichos intervalos son enfocados a procesos productivos en general y por tal motivo se espera que variaciones relativamente altas se tomen como muy superiores; para el caso de la distribución de tiempos entre arribos en un sistema tan volátil como el del servicio de urgencias, se podría esperar valores mayores. No hay un estimado de cuán volátil puede ser la demanda en una unidad de urgencias, pero se espera, analizando el contexto del sector salud en el país, que sea bastante alta.

Para la división del día en intervalos se tomó la división base de Aguirre (S. Aguirre, 2008), que consistía en los turnos mencionados anteriormente (3 turnos); se adicionó la estimación de la tasa de arribos por hora (24 intervalos) y una estimación de la tasa de arribos como única durante el día. Esto se hizo ya que no estimar muy bien la tasa de arribos en una hora, o pretender unirla en horas incorrectas puede llevar a la sobre o sub-estimación de la misma y generar problemas en la solución final, lo que posiblemente comprometería la calidad del servicio prestado por la institución correspondiente, poniendo en riesgo la vida de los pacientes o, de otra forma, generaría costos excesivamente altos e innecesarios. Para conducir este análisis se realizaron pruebas manteniendo las tasas de arribo en cada uno de los intervalos, y se modeló un proceso de arribos Poisson no homogéneo. En este proceso se consideran tiempos entre arribos exponenciales con las tasas correspondientes a cada intervalo.

Los valores de coeficientes de variación escogidos, los intervalos y los estadísticos de interés se presentan en las Figura 5Figura 7. Adicionalmente se presentan los resultados de cada estadístico para cada una de las divisiones en intervalos (tasa promedio por hora, turno o día).

4.1.1 Resultados para tasas por hora

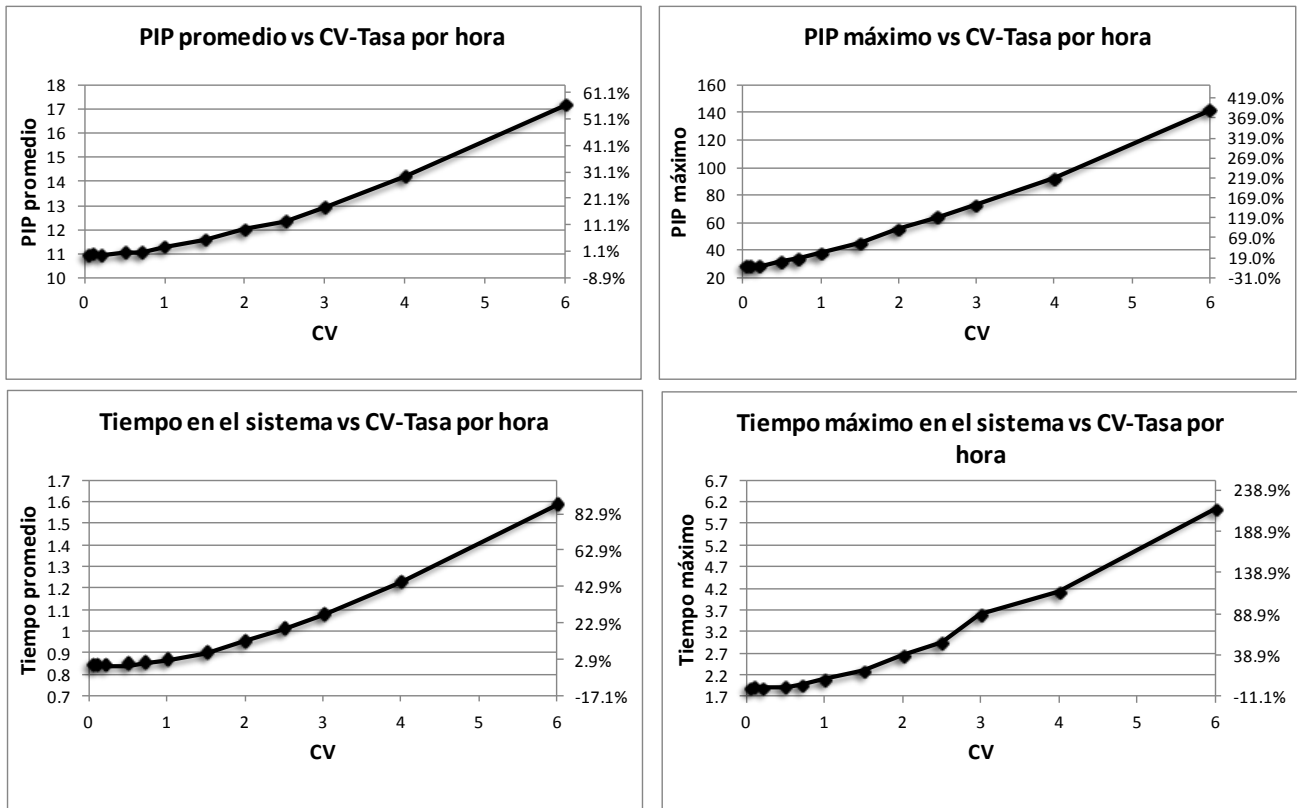


Figura 5. Resultados en tasas por hora. En el eje izquierdo se presenta el valor y en el derecho el cambio porcentual sobre el valor base, sin variación.

De la Figura 5 se puede observar que en la vecindad de valores de coeficientes cercanos a cero, el promedio del número de pacientes en el sistema es estable, mientras que cuanto más se aumenta la variación en la demanda del servicio de urgencias, la cantidad de pacientes llega a alcanzar valores hasta en un 60% mayor que el caso base (sin variación). Analizando el efecto de la variación de demanda sobre el máximo número de pacientes en el sistema, se evidencia un comportamiento similar al anterior descrito, en que para valores bajos de variación, el cambio es inferior al 5%, mientras que para valores superiores de CV, el cambio llega a ser cercano al 400%. Esto se debe en parte a que para el máximo de personas en algún momento de la simulación existe una mayor volatilidad que para su promedio. El máximo de los promedios del número de pacientes en el sistema tiene un comportamiento muy parecido al del número de pacientes promedio.

En cuanto al tiempo de permanencia de los pacientes en el sistema, se puede observar un perfil con características equivalentes el del PIP promedio y máximo PIP.

