



Simulación del flujo vehicular en el área de batey para mejorar la productividad en un ingenio azucarero

M.C. Constantino Gerardo Moras Sánchez
t_moras@yahoo.com.mx

Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de Ingeniería Industrial
Orizaba, Veracruz, México

Ing. Carolina Manrique León
carolsmile015@hotmail.com

Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de Ingeniería Industrial
Orizaba, Veracruz, México

Ing. Aldo Ortiz Nesme
aarellano72@hotmail.com

Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de Ingeniería Industrial
Orizaba, Veracruz, México

Dr. Luis Carlos Flores Ávila
lcflores@yahoo.com

Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de Ingeniería Industrial
Orizaba, Veracruz, México

Dra. María Eloísa de la Asunción Gurruchaga
Rodríguez
mgurruchaga@itorizaba.edu.mx

Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de Ingeniería Industrial
Orizaba, Veracruz, México

Resumen

Este trabajo se llevó a cabo en un ingenio ubicado al sureste de la República Mexicana, en el área de recepción de los camiones cañeros llamada "batey". En esta área la caña ingresa, se pesa, se limpia y alimenta al proceso de molienda. Se realizó un estudio comparativo usando la técnica de simulación, entre el sistema actual conformado por tres mesas alimentadoras, y tres propuestas de solución cuyo funcionamiento reside en modificar las características de las mesas, buscando incrementar la productividad del área. Los camiones cañeros que llegan al área de batey se clasificaron en tipo 1, tipo 2 y tipo 3 de acuerdo a sus capacidades, las cuales corresponden a 58 toneladas, 16-20 toneladas, y 21-42 toneladas, respectivamente. Dicha comparación se basó en los resultados promedio de tres medidas de desempeño: duración de la zafra en días, toneladas de caña entregadas durante la zafra y tiempo promedio dentro del sistema por tipo de camión. Este estudio requirió el uso del software especializado de simulación llamado ProModel, aplicando el método científico, además de herramientas como la estadística, tiempos y movimientos, etc., obteniendo resultados que ayudaron a elegir aquella alternativa de solución que mejorara en mayor grado la productividad del sistema actual.

Palabras claves: Simulación, ProModel, Productividad, Flujo vehicular.

Introducción

Las empresas tienen la necesidad de mejorar sus procesos, reduciendo tiempos y movimientos, buscando mejorar su productividad, de manera que puedan competir en el mercado, el cual se hace más exigente día tras día, debido en gran medida a los requerimientos de los clientes. Flores Ávila (2002) menciona que una industria azucarera



productiva depende del arraigo de los trabajadores a sus comunidades y permite que el consumidor mexicano tenga garantizada una oferta más competitiva, con mejores precios, mayor calidad y con productos cada vez más innovadores. En el sureste del país existen varios ingenios azucareros quienes activan significativamente la economía de la región e impactan positivamente a la sociedad. Sin embargo, la existencia de éstos no es determinante sólo para la estabilidad económica de esta región, sino para el resto de la República Mexicana. Independientemente de su impacto regional y nacional, el ingenio donde se desarrolló el proyecto fortalece su posicionamiento en el mercado y lo incrementa con herramientas cada vez más novedosas que lo sitúan entre las empresas líderes, no sólo en México, sino en América Latina.

Coss Bu (1990) menciona que para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas. Se llevó a cabo un estudio de simulación del sistema actual de área de batey y la simulación de alternativas de solución de los movimientos logísticos de los transportes de caña, donde se ocupó la metodología de simulación de Law y Kelton (2000), así como conceptos del software de simulación llamado ProModel aplicados a la entrega de caña de azúcar mencionados por Otero (2005). Una vez simuladas estas alternativas, se obtuvieron resultados de cada una de ellas y se analizaron las medidas de desempeño, con el objeto de encontrar la alternativa que permita lograr la productividad requerida por los directivos de la empresa.

Formulación del problema

Desafortunadamente, pese a su gran relevancia en el ámbito económico del país, los ingenios siguen produciendo en gran medida bajo técnicas que incorporan escaso o nulo conocimiento científico. El ingenio donde se aplicó la simulación ha realizado esfuerzos en los últimos años innovando de manera continua los procesos en la producción azucarera, fortaleciendo la competitividad como industria, promoviendo su conversión hacia unidades más modernas y tecnificadas acercándolas hacia una cultura de sustentabilidad, como señalaran Hugot (1984) y Spencer (1967).

En el área de batey de este ingenio existen varios problemas que pueden atenderse para poder incrementar la productividad y mejorar el proceso azucarero de recepción de la caña, como son espacio, tipo de maquinaria, modo de descarga, etc. Esta área está constituida por una báscula de entrada y una báscula de salida, una cola de espera y por tres mesas alimentadoras.

El proceso de entrega de caña al ingenio inicia con la llegada de los camiones cañeros tipo 1 (58 toneladas), tipo 2 (16-20 toneladas) y tipo 3 (21-42 toneladas) a la báscula digital de entrada, donde son pesados uno por uno. Si los camiones que llegan son del tipo 1 se dirigen a la ruta 2 con destino a la mesa 1, al área 1, en donde sólo descarga este tipo de camión. Si los camiones que llegan son del tipo 2 y 3, después de ser pesados, se dirigen a la ruta 1 donde se forman en una cola esperando turno. Si es el turno del camión tipo 2, éste avanza a la mesa 1, dirigiéndose a las áreas 2 y 3, la primera que encuentre disponible. Una vez que llega el turno del camión tipo 3, éste puede descargar en las mesas 2 y 3 avanzando a la primera área disponible de las mesas, las cuales son las áreas 4 y 5 (figura 1). En cada área se puede descargar un camión simultáneamente. Una vez que los tres tipos de camión han descargado la caña en las mesas, se dirigen a la báscula digital de salida para salir del batey. El tiempo de espera de estos tipos de camión en alimentar al ingenio provoca el deterioro de la calidad de la caña y la pérdida de sacarosa. La dirección del ingenio ve un área de oportunidad en el batey donde se pretende impulsar una innovación integral en el proceso de recepción, pesaje, limpieza y alimentación de materia prima al proceso de molienda.

Recolección de datos

Los datos de entrada del modelo fueron datos reales recabados durante cinco meses en el periodo de zafra 2008-2009, el cual corresponde a los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril.

Los datos recolectados son los siguientes:

- Capacidad de las mesas.
- Capacidad de los camiones cañeros.
- Horario de entrada de los camiones cañeros al área de batey.
- Horario de salida de los camiones cañeros del área de batey.
- Toneladas de caña entregadas por los camiones cañeros.