4.1.2 Resultados para tasas por turno

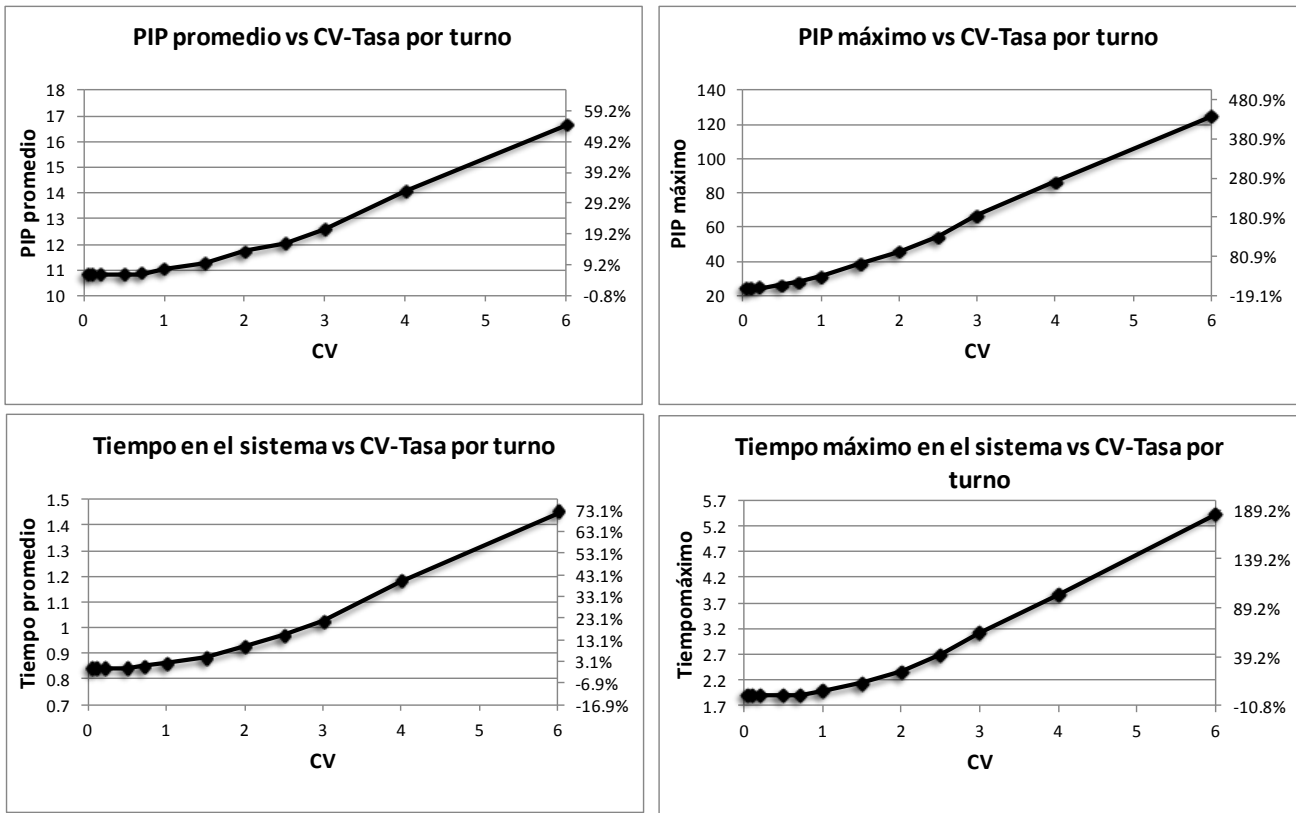


Figura 6. Resultados en tasas por turno. En el eje izquierdo se presenta el valor y en el derecho el cambio porcentual sobre el valor base, sin variación.

En la serie de gráficas que se presentan en la Figura 6, se observa un comportamiento bastante similar al descrito para el perfil del número de pacientes y tiempo en el sistema, manteniendo aumentos a medida que se incrementa la variación de la tasa de demanda. Se puede observar el comportamiento característico que en los valores de poca variabilidad en tasa de demanda los estadísticos estimados se mantienen muy cerca, mientras que hacia valores intermedios de variabilidad se comienza a percibir un incremento leve; para valores altos y extremos de variabilidad se observa un incremento significativamente grande, similar al comentado en las series respectivas para la división de tasas de llegada por hora.

No es conveniente realizar una comparación de estos escenarios, de división de tasas de llegada por turno y hora, ya que el método de generación de arribos incluye un error, que varía dependiendo del número de intervalos en que se divide la tasa de llegada en el día. Este error se analizará más adelante con las observaciones generales correspondientes. Sin embargo se esperaba que la división de tasas por turno, ya que tienen un menor número de intervalos que la división por hora, tuviese menor sensibilidad al aumento de variación y los resultados refuerzan dicha hipótesis.

4.1.3 Resultados para tasa única diaria

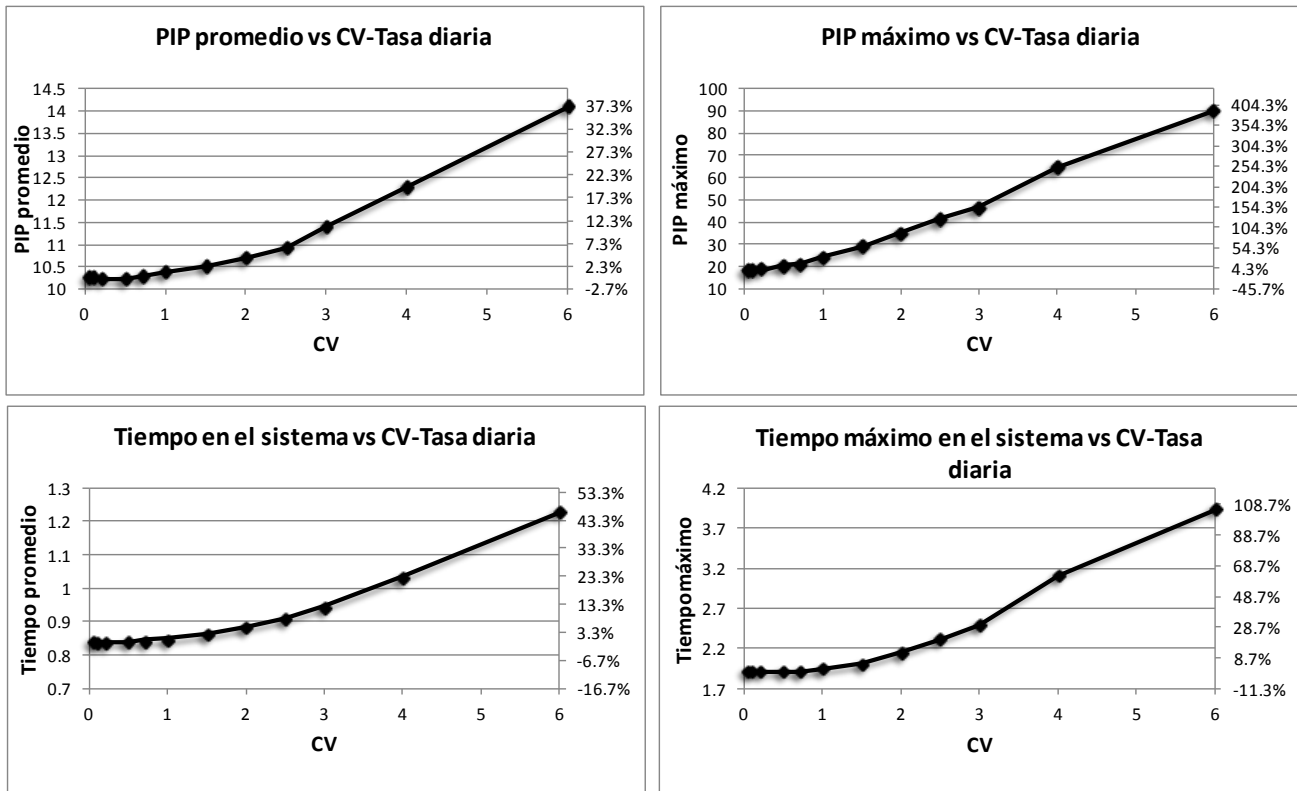


Figura 7. Resultados tasa única diaria. En el eje izquierdo se presenta el valor y en el derecho el cambio porcentual sobre el valor base, sin variación.