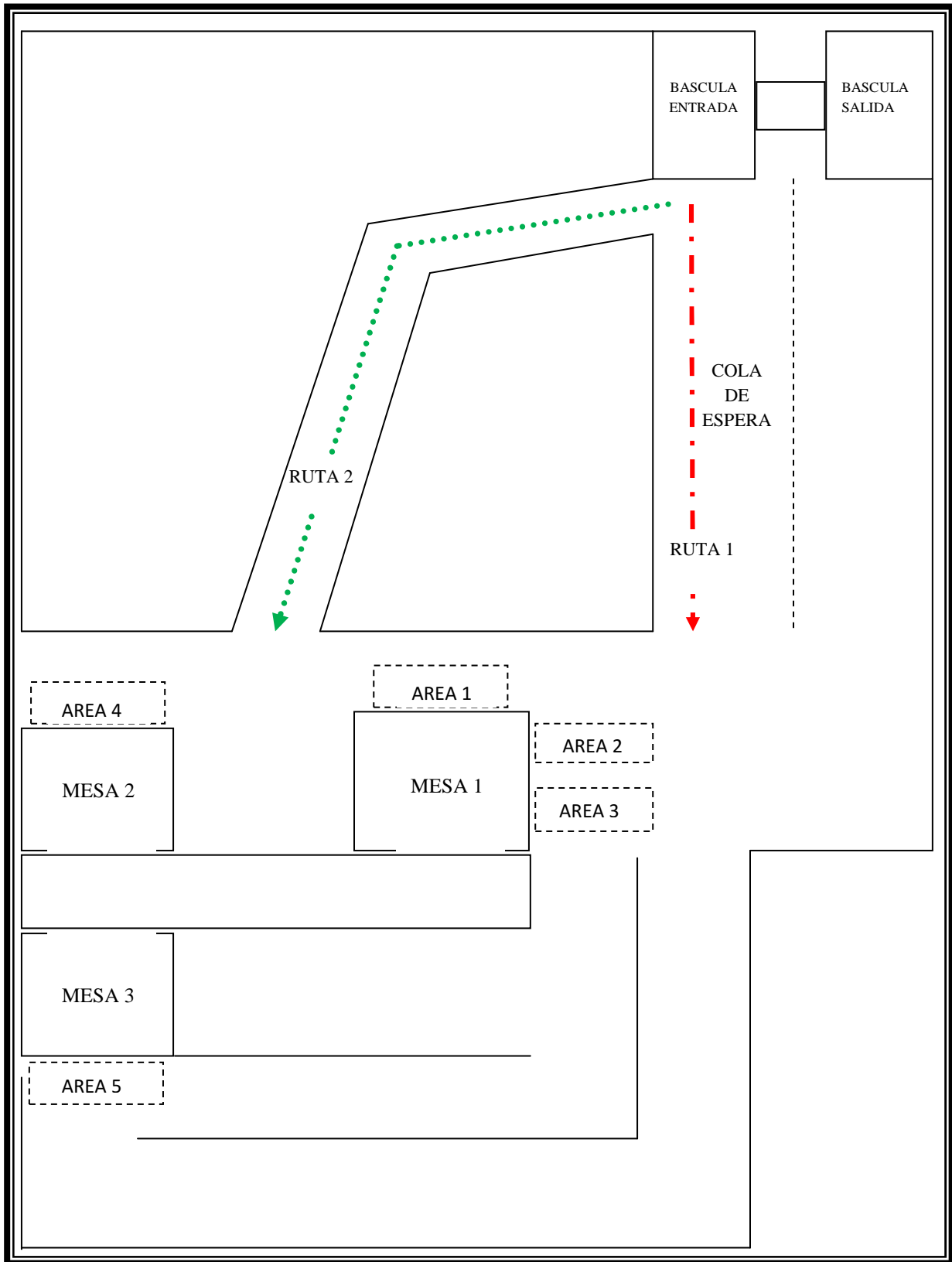


Figura 1. Representación gráfica del área actual de batey en el ingenio.



- Tiempos de descarga de caña por tipo de camión.
- Número de camiones de cada tipo.
- Tiempo de pesado en la báscula de entrada por tipo de camión.
- Tiempo de pesado en la báscula de salida por tipo de camión.

Las medidas de desempeño evaluadas con el modelo de simulación fueron:

- Duración de la zafra en días.
- Toneladas de caña entregadas durante la zafra.
- Tiempo promedio dentro del sistema del camión tipo 1 (58 toneladas).
- Tiempo promedio dentro del sistema del camión tipo 2 (16-20 toneladas).
- Tiempo promedio dentro del sistema del camión tipo 3 (21-42 toneladas).

Análisis estadístico de los datos

Para determinar si los datos recopilados se ajustaban o no a alguna función de probabilidad teórica se procedió a realizar el análisis estadístico utilizando el programa Stat:fit, incluido en las herramientas de ProModel. Se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrada, Anderson Darling y Kolmogorov-Smirnov a los datos correspondientes a la tasa de llegada de los camiones cañeros a la báscula, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.10$. Este análisis se realizó para todos los datos recolectados anteriormente mencionados.

Los resultados obtenidos reflejan que los datos recolectados no se ajustaron a ninguna distribución de probabilidad teórica que contiene el programa Stat:fit. Es por esto que se emplearon distribuciones empíricas de probabilidad, que fueron introducidas en el modelo de simulación mediante la opción ciclos de llegada.

Construcción del modelo de simulación

Se diseñó un modelo de simulación en ProModel que representa al sistema actual del área de batey en el ingenio importando la fotografía aérea del ingenio, tomándola como base y agregándole los elementos necesarios de ProModel, como son: locaciones, entidades, trayectorias, ciclos de llegada y otras características del software para su creación. Se utilizaron los datos previamente recolectados y analizados. En la figura 2 se muestra gráficamente el modelo construido del sistema actual.

Pruebas piloto.

Se realizaron varias pruebas piloto del modelo del sistema actual construido para detectar y corregir las posibles fallas que pudieran haber ocurrido durante la construcción de éste. Las pruebas piloto ayudaron a determinar si el modelo funcionaba adecuadamente, representando al sistema actual.

Validación del modelo de simulación.

Para validar que los resultados reportados por el programa de simulación representen adecuadamente al sistema real, se aplicó la prueba t-apareada con un nivel de significancia de $\alpha = 0.10$ a las siguientes tres medidas de desempeño: duración de la zafra, toneladas de caña entregadas durante la zafra y tiempo de espera promedio dentro del sistema por tipo de camión. La prueba t-apareada se describe a continuación (Law, 2000):

Se supone que X_1, X_2, \dots, X_k son observaciones de un sistema del mundo real y que Y_1, Y_2, \dots, Y_L son datos producidos por el modelo de simulación. Es necesario comparar los dos conjuntos de datos para determinar si el modelo es una representación válida del sistema. El siguiente procedimiento explica cómo hacerlo.

Se recolectan m conjuntos de datos independientes del sistema y n conjuntos de datos del modelo. Sea X_j el promedio de las observaciones en el j -ésimo conjunto del sistema, y Y_j el promedio de las observaciones en el j -ésimo conjunto de datos del modelo.



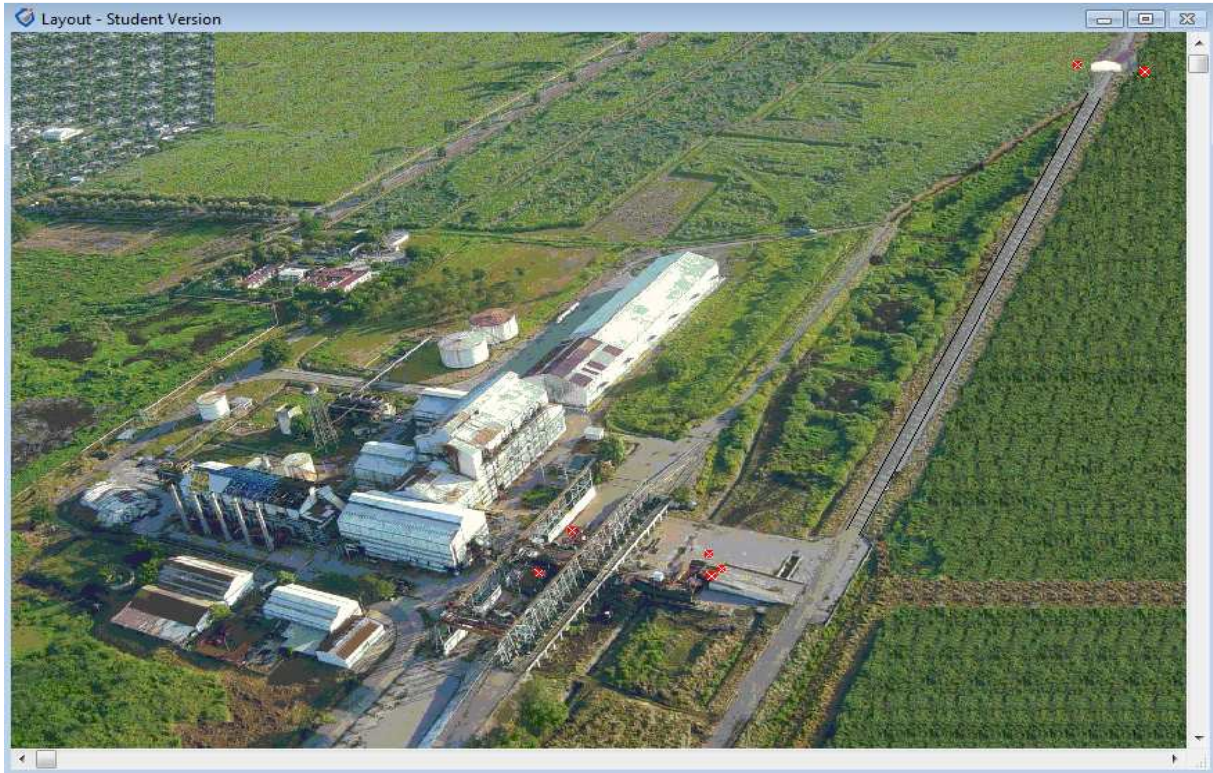


Figura 2. Modelo de simulación en ProModel del sistema actual del área de batey en el ingenio.

Las X_j son variables aleatorias IID (idénticamente e independientemente distribuidas) con media $\mu_x = E(X_j)$, y las Y_j son variables aleatorias IID (asumiendo que los n conjuntos de datos se obtuvieron de replicaciones diferentes) con media $\mu_y = E(Y_j)$, por lo que se tratará de comparar el modelo con el sistema construyendo un intervalo de confianza para:

$$z = \mu_x - \mu_y \quad (1)$$

Usando la prueba t-apareada (se requiere que $m = n$). Las ecuaciones que se usan son las siguientes:

$$Z_i = X_i - Y_i \quad (2)$$

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad (3)$$



$$\text{Vâr}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} \quad (4)$$

El intervalo de confianza es $(100(1-\alpha))$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\text{Vâr}(\bar{Z}_{(n)})} \quad (5)$$

Sea $l_{(\alpha)}$ y $u_{(\alpha)}$ el límite de confianza inferior y superior respectivamente. Si $0 \notin [l_{(\alpha)}, u_{(\alpha)}]$ entonces la diferencia observada entre μ_x y μ_y :

$$\bar{X}_{(n)} - \bar{Y}_{(n)} \quad (6)$$

Se dice que es estadísticamente significativa al nivel α . Esto es equivalente a rechazar la hipótesis nula:

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad (7)$$

En favor de la alternativa:

$$H_1: \mu_x \neq \mu_y \quad (8)$$

Si $0 \in [l_{(\alpha)}, u_{(\alpha)}]$, cualquier diferencia observada entre μ_x y μ_y no es estadísticamente significativa al nivel α y puede ser explicada por fluctuaciones aleatorias, aceptando así que el modelo es válido.

Al aplicar la prueba t-apareada a las medidas de desempeño correspondientes a la duración de la zafra, toneladas de caña entregada durante la zafra y tiempo promedio dentro del sistema por tipo de camión, se observó la inclusión del cero en los intervalos de confianza construidos, por lo que se aceptó como válido el modelo de simulación del sistema actual.

Diseño de experimentos

Para la determinación del número óptimo de replicaciones, se aplicó la ecuación que sugiere Law y Kelton (2000):

$$n * (\beta) = \min \left\{ i \geq n: t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{i}} \leq \beta \right\} \quad (9)$$

Esta ecuación se utiliza para estimar la media poblacional $\mu=E(x)$, con un error específico permitido (β), una vez que el modelo ha sido validado. Tomando como medida de desempeño la duración de la zafra, estableciendo un error



$\beta=0.5$ días, el valor de i fue incrementándose hasta obtener un número óptimo de corridas igual a 19, número que cumplió la condición establecida en la ecuación 9.