En todos los resultados obtenidos se puede observar un comportamiento similar, en principio, para valores pequeños de variación se puede ver que el valor de los estadísticos se ubica en un punto muy cercano, lo cual indica estabilidad del sistema. A medida que la variación del tiempo entre arribos aumenta, sin importar si se trata de tasas por hora, por turno o únicas por día, los estimadores aumentan de valor significativamente. Por ejemplo, para el valor del PIP en el caso de tasas de arribo por hora, el cambio entre el promedio de los escenarios con muy poca variación y el de mayor valor llega a ser cercano al 60%. Mayor efecto se puede observar en el cambio del máximo nivel de pacientes en el sistema cuando se compara el escenario de menor variación con el de mayor variación evaluada, pues alcanza a ser superior al 400%. De manera similar se comporta el tiempo de servicio evaluado, en el que las diferencias entre los escenarios de menor y mayor variación puede alcanzar valores superiores al 200%. Este comportamiento se observa también en los casos de tasa única por día y tasa por turno, con diferencias en magnitud y rangos en que se mueven los estadísticos planteados que van decreciendo conforme el número de intervalos en que se divide la tasa de arribos de los pacientes decrece.

Los resultados expuestos refuerzan la hipótesis inicial en la que se planteaba que cuanto mayor es la dispersión o desviación de los datos de demanda (tiempos entre arribos) al sistema de urgencias, mayor congestión y por tanto

mayor error en la asignación conseguida por medio de métodos determinísticos, que no incluyen para nada la naturaleza estocástica de la demanda en este tipo de sistemas. Los errores mencionados pueden producir congestión en el sistema, una carga mayor para el personal, fatigas y una mala prestación del servicio médico, perjudicando la salud de los pacientes y comprometiendo sus vidas.

4.2 SUPOSICIÓN DE TASAS DE ARRIBO POR INTERVALOS COMO SEGUNDA FUENTE DE VARIACIÓN

Como análisis adicional se quiso observar el cambio en las características del sistema bajo suposición de diferentes comportamientos de demanda en el día. Se realizó un análisis comparativo de los valores del número promedio de pacientes en el sistema, número máximo de pacientes, tiempo promedio en el sistema y tiempo máximo, para los tres escenarios planteados como posibles divisiones de la demanda diaria de atención en el centro de urgencias. Se tomaron los escenarios de suposición de perfil de tasas de arribo diferentes en cada hora, cada turno y una única tasa promedio diaria. Los resultados comparativos se presentan en las figuras 8 y 9.

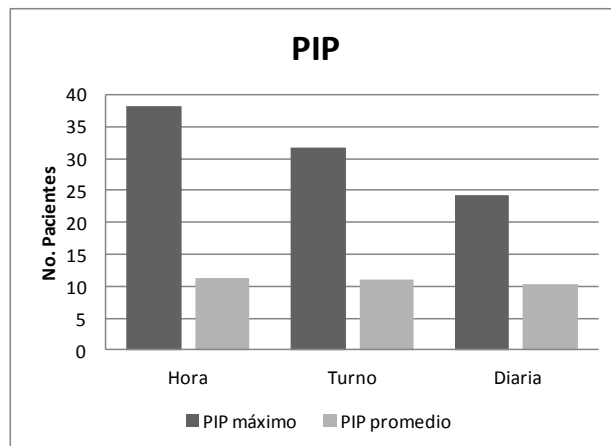


Figura 8. Comparación del PIP promedio y máximo en cada división de tasa de arribos.

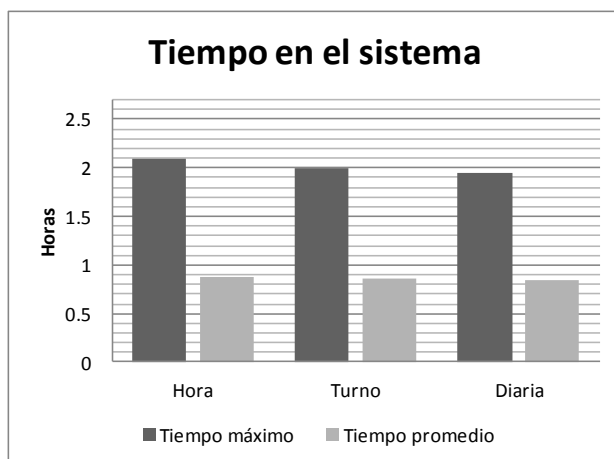


Figura 9. Comparación de tiempo en el sistema para cada división de la tasa de arribos.

Se observa que hay diferencias significativas en los estadísticos de interés para cada una de las divisiones de tasa diaria de arribos (HW de 0,08 para el PIP en cada una). Estas diferencias pueden generar error en las estimaciones del número óptimo de personal asignado para las operaciones de la unidad de urgencias, ya que se puede sobre o subestimar los parámetros de demanda y concluir erróneamente. En las gráficas presentadas se puede observar un orden numérico del estadístico PIP para las diferentes divisiones, éste no corresponde necesariamente a un error sistemático al asumir diferentes divisiones de tasas en el día, es más bien resultado de los valores de demanda como tal. Es decir, para otro perfil de demanda se puede tener mayor valor del estadístico en la división por turnos que por horas.

4.3 OBSERVACIONES GENERALES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Es importante aclarar que para poder realizar el análisis anterior, se tuvo que generar arribos que no se comportan como un proceso de Poisson no homogéneo. Debido a que la generación de variables aleatorias que cumplan con esta última característica lleva a cabo un procedimiento bastante complejo y objeto de investigaciones mucho más profundas y rigurosas (Gerhardt, 2009)(Nelson, 2009), de las que todavía no se ha establecido un algoritmo preciso y puntual, dicho proceso se encuentra fuera del alcance del presente trabajo y se incurrió en un error en la generación de los tiempos entre arribos. El error mencionado se involucró en todos los escenarios (incluido el de generación de arribos Poisson, es decir con $CV=1$, que se hizo con distribución exponencial) lo que hace que se tenga una estimación trasladada hacia arriba en una misma proporción, por lo que se elimina el ruido de este error y se puede analizar el aporte por el aumento en la variación del parámetro de demanda como tal. Adicionalmente y según los resultados presentados, el aporte de dicho error es mucho menor que el aporte del aumento en la

variación de la demanda. En la Tabla 10y en lafigura 10 se presenta la comparación de la estimación de los estadísticos para procesos de Poisson no homogéneos bajo el método propio de Arena® (utilizando el módulo Schedule) y los generados mediante el algoritmo empleado para este trabajo.

Tabla 10. Errores estimados por aproximación utilizada.