Alternativas de solución

Las alternativas de solución se propusieron en conjunto con los directivos de la empresa ya que ellos conocen mejor la funcionalidad del batey. A continuación se describen las alternativas propuestas para este estudio.

Alternativa 1

La alternativa 1 (A1) muestra el modelo de simulación en el que se han eliminado las mesas 2 y 3 del sistema actual, creándose una nueva mesa llamada mesa 2, paralela a la mesa 1. La mesa 1 no sufre ningún cambio, conservándose su capacidad de descarga de tres camiones simultáneamente. En el área 1 se descarga un camión del tipo 1 (58 toneladas), y en las áreas 2 y 3 camiones del tipo 2 (16-20 toneladas). La mesa 2 tiene capacidad de descarga de dos camiones cañeros simultáneamente, uno del tipo 3 (21-42 toneladas) en el área 4 y otro camión del tipo 2 (16-20 toneladas) en el área 5, como puede observarse en la figura 3.

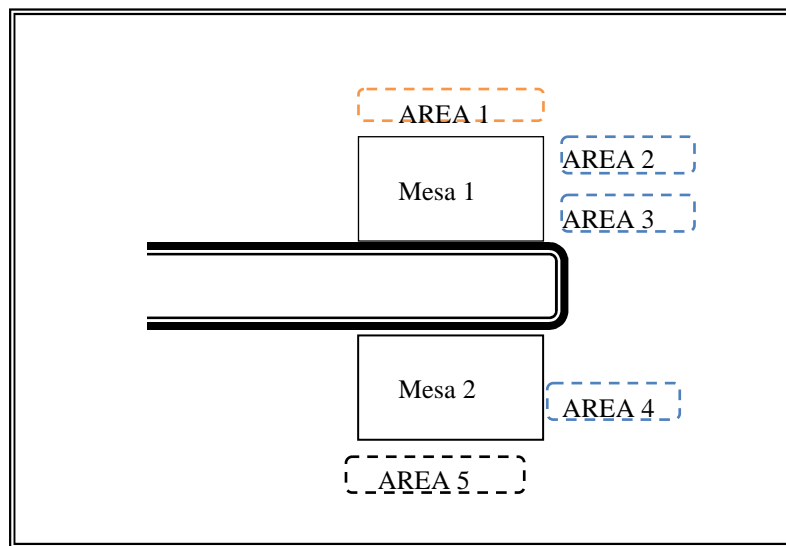


Figura 3. Representación gráfica de la alternativa 1 del área de batey.

Alternativa 2.

La alternativa 2 (A2) muestra el modelo de simulación que contiene las mesas descritas en la alternativa 1 (A1). La diferencia que existe entre la alternativa 1 y la alternativa 2 es que en la mesa 2 se agrega una capacidad más de descarga del camión tipo 2 llamada área 6. De tal manera que la mesa 1 tiene capacidad de descarga de tres camiones simultáneamente. En el área 1, se descarga un camión del tipo 1 (58 toneladas), y en las áreas 2 y 3 camiones del tipo 2 (16-20 toneladas). La mesa 2 tiene capacidad de descarga de tres camiones cañeros simultáneamente, dos camiones del tipo 2 (16-20 toneladas) en las áreas 4 y 6 respectivamente y uno del tipo 3 (21-42 toneladas) en el área 5, como puede observarse en la figura 4. En esta alternativa, debido a los cambios que se hacen en la mesa dos, se propone cambiar el porcentaje de llegadas de los camiones tipo 2 incrementándose en un 23%, mientras que el porcentaje de llegadas de los camiones tipo 3 disminuyen en un 45%. Esto provoca que se agilice el flujo vehicular de los camiones cañeros.

Alternativa 3.

La alternativa 3 (A3) muestra el modelo de simulación que contiene las mesas descrita en la alternativa 2 (A2). La mesa uno tiene capacidad de descarga de tres camiones simultáneamente. En el área 1 descarga un camión del tipo 1 (58 toneladas), y en el área 2 y área 3 camiones del tipo 2 (16-20 toneladas). La mesa dos tiene capacidad de descarga de tres camiones cañeros simultáneamente, dos camiones del tipo 2 (16-20 toneladas) en las áreas 4 y 6 respectivamente y uno del tipo 3 (21-42 toneladas) en el área 5, como puede observarse en la figura 5. Hay que hacer notar que la alternativa 3 (A3) varía con respecto a la 2 (A2) en el incremento de las llegadas de los camiones tipo 2. En esta alternativa este incremento no existe, manteniéndose las llegadas de los camiones tipo 2 igual que en el



modelo original. La disminución en el porcentaje de llegadas de los camiones tipo 3 se conserva en un 45%, igual que en la alternativa 2.

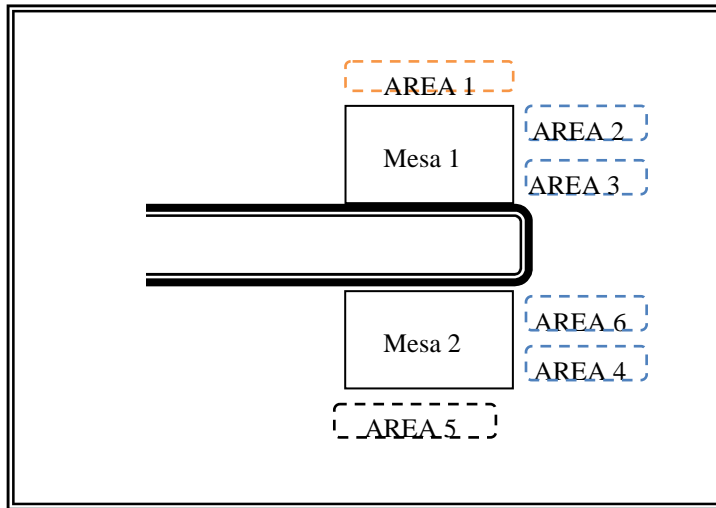


Figura 4. Representación gráfica de la alternativa 2 del área de batey.

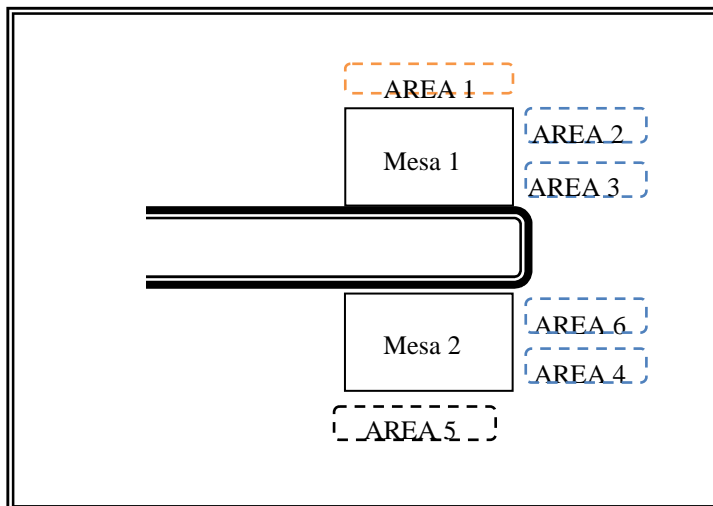


Figura 5. Representación gráfica de la alternativa 3 del área de batey.



Comparación de resultados entre cada alternativa de solución respecto al modelo del sistema actual

Después de correr 19 veces tanto el modelo del sistema actual, así como los modelos de las tres alternativas, se realizó una comparación de los resultados entre ellos, con el fin de analizar su rendimiento y determinar el mejor de todos. Dicha comparación se llevó a cabo en base a una serie de medidas de desempeño, que fueron clasificadas en tres grupos:

- Duración de la zafra.
- Toneladas de caña entregadas durante la zafra.
- Tiempo promedio dentro del sistema de entrega por tipo de camión.

Medida de desempeño 1: Duración de la zafra en el ingenio.

La primera medida de desempeño evaluada fue la referente a la duración total de la zafra, en la cual se observa el sistema actual con respecto a las alternativas propuestas (ver el gráfico 1).

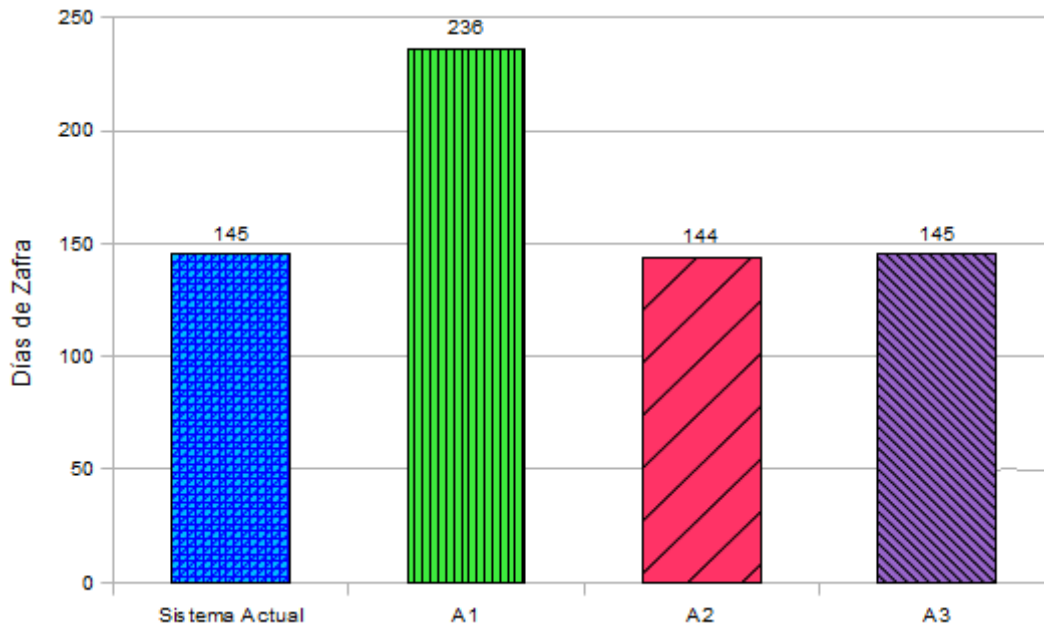


Gráfico 1. Tiempo promedio de duración de la zafra.

El gráfico 1 muestra que el tiempo promedio de duración de la zafra en el ingenio es de 145 días para el sistema actual. El análisis de las alternativas de la A1 a la A3 varió y la que arrojó un tiempo menor fue la alternativa A2 con una duración de zafra de 144 días.

Medida de desempeño 2: Toneladas de caña entregadas durante la zafra

La segunda medida de desempeño analizada son las toneladas de caña entregadas durante la zafra, la cual está relacionada con la duración total de la zafra. Esta medida de desempeño evalúa el total de caña entregada durante la zafra en el sistema actual y en las alternativas (gráfico 2).

En el gráfico 2 se muestra que el total de caña promedio es de 801,017.23 toneladas de caña durante la zafra, en el ingenio para el sistema actual. Con la aplicación de las alternativas de la A1 a la A3 varió y la que arrojó un incremento fue la alternativa A3 con un total de caña promedio de 849,126.64 toneladas de caña durante la zafra, resultando ser la mejor.



Medida de desempeño 3: Tiempo promedio dentro del sistema de entrega de caña por tipo de camión.

La tercera medida de desempeño es aquella relacionada con el tiempo promedio dentro del sistema por tipo de camión, es decir, el tiempo promedio que tarda cada tipo de camión (tipo 1, tipo 2 y tipo 3) en completar su labor dentro del sistema (gráfico 3).