	Hora	Turno	Día
Pip promedio (tasa máx. 20)	11,02%	12,45%	11,13%
Tiempo en el sistema (tasa máx. 20)	0,26%	0,61%	0,13%
Pip promedio (tasa máx. 40)	3,28%	6,43%	5,70%
Tiempo en el sistema (tasa máx. 40)	0,75%	2,22%	0,21%

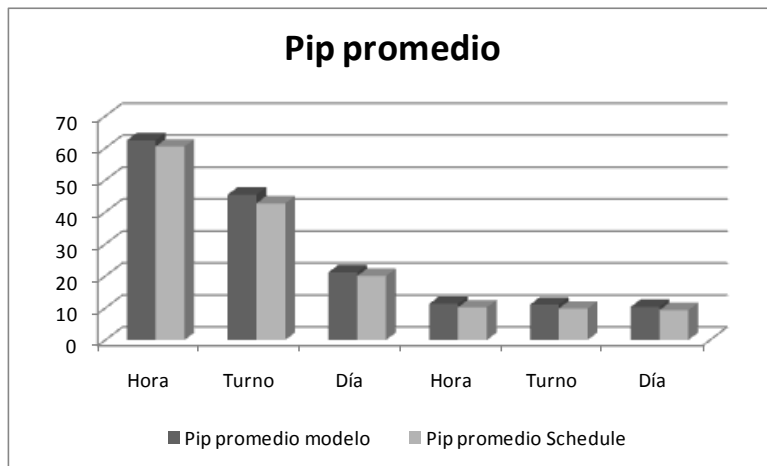


Figura 10. Comparación de PIP promedio de los dos métodos de generación. Las tres barras de la derecha son para tasa máxima de 20, las de la izquierda de 40 personas/hora.

En la tabla 10 se observa un error de entre el 11 y 12% para el número de pacientes promedio, este error disminuye cuando la tasa máxima de llegada de pacientes aumenta, pues pasa a ser cercano al 6%. Esto se debe a que el error incurrido por el método de generación de los arribos (sin el Schedule) se mantiene en su valor numérico, mas no en proporción. Por lo que a mayor valor, menor es la proporción del error incurrido. Esta observación se refuerza en el perfil presentado en la figura 10, en que el aumento en el estadístico para cada una de las divisiones de tasa de arribos en un día (por hora, turno o día) es proporcional al aumento en la tasa máxima de arribos y mientras que el error cometido decrece.

5. ASIGNACIÓN DE PERSONAL BAJO CARACTERÍSTICAS ESTOCÁSTICAS

En las secciones anteriores se presentó el resultado de la asignación de personal bajo un modelo de programación lineal, en el que se tenían tanto restricciones como función objetivo de tipo determinística (S. Aguirre, 2008). Se presentó también un análisis de sensibilidad del sistema bajo la asignación previa frente a cambios en la variabilidad de la distribución de demanda, tanto a lo largo del día (diferentes divisiones del comportamiento de la tasa diaria) como en variación de parámetros como tal (aumento o disminución de la variabilidad de la distribución de tiempos entre arribos). Se encontró que sistemas como el evaluado puede ser altamente sensible a cambios en variabilidad de demanda y se observó que para optimizar recursos se debe tener en cuenta la variabilidad de los datos.

En esta sección se propone dar solución al problema de asignación de personal, teniendo en cuenta la naturaleza de la demanda, que no se conoce con exactitud, sabiendo que el factor de incertidumbre puede jugar un papel importante en el comportamiento adecuado del sistema. Se solucionará el problema haciendo uso de Optquest de Arena, una herramienta para optimización estocástica, que incorpora simulación y algoritmos de búsqueda local. Para más información se sugiere remitirse al manual de Arena y sus complementos.

En optimización estocástica se puede tener tanto objetivo como restricciones en función de variables aleatorias o de realizaciones del sistema a evaluar. Es común encontrar problemas mixtos en los que se tiene función objetivo o restricciones determinísticas y algunas restricciones estocásticas o viceversa. Ahmed et al (Ahmed, 2009) presentan un método de solución de problemas de asignación en unidades de urgencias mediante optimización estocástica, haciendo uso de simulación y optimización al mismo tiempo. En dicho trabajo se plantea una función objetivo de costos y una restricción fuerte de máximo tiempo de espera de pacientes con cierta característica. La formulación presentada en ese trabajo es bastante útil ya que permite minimizar costos de asignación sin desmejorar la atención hasta alcanzar niveles superiores a lo establecido. En el presente trabajo se tomará parte de esa formulación, en la que se quiere tener el mínimo de recursos programados sin permitir que el tiempo de espera o de atención del paciente promedio (tiraje 2 y 3) aumente de forma considerable.

Para la formulación se tienen en cuenta el conjunto de médicos de cada especialidad a asignar en cada turno, el conjunto de turnos y el de especialidades. Las formulaciones que se presentan en esta sección son un ejemplo de lo que puede ser la utilización de optimización estocástica como opción para solucionar el problema de asignación de personal, por tanto aparecen constantes como tiempo máximo de espera (1 hora), número máximo del promedio de pacientes en el sistema (15) que son arbitrarias y corresponden a los resultados previos de simulación del sistema.

Función objetivo:

$$\min \sum_{i \in \text{Especialidad}} \sum_{j \in \text{Turnos}} \text{Médicos}_{i,j}$$

Minimizar el número total de médicos asignados en cada turno para cada especialidad.

-Restricción de tiempo de servicio (antes de observación):

$$T_{\text{sistema promedio}} \leq 1 \text{ hora}$$

-Restricción de número promedio de pacientes en el sistema:

$$N_{\text{úmero promedio de pacientes en el sistema}} \leq 15$$

Los resultados del problema bajo la formulación anterior son presentados en las figuras Figura 11 a Figura 13.

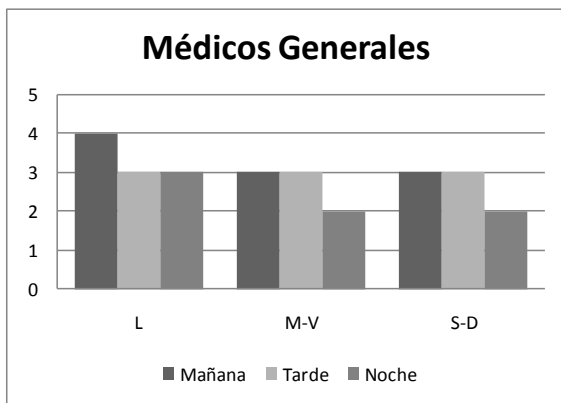


Figura 11. Asignación de médicos generales.

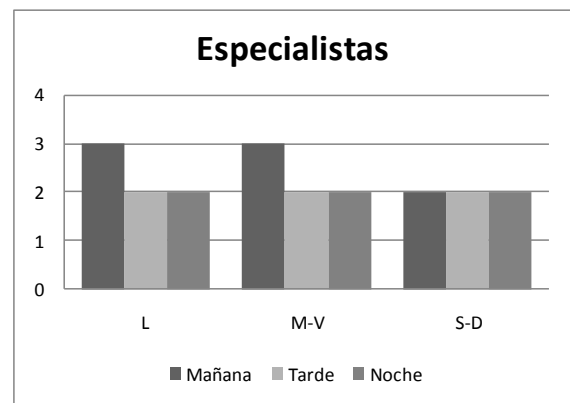


Figura 12. Asignación de médicos especialistas.