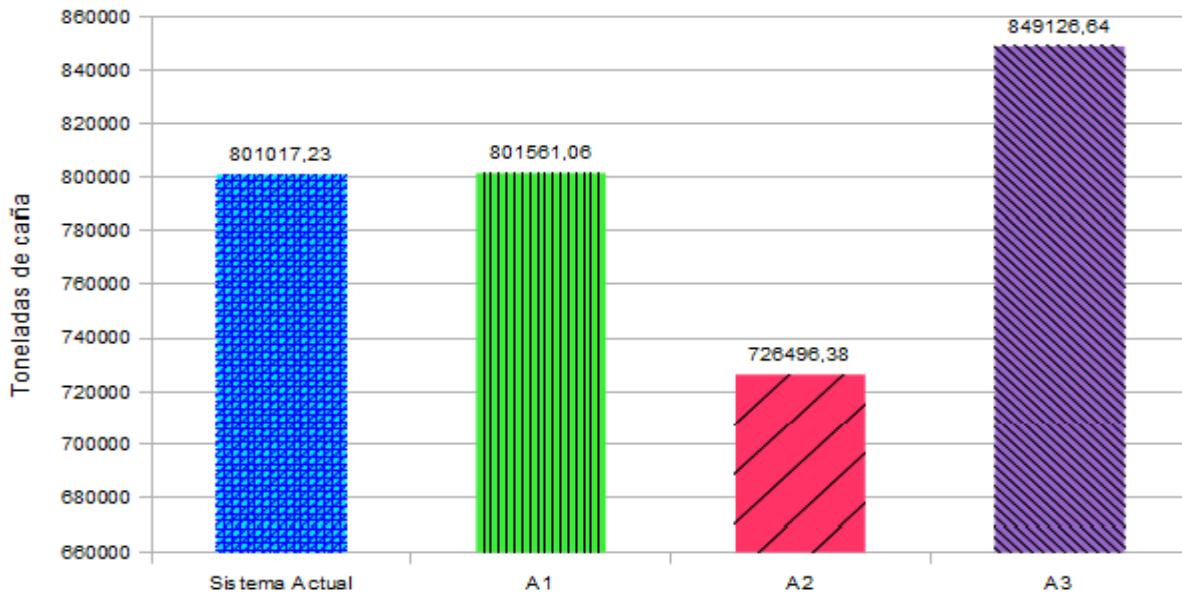


Gráfico 2. Toneladas de caña promedio entregadas en el ingenio durante la zafra.

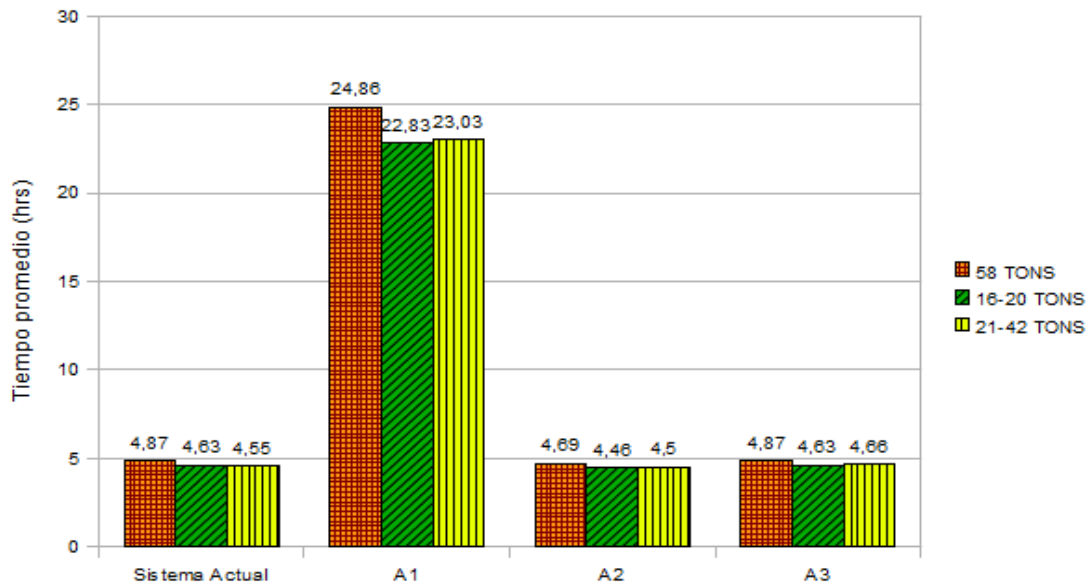


Gráfico 3. Tiempo promedio dentro del sistema por tipo de camión durante la zafra.

En el gráfico 3 se muestra que el tiempo promedio en el sistema para el camión tipo 1 (58 toneladas) es de 4.87 horas, para el camión tipo 2 (16-20 toneladas) es de 4.63 horas y para el camión tipo 3 (21-42 toneladas) es de 4.55 horas



durante la zafra en el ingenio para el sistema actual. De las tres alternativas analizadas, la que arrojó el menor tiempo fue la alternativa A2 con un tiempo promedio de 4.69 horas, 4.46 horas y 4.5 horas para los camiones tipo 1, 2 y 3 respectivamente. La alternativa A3 arrojó resultados muy cercanos a los de la alternativa A2.

Prueba de todos contra todos para determinar la mejor alternativa.

Se construyó una serie de intervalos de confianza para determinar estadísticamente cual es la mejor alternativa. Esto es, con los intervalos se detectaron y cuantificaron las diferencias significativas entre las tres propuestas de solución. Una de las técnicas apropiadas para este caso es la prueba t-apareada, con la cual se compararon todas las alternativas contra todas. Una de las condiciones para aplicar esta técnica es asegurar que el número de corridas para cada una de las alternativas sea el mismo.

La prueba t-apareada consiste en formar intervalos de confianza para las diferencias de $\mu_{i_2} - \mu_{i_1}$, para toda i_1 e i_2 entre 1 y k sistemas, con $i_1 < i_2$, donde i es el número de corrida y j el número del sistema. De esta manera, se forma un número de intervalos iguales a $k(k-1)/2$, donde cada intervalo es calculado a un nivel de confianza de $1 - \alpha/[k(k-1)/2]$. Esto se realiza con el objetivo de lograr que el nivel de confianza global sea de $1 - \alpha$.

La técnica menciona que si el intervalo de confianza contiene al cero, no existe una diferencia significativa entre los sistemas. En caso contrario, si el intervalo excluye al cero, existe una diferencia significativa y por lo tanto, un sistema puede ser considerado mejor que otro, dependiendo si el intervalo es positivo o negativo. A continuación se presentan las fórmulas utilizadas en la prueba t-apareada (Law, 2000) para la prueba de todos contra todos:

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} \quad (10)$$

$$\hat{\text{Var}}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} \quad (11)$$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{\text{Var}}(\bar{Z}_{(n)})} \quad (12)$$

Donde:

Z_j	= Diferencias entre los sistemas.
$\bar{Z}_{(n)}$	= Promedio de las diferencias entre los sistemas.
$\hat{\text{Var}}[\bar{Z}_{(n)}]$	= Varianza de las diferencias entre los sistemas.
$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{\text{Var}}(\bar{Z}_{(n)})}$	= Intervalo de confianza.

Debido a que en el presente estudio se proponen tres alternativas de solución, se tiene que $k=3$, y por lo tanto el número de intervalos será igual a $k(k-1)/2 = 3(3-1)/2=3$. En la tabla 1 se muestran los intervalos construidos para las tres alternativas de solución propuestas.