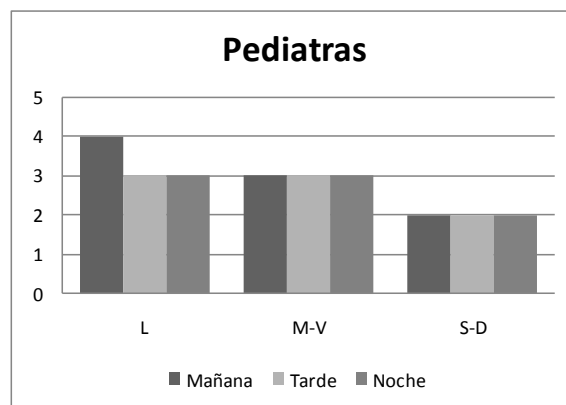


Figura 13. Asignación de médicos pediatras.

Tabla 11. Función objetivo y estadísticos para la mejor solución encontrada.

	Valor	HW
Total Médicos	163	--
PIP	12,0893	0,05
Tsistema	0,9495	0

En este tipo de problemas se pueden utilizar formulaciones alternas en las que las variables estocásticas pueden formar parte de la función objetivo. Esta formulación alterna puede ser como la que se presenta a continuación, de forma general.

Función objetivo:

$$\min Tsistemapromedio$$

s. a.

-Restricción de presupuesto o cantidad máxima de recursos:

$$\sum_{i \in \text{Especialidades}} \sum_{j \in \text{Turnos}} \text{Médicos}_{i,j} \leq \text{CantidadMáximaRecursos}$$

-Restricción de número promedio de pacientes en el sistema:

$$\text{Númeropromediodepacientesenelsistema} \leq \text{MaximoPacientes}$$

En la restricción de presupuesto, el lado izquierdo de la desigualdad se puede multiplicar por el costo de contratación de los médicos y el lado derecho de la desigualdad debería cambiarse a las unidades de dinero respectivas.

Los resultados para esta formulación se presentan en las figuras 14 a 16. Se asumió un máximo de recursos de 150 (este valor no es el total de médicos, corresponde a la suma de los controles de las variables del modelo), número que guarda proporción al máximo de personal en el trabajo de Aguirre previamente mencionado. El número promedio de pacientes en el sistema se restringió a 15.

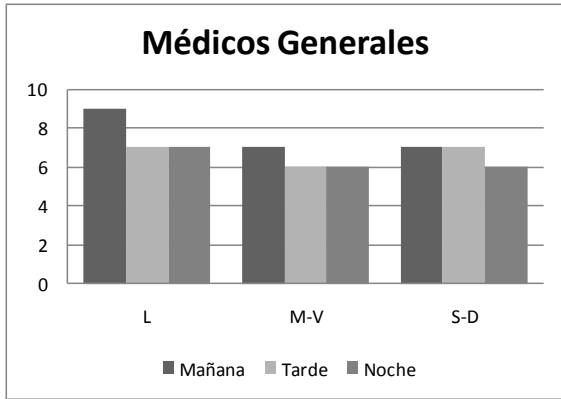


Figura 14. Asignación de médicos generales.

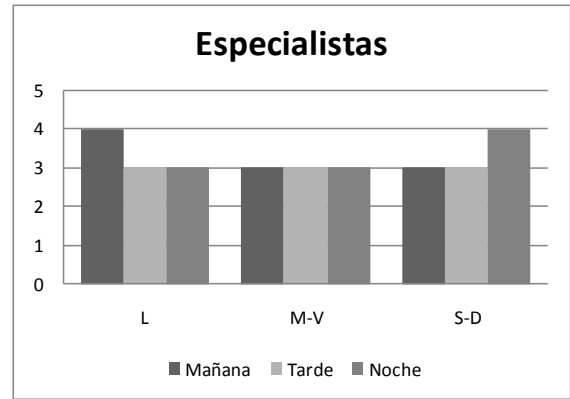


Figura 15. Asignación de médicos especialistas.

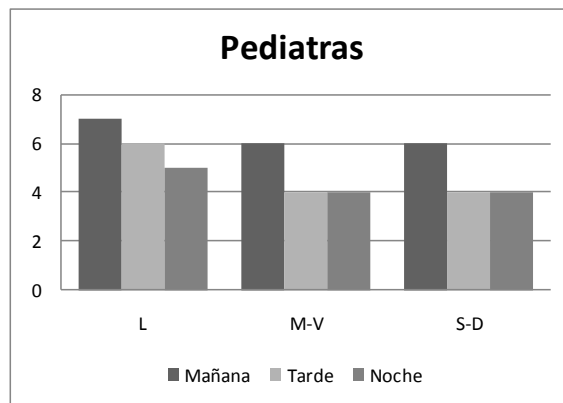


Figura 16. Asignación de médicos pediatras.

Tabla 12. Número de recursos asignados y estadísticos de interés para la mejor solución encontrada.

	Valor	HW
Total Médicos	307	--
PIP	11,2486	0,04
Tsistema	0,8661	0

Debido a la complejidad del problema de interés, puede que las soluciones encontradas no sean óptimas, pero dan un buen acercamiento a una solución interesante al problema. Los alcances del trabajo no contemplan la implementación algoritmos específicos de búsqueda de soluciones para programación estocástica, por lo que se sugiere como trabajo futuro. Sin embargo las soluciones presentadas en esta sección pueden ser mejores a las iniciales presentadas en la descripción del sistema, ya que disminuyen la cantidad de recursos asignados y permiten un buen desempeño del sistema, con tiempos de servicio adecuados y costos por contratación mucho menores que los iniciales.

5.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA SOLUCIÓN

Como análisis adicional se quiso observar la robustez de una de las soluciones encontradas por medio de optimización estocástica. Es de esperarse que al realizar un análisis de sensibilidad similar al presentado en la sección anterior se obtenga un comportamiento parecido al observado previamente, ya que en la solución al problema mediante optimización estocástica se usó un nivel de variación específico y por tanto su sensibilidad frente a cambios en variación será similar al caso base descrito en la sección del análisis anterior correspondiente.

En esta sección se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de igual forma que en la sección anterior, para una de las soluciones encontradas por medio de optimización estocástica. Se utilizó la solución de menor cantidad de personal (primera solución presentada, 163 en total). Los resultados se presentan a continuación.