	Alternativa 2 (A2)	Alternativa 3 (A3)
Alternativa 1 (A1)	Intervalo 1 (A2 vs A1)	Intervalo 2 (A3 vs A1)
Alternativa 2 (A2)		Intervalo 3 (A3 vs A2)
Alternativa 3 (A3)		

Tabla 1. Intervalos de confianza para las tres alternativas de solución.

El cálculo del nivel de confianza para los intervalos individuales se presenta a continuación. Para un $\alpha=10\%$ se tiene:

Nivel de confianza global = $1 - \alpha = 1 - 0.1 = 0.90 = 90\%$

Nivel de confianza individual = $1 - \alpha / [k(k-1)/2] = 1 - 0.1 / [3(3-1)/2] = 0.966 = 96.6\%$

Se compararon todas las medidas de desempeño referentes a la zafra y tiempos promedios, explicadas en las secciones anteriores.

La prueba de todos contra todos requiere de un valor para todas las medidas de desempeño evaluadas denominado n , el cual se refiere al número de veces que se corrió cada modelo de simulación. Los modelos de simulación construidos para el presente estudio fueron corridos 19 veces. Por lo tanto, el valor ideal de n es de 19 para todas las medidas de desempeño (tabla 2).

Medida de desempeño	n: número de corridas.
Duración de zafra (días).	19
Toneladas de caña entregada durante la zafra.	19
Tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 1 (58 toneladas) dentro del sistema (hrs).	19
Tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 2 (16-20 toneladas) dentro del sistema (hrs).	19
Tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 3 (21-42 toneladas) dentro del sistema (hrs).	19

Tabla 2. Relación de valores asignados a n para la prueba de todos contra todos.

El valor de la distribución t-student para los intervalos individuales se muestra en la tabla 3 utilizando un $\alpha=10\%$ y los valores de n establecidos en la tabla 2.

Valores de n	t- student
19	$t_{n-1, 1-\alpha/2} = t_{18, 0.95} = 1.734$

Tabla 3. Valor de la tabla t- student para los intervalos de confianza.

En la tabla 4 se presenta la prueba estadística de todos contra todos para la medida de desempeño referente a la duración total de la zafra en días del sistema. Se observa que las columnas correspondientes a cada alternativa (A1, A2 y A3) presentan los datos referentes a la medida de desempeño evaluada.



CORRIDAS	Duración de zafra (días)			A2 vs A1	A3 vs A1	A3 vs A2
	A1	A2	A3			
1	235,84	144,38	145,45	-91,46	-90,39	1,07
2	236,46	143,16	145,67	-93,30	-90,79	2,51
3	235,44	144,40	145,53	-91,04	-89,91	1,13
4	236,35	144,80	144,36	-91,55	-91,99	-0,44
5	235,83	144,28	144,62	-91,55	-91,21	0,34
6	236,63	143,76	144,98	-92,87	-91,65	1,22
7	235,26	144,95	145,64	-90,31	-89,62	0,69
8	236,55	144,06	145,08	-92,49	-91,47	1,02
9	235,65	145,32	145,36	-90,33	-90,29	0,04
10	236,35	144,46	144,94	-91,89	-91,41	0,48
11	235,37	144,09	145,36	-91,28	-90,01	1,27
12	235,86	143,88	145,33	-91,98	-90,53	1,45
13	235,30	144,60	145,07	-90,70	-90,23	0,47
14	236,47	144,30	144,64	-92,17	-91,83	0,34
15	235,41	145,08	145,55	-90,33	-89,86	0,47
16	236,96	144,93	145,61	-92,03	-91,35	0,68
17	236,43	144,97	144,91	-91,46	-91,52	-0,06
18	235,27	144,01	145,24	-91,26	-90,03	1,23
19	235,58	145,24	145,26	-90,34	-90,32	0,02
Intervalo				1	2	3
Media				-91,49	-90,76	0,73
Varianza				0,039980	0,030170	0,024290
Límite inferior				-91,84	-91,06	0,46
Límite superior				-91,14	-90,46	1,00
Desigualdad				A2<A1	A3<A1	A3>A2
				A1>A3>A2		

Tabla 4. Prueba de todos contra todos respecto a la duración de zafra (días) del sistema.

Las tres columnas (A2 vs A1, A3 vs A1 y A3 vs A2) presentan las diferencias entre las alternativas de solución de dicha medida. Posteriormente se calcula la media y la varianza de esas diferencias para finalmente construir los intervalos de confianza. Por último, se puede apreciar que ninguno de los intervalos contiene al cero, por lo tanto, sí existe una diferencia significativa entre las tres alternativas de solución evaluadas. Además, se puede afirmar que estadísticamente la alternativa 1 presentó un tiempo mayor para completar la zafra respecto a las alternativas 2 y 3.

Las pruebas realizadas a las medidas de desempeño restantes se concentraron en las tablas 5, 6, 7 y 8, las cuales presentan únicamente los intervalos de confianza construidos. Como se puede observar en dichas tablas, existieron intervalos que no incluyeron al cero debido a que obtuvieron sólo valores positivos o sólo valores negativos. La interpretación de estas tablas para cada medida de desempeño se describe a continuación.



Los intervalos contruidos para las toneladas de caña entregadas durante la zafra no contienen al cero, por lo que sí existe una diferencia significativa entre ellos, como se muestra en la tabla 5. Además, se puede concluir que estadísticamente la alternativa 3 presentó una cantidad mayor de toneladas de caña entregadas que las alternativas 1 y 2.

	Toneladas de caña entregadas durante la zafra.		
Combinación	A2 vs A1	A3 vs A1	A3 vs A2
Intervalo	1	2	3
Límite inferior	-75082,82	47571,08	122640,49
Límite superior	-75059,28	47592,10	122664,79
Desigualdad	A2<A1	A3>A1	A3>A2
	A3>A1>A2		

Tabla 5. Intervalos de confianza contruidos para la medida de desempeño referente a las toneladas de caña entregadas durante la zafra.

Los intervalos contruidos para el tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 1 (58 toneladas) dentro del sistema no contienen al cero, por lo que sí existe una diferencia significativa entre ellos. Además, se puede decir que estadísticamente la alternativa 2 presentó un tiempo promedio menor respecto a las alternativas 1 y 3, como se aprecia en la tabla 6.

	Tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 1 (58 toneladas) dentro del sistema (hrs)		
Combinación	A2 vs A1	A3 vs A1	A3 vs A2
Intervalo	1	2	3
Límite inferior	-20,25	-20,05	0,13
Límite superior	-20,08	-19,90	0,25
Desigualdad	A2<A1	A3<A1	A3>A2
	A1>A3>A2		

Tabla 6. Intervalos de confianza contruidos para las medidas de desempeño referentes al tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 1 (58 toneladas) dentro del sistema.