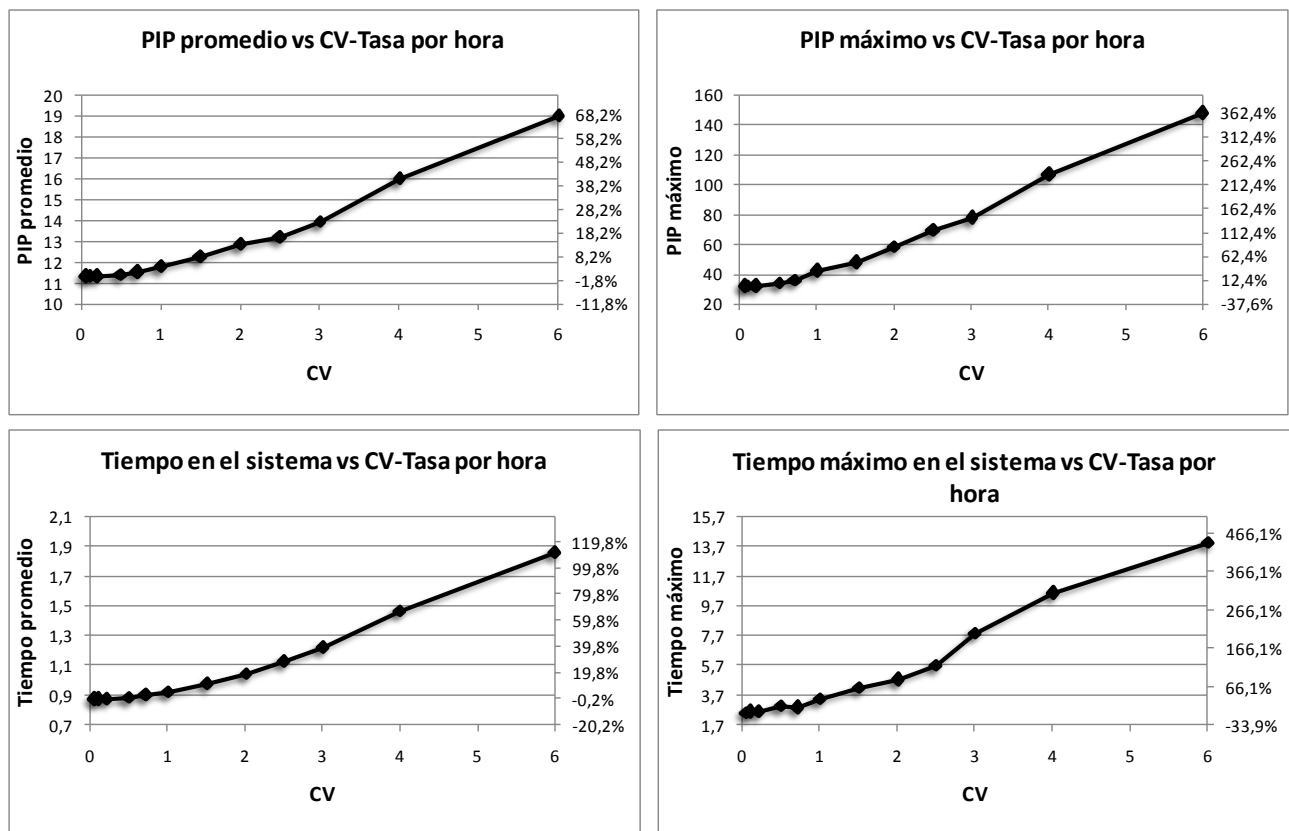


Figura 17. Sensibilidad solución por optimización estocástica. Tasa promedio por hora.

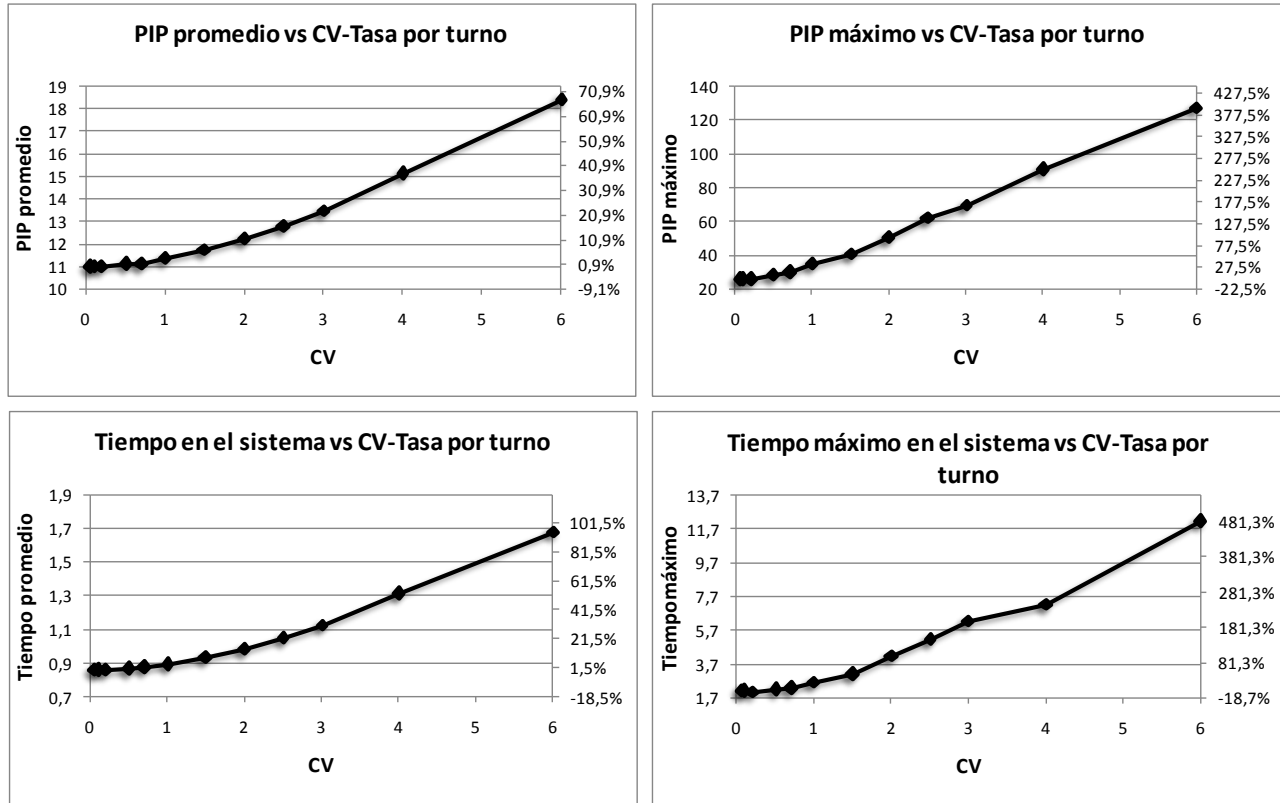


Figura 18. Sensibilidad solución por optimización estocástica. Tasa promedio por turno.