Los intervalos contruidos para el tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 2 (16- 20 toneladas) dentro del sistema no contienen al cero, por lo que sí existe una diferencia significativa entre ellos. Además, se puede decir que estadísticamente la alternativa 2 presentó un tiempo promedio menor respecto a las alternativas 1 y 3, como se aprecia en la tabla 7.

	Tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 2 (16-20 toneladas) dentro del sistema (hrs).		
Combinación	A2 vs A1	A3 vs A1	A3 vs A2
Intervalo	1	2	3
Límite inferior	-18,46	-18,27	0,12
Límite superior	-18,29	-18,13	0,23
Desigualdad	A2<A1	A3<A1	A3>A2
	A1>A3>A2		

Tabla 7. Intervalos de confianza contruidos para la medida de desempeño referente al tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 2 (16-20 toneladas) dentro del sistema.



Los intervalos construidos para el tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 3 (21-42 toneladas) dentro del sistema no contienen al cero, por lo que sí existe una diferencia significativa entre ellos. Además, se puede decir que estadísticamente la alternativa 2 presentó un tiempo promedio menor respecto a las alternativas 1 y 3, como se aprecia en la tabla 8.

	Tiempo promedio de entrega de caña de camiones cañeros tipo 3 (21-42 toneladas) dentro del sistema (hrs).		
Combinación	A2 vs A1	A3 vs A1	A3 vs A2
Intervalo	1	2	3
Límite inferior	-18,62	-18,43	0,11
Límite superior	-18,46	-18,30	0,23
Desigualdad	A2<A1	A3<A1	A3>A2
	A1>A3>A2		

Tabla 8. Intervalos de confianza construidos para la medida de desempeño referente al tiempo promedio de entrega de caña de camiones tipo 3 (21- 42 toneladas) dentro del sistema.

En base a las interpretaciones anteriores, se concluye que bajo la prueba de todos contra todos, la alternativa 3, es la que presenta mejores resultados y es la que debe ser tomada en cuenta como la mejor de las tres, para su implementación debido a que es la que reporta la mayor cantidad de toneladas de caña entregada durante la zafra.

Conclusiones

En el presente trabajo se trató la problemática del área de batey con respecto al flujo vehicular de los camiones cañeros en el ingenio donde se realizó el estudio. Se buscó una solución a dicho problema mediante el análisis previo del sistema actual usando simulación, con la finalidad de incrementar la productividad ante la demanda del ingenio.

Una vez terminado este análisis, surgieron tres alternativas de solución, que si bien fueron viables respecto a los resultados arrojados, fue necesario realizar una comparación estadística entre ellas para seleccionar aquella que brindara un mejor control y una fluidez tal al área de batey, que disminuyera los tiempos de entrega de caña e incrementara el rendimiento general del sistema ante cualquier nivel de flujo vehicular. Cada alternativa de solución contó con un nuevo diseño de mesa alimentadora, la cual es una pieza clave para controlar y maximizar el flujo vehicular.

De acuerdo a los resultados obtenidos, comparando los resultados de las alternativas 1, 2 y 3, con respecto al sistema actual, se observó que la alternativa 1 muestra un incremento de 0.068% en las toneladas de caña entregadas durante la zafra. Sin embargo, el tiempo promedio de entrega de caña dentro del sistema, tomando en cuenta el tiempo promedio de los tres tipos de camiones, desgraciadamente muestra un incremento del 403.35%. La alternativa 2 presenta una disminución del 9.303% en las toneladas de caña entregadas durante la zafra y el tiempo promedio de entrega de caña dentro del sistema presenta una disminución del 2.85%. La alternativa 3 refleja un incremento del 6% en las toneladas de caña entregadas durante la zafra y el tiempo promedio de entrega de caña dentro del sistema refleja un incremento del 0.78%.

En base al análisis anterior, se concluye que bajo la prueba de todos contra todos, la alternativa 3, estadísticamente es la que presenta mejores resultados porque incrementa significativamente la medida de desempeño más importante de todas, la cual es el total de toneladas de caña entregadas durante la zafra. La desventaja de esta alternativa es que incrementa el tiempo promedio de entrega de caña dentro del sistema; sin embargo, este incremento es mínimo.

Terminadas las evaluaciones y comparaciones de las alternativas de solución, se concluyó que la mejor alternativa es la 3 (A3), la cual incluye un incremento importante en las toneladas de caña entregadas al final de zafra. Ésta consiste en incrementar el número de camiones cañeros con capacidad de 16-20 toneladas que llegan al sistema, al mismo tiempo que se disminuyen las llegadas de los camiones cañeros de capacidad de 21-42 toneladas, debido a que agiliza



el flujo vehicular de éstos en el área de batey, lo que causa que se incremente en un 6% las toneladas de caña entregadas.

Finalmente, es importante mencionar que gracias a este proyecto los directivos del ingenio aceptaron a la simulación como una herramienta funcional y poderosa, ya que lograron observar el impacto de las diferentes alternativas diseñadas para el área de batey, sin invertir capital y teniendo una visión clara de lo que se puede lograr no sólo en esta área, si no en las diferentes áreas de elaboración del azúcar.

Referencias bibliográficas

Coss Bu, R., Simulación, Un enfoque práctico, Editorial Limusa, México, 1990.

Flores Ávila, L.C, “Propuesta de un sistema de aseguramiento de calidad para la Industria Azucarera Mexicana”, Tesis Doctoral, Politécnico Nacional. 2002.

Law, A.M. y D.W. Kelton, Simulation Modeling and Analysis, Editorial Mc Graw Hill, U.S.A., 2000.

Hugot, E., “Manual para Ingenieros Azucareros”, Cía. Editorial Continental, S.A. de C.V., México 1984.

Otero, O, “Análisis y mejoramiento de la entrega de caña de azúcar del ingenio central Motzorongo del sector sierra, empleando la técnica de simulación”, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Orizaba, 2005.

Spencer M.B., Manual de Fabricación de Azúcar de Caña y Químicos Azucareros. Editorial John Wiley Sons, Inc. 1967.

<http://www.camaraazucarera.org.mx/> consultada en noviembre 2009

http://www.cenicana.org/publicaciones/publicaciones.php?&txt_buscar=fabrica&filtro=0&publicacion=0&ano=0&nu_evo=1&id=34605&no=3/ consultada en mayo 2010