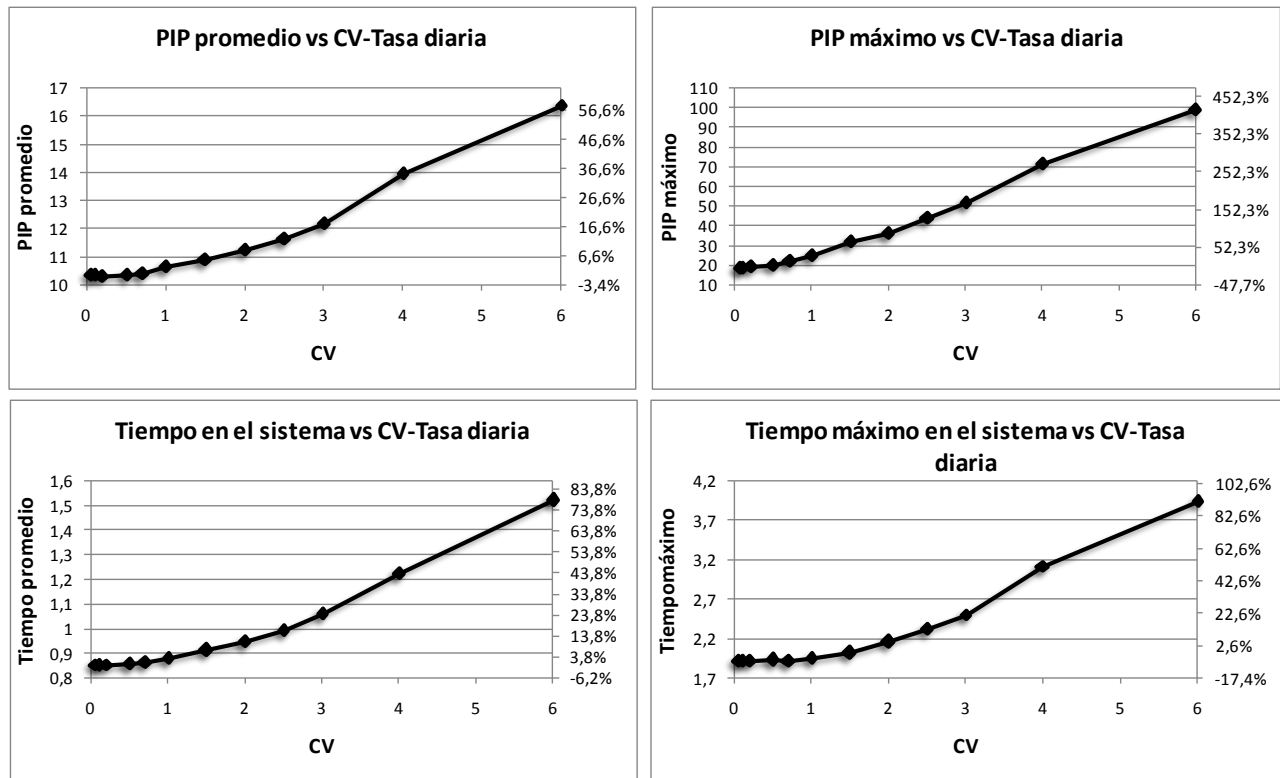


Figura 19. Sensibilidad solución optimización estocástica. Tasa promedio diaria.

Se puede observar que el comportamiento en general se sigue de la misma forma que en el análisis realizado a la solución base. La diferencia es que, aunque en los dos casos se observa un crecimiento exponencial, en el caso de la solución estocástica se presenta un crecimiento con mayor velocidad, ya que tiene en cuenta menor cantidad de personal. Lo anterior implica que se requiere saber de antemano la variación estimada de la demanda, en este caso, para poder llevar a cabo un buen procedimiento de asignación que permita mantener al sistema en niveles de servicio y atención deseados.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad sobre los parámetros de demanda a la unidad de urgencias, con el fin de determinar la pertinencia de resolver el problema de asignación de personal bajo el enfoque de optimización lineal. Se analizaron dos factores fuente de variabilidad: suposición de división de tasas de arribo al día y variación intrínseca de la demanda por su distribución de probabilidad. Se encontró que es determinante la forma en que se asume la tasa de demanda, ya que se pueden presentar diferencias en los estadísticos de interés que pueden ser afectadas incluso por la naturaleza de las tasas de demanda.

En cuanto a la principal fuente de variabilidad analizada, respecto a la distribución que puede tener la demanda, se observó que si la caracterización de la tasa de entrada indica un nivel medio o alto del coeficiente de variación para la distribución de tiempos entre arribos, es necesario utilizar modelos alternativos de optimización, como programación estocástica, para resolver el problema de asignación de manera adecuada. El no tener en cuenta el factor de incertidumbre sobre la demanda puede conllevar errores del orden del 70% en promedio o superiores (200%) para estadísticos de tipo máximo.

Tabla 13. Resumen del análisis de sensibilidad realizado. Se presentan los errores relativos a mínima variación.

	Coeficientes de variación		
	Bajo	Medio	Alto
Tiempo en el sistema	<1%	1-10%	>10%
Tiempo máximo en sistema	<5%	5-15%	>15%
PIP del sistema	<1%	1-10%	>10%
PIP máximo	<5%	5-25%	>25%

Los errores en asignación se pueden traducir a congestión en el sistema y aumento significativo de cargas para el personal. Adicionalmente se puede tener un tiempo de servicio demasiado grande, perjudicando el servicio prestado y por tanto la salud y la vida de los pacientes. Por otra parte, si se asignan demasiados recursos se

tendrían utilizaciones muy bajas y se enfrentaría una situación de altos costos, lo cual puede perjudicar la operación de los hospitales a mediano y largo plazo.

A partir del procedimiento de optimización, mediante el uso de OptQuest, se encontró la asignación de personal adecuado para el sistema. Se formularon dos alternativas con diferencias en función objetivo y restricciones, y se encontraron soluciones buenas para el problema de asignación, que representan bajo costo y condiciones por encima de las aceptables de servicio en urgencias. Como trabajo futuro se propone ajustar los métodos de obtención de soluciones por medio de programación estocástica, ya que se pueden obtener mejores soluciones para el sistema.

Se propone también una mayor profundidad en la investigación de métodos para generación de tiempos entre arribos en procesos *No- Poisson* y *No-Estacionarios*, ya que existen numerosos sistemas en el sector de salud que pueden tener dicho comportamiento, y su correcta generación permitirá la reducción de errores en asignación de personal, así como las consecuencias de los errores, que se mencionaban anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, S. (2008). *Planeación y programación del personal del servicio de urgencias en un centro médico*. Magister en Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Aguirre, S., Amaya, C, Velasco, N & Castaño, F. (2008). A linear programming model for staff planning and scheduling in a hospital emergency department.
- Ahmed, M. A., T. (2009). Simulation optimization for an emergency department healthcare unit in Kuwait *European Journal of Operational Research*, 198(3), 936-942.
- Arjona, P. (2010). *Reducción de niveles de congestión del departamento de urgencias en un hospital privado de Bogotá mediante el mejoramiento del proceso de hospitalización*. Ingeniero Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Banks, J. C., J; Nelson, B; Nicol, D. . (2010). *Discrete-Event System Simulation* (5th ed.): Prentice Hall.
- Burke, E., Curtois, T, Post, G, Qu, R & Veltman, B. (2008). A hybrid heuristic ordering and variable neighbourhood search for the nurse rostering problem *European Journal of Operational Research*, 188(2), 330-341.
- Burke, E., Li, J & Qu, R (2010). A hybrid model of integer programming and variable neighbourhood search for highly-constrained nurse rostering problems. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 484-493.
- Chiaromonte, M. C., L (2008). An agent-based nurse rostering system under minimal staffing conditions. *International Journal of Production Economics*, 114(2), 697-713.
- Ernst, A., Jiang, H, Krishnamoorthy, M & Sier, D. . (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research* 1(153), 3.
- Gerhardt, I. N., B. (2009). Transforming renewal processes for simulation of nonstationary arrival processes. *Infirms Journal on Computing*, 21.
- Gutiérrez, A. (2005). *Modelo por simulación de eventos discretos del servicio de urgencias de un hospital*. Ingeniera Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Hopp, W. J. (2008). *Factory physics* (third ed.). New York: McGraw Hill.
- Law, A. K., W. . (2000). *Simulation modeling and analysis*: Mc Graw Hill.
- Nelson, B. G., I. (2009). Modeling and simulating nonstationary arrival processes to facilitate analysis.
- Puente, J., Gómez, A, Fernández, I & Priore, P (2009). Medical doctor rostering problem in a hospital emergency department by means of genetic algorithms *Computers & Industrial Engineering* 56(4), 1232-1242.
- Spyropoulos, C. (2000). AI planning and scheduling in the medical hospital environment *Artificial Intelligence in Medicine* 20(2), 101-111.

Venegas, F. (2008). *Modelo de simulación de eventos discretos del servicio del departamento de emergencias para un hospital*. Ingeniero Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá.

Walpole, R. (2012). *Probability & statistics for engineers & scientists* (9th ed.). Boston: Prentice Hall.



NIT: 860.007.386-1

**SISTEMA DE BIBLIOTECAS
IDENTIFICACIÓN TRABAJO DE
GRADO**

FECHA DE ELABORACIÓN		
DD	MM	AAAA
17	01	2012

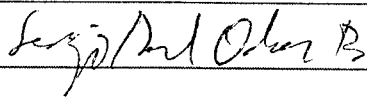
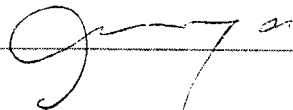
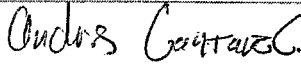
I. IDENTIFICACIÓN AUTOR(ES) DEL TRABAJO DE GRADO					
CÓDIGO	DOCUMENTO DE IDENTIDAD		APELLIDOS	NOMBRES	CORREO ELECTRÓNICO
	TIPO	NÚMERO			
200611788	CC	1010178169	Ochoa Buitrago	Sergio Daniel	sd.ochoa40@uniandes.ec
	CC				
	CC				
	CC				
	CC				
	CC				
PROGRAMA	Pregrado		ENTREGÓ FORMATO:		
FACULTAD	Facultad de Ingeniería		<input checked="" type="checkbox"/> SB-10 "Entrega trabajo de grado y autorización de uso a favor de la Universidad de los Andes". Documento con el cual, el autor permite que su trabajo sea		
DEPARTAMENTO	Departamento de Ingeniería Industrial		SB-10: utilizado por la Universidad, para fines de consulta y de mención en sus catálogos bibliográficos, tanto físicos como en línea.		
I.1 IDENTIFICACION DE TRABAJO DE GRADO PARA DOBLE TITULACIÓN					
PROGRAMA	No Aplica		TESIS PARA DOBLE TITULACIÓN:		
FACULTAD	No Aplica		<input type="checkbox"/> Si el trabajo de grado presentado aplica para obtener dos (2) titulaciones, por favor marque esta casilla y diligencie la información de esta sección.		
DEPARTAMENTO	No Aplica				
2. INFORMACIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO					
TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO: ...					
DESCRIPCIÓN FÍSICA		MATERIAL ACOMPAÑANTE (Cantidad):			FECHA DE ELABORACIÓN
Número de páginas:	36	Casetes Audio:	Discos compactos:		DD
Ilustraciones:		Casetes Video:	Diapositivas:		MM
		Disquetes:	Otros: ¿Cuáles?		AAAA
10 12 2011					
*RESUMEN DEL TRABAJO DE GRADO: En este trabajo se presenta un análisis de sensibilidad, frente a la incertidumbre en la demanda, para la toma de decisión en el problema de asignación de personal en la unidad de urgencias de un hospital tipo en Bogotá. Se enfoca en la primera etapa de asignación, en la que se quiere determinar el número de médicos y personal de apoyo necesarios para una correcta prestación del servicio.					
OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO: Verificar, mediante un análisis de sensibilidad, el efecto de inclusión de variabilidad de la demanda sobre un sistema de urgencias con asignación base.					
METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE GRADO: Modelamiento del sistema de urgencias tipo, mediante simulación de eventos discretos. Análisis de sensibilidad de asignación base frente a variaciones de demanda.					
CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE GRADO: La variabilidad es un factor importante para realizar asignación de personal en unidades de urgencias, para no cometer errores que tengan consecuencias para el sistema los errores cometidos se pueden traducir en congestión del sistema y aumento significativo del tiempo de servicio y cargas para el personal. Adicionalmente un detrimento de la calidad del servicio y riesgos para la salud de los pacientes.					
*PALABRAS CLAVES (TEMAS) DEL TRABAJO DE GRADO: Urgencias, hospital, asignación, personal, variabilidad, simulación de eventos discretos, programación estocástica, variación.					

ACUERDOS DE CONFIDENCIALIDAD: NO TIENE ACUERDO(S) TIENE ACUERDO(S)

Si selecciona tener acuerdo de confidencialidad, por favor diligencie el siguiente cuadro:

Persona natural o jurídica	Desde			Hasta		
	DD	MM	AAAA	DD	MM	AAAA

3. FIRMAS

AUTORES (Nombre completo)	*FIRMAS
Sergio Daniel Ochoa Buitrago	
DIRECTORES / ASESORES (Nombre completo)	*FIRMAS
Ciro Alberto Amaya	
JURADO / LECTOR (Nombre completo)	*FIRMAS
Fabian Andrés Castano Giraldo	

Las firmas de Autor y Director/Asesor son obligatorias. Si tiene inconvenientes con el registro de la firma del Jurado/Lector, deberá tramitar ante la respectiva Facultad la autorización para registrar las firmas de pares o un sello que justifique la ausencia de la firma faltante.

SB-09

[Verificar Información](#) [Imprimir](#)



ENTREGA EJEMPLAR TRABAJO DE GRADO Y AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Yo Sergio Daniel Ochoa Buitrago , mayor de edad, vecino de Bogotá D.C., identificado con la Cédula de Ciudadanía N° 1010178169 de Bogotá , actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado denominado: Análisis de variabilidad en asignación de personal para la unidad de urgencias de un hospital

, hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos del ser el caso, en formato digital o electrónico (CD-ROM) y autorizo a LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, usos en red, internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y tiene la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bogotá D.C., a los once 11 días del mes de enero de Dos Mil doce 20 12 .

EL AUTOR - ESTUDIANTE.

(Firma) *Sergio Daniel Ochoa B.*

Nombre Sergio Daniel Ochoa Buitrago

C.C. N° 1010178169 de Bogotá