

Simulación de una estación de transferencia municipal de Residuos Sólidos Urbanos con el software SIMIO

Y. Solís Galán^{1*}, C.G. Moras Sánchez², G. Cortés Robles², I.M. Ojeda Juárez¹, L. Martínez Hernández³.
¹Alumno MII, Instituto Tecnológico de Orizaba. Avenida Oriente 9, número 852, Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Ver., México.

²División de estudios de posgrado e investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba. Avenida Oriente 9, número 852, Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Ver., México.

³Docente del Instituto Tecnológico de Orizaba, Departamento de Ingeniería Industrial. Avenida Oriente 9, número 852, Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Ver., México.

*yuridiasgalan@hotmail.com

Área de participación: Ingeniería Industrial

Resumen

La simulación es una herramienta de análisis que sirve para evaluar un sistema numéricamente en un periodo de tiempo de interés, ofrece grandes ventajas que van desde elegir correctamente hasta realizar inversiones de manera inteligente. Existe una variedad de sistemas que pueden ser simulados obteniendo resultados exitosos. Este estudio se basa en la simulación de una estación de transferencia de RSU, en este estudio se simulan eventos discretos, los cuales se caracterizan por que el estado de sus variables cambia en determinados puntos separados en el tiempo que pueden ser contados. La metodología de simulación usada es la de Law y Kelton. Se proyecta que en 2031 las toneladas mensuales de RSU enviadas al relleno sanitario serán 4,790 y el potencial económico por la recuperación de material será de hasta \$178,701.67 diarios. Los resultados obtenidos ofrecen una visión amplia de las propuestas de mejora que deben realizarse en el futuro.

Palabras clave: Simulación, Residuos Sólidos Urbanos, estación de Transferencia, SIMIO.

Abstract

The simulation is a tool of analysis that serves to evaluate a system numerically in a period of time of interest, offers great advantages that range from choosing correctly to making investments in an intelligent way. There are a variety of systems that can be simulated for successful results. This study is based on the simulation of an USW transfer station, in this study we simulate discrete events, which are characterized by the state of their variables changes at certain points separated in time that can be counted. The simulation methodology used is Law and Kelton. It is projected that in 2031 the monthly tons of USW sent to the landfill will be 4,790 and the economic potential for the recovery of material will be up to \$178,701.67 per day. The results obtained offer a broad vision of the improvement proposals that must be made in the future.

Key words: Simulation, Urban Solid Waste, municipal solid waste Transfer Station, SIMIO.

Introducción

La simulación es una herramienta de análisis que se usa para evaluar un sistema numéricamente en un periodo de tiempo de interés, (Law & Kelton, 2000). La simulación permite elegir correctamente, comprimir o expandir el tiempo, explorar posibilidades, identificar restricciones, invertir inteligentemente y especificar requerimientos, (Banks, 1998). En este estudio se simulan eventos discretos, los cuales se caracterizan por que el estado de sus variables cambia en determinados puntos separados en el tiempo que pueden ser contados. Algunos de los sistemas en los que se ha aplicado la simulación exitosamente han sido: sistemas de manufactura y sistemas de manejo de material, sistemas logísticos y de la cadena de suministro, sistemas relacionados con el cuidado de la salud, sistemas de servicio, sistemas militares y sistemas de comunicación entre otros.

El sistema en el que se basa esta investigación es de manejo de material, este sistema es una estación de transferencia de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) municipal. Los residuos sólidos urbanos son los generados

en las casas habitación, resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos que se consumen y de sus envases, embalajes y empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la LGPGIR como residuos de otra índole. (LGPGIR, 2015). Los RSU son uno de los mayores problemas con los que se enfrentan actualmente las sociedades modernas (Azadi & Karimi-Jashni). Una estación de transferencia RSU, es una instalación en donde se realiza el traslado de los RSU de los vehículos recolectores a otro vehículo con mayor capacidad de carga, este vehículo es el que lleva los RSU hasta el sitio de disposición final. Las estaciones de transferencia brindan mayor eficiencia al sistema de recolección, esto mediante la economía en el sistema de transporte y en la disminución del tiempo ocioso del personal de recolección. La importancia de la estación de transferencia radica en los beneficios económicos que aporta mediante el ahorro en transporte, personal, tiempo, y la reducción de toneladas de RSU enviadas al relleno sanitario lo que minimiza el impacto al medio ambiente. (SEDESOL, 2012).

En la ciudad de Orizaba se recolectan en promedio 100 toneladas diarias de RSU (H. Ayuntamiento de Orizaba, 2017), las cuales son trasladadas a la estación de transferencia para luego ser enviadas al relleno sanitario. En la estación de transferencia además de la transferencia de RSU, se realiza la actividad de acopio de material valorizable recuperado en diferentes puntos de la ciudad. Aprovechar los beneficios que ofrece tener una estación de transferencia es primordial para el municipio, considerando que la generación de residuos sólidos urbanos va en aumento en nuestro país. Según el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015, el promedio diario de recolección a nivel nacional de RSU fue de 103,125,830 kilogramos (INEGI, 2015). Se decidió usar el software SIMIO (Simulation Modeling based on Intelligent Objects) para simular la estación de transferencia, debido a que es un software muy potente que ofrece herramientas de análisis y optimización para realizar una mejor toma de decisiones, además proporciona un entorno de modelado 3D lo que permite una mejor presentación del modelo. El objetivo de esta investigación es crear un modelo de simulación en el software SIMIO con el propósito de llevar a cabo una evaluación del sistema actual de la estación de transferencia municipal, analizando las necesidades futuras de recursos y procesos para incrementar su rentabilidad y el impacto positivo al medio ambiente, mediante la evaluación de alternativas de mejora.

Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de esta investigación es la metodología de simulación propuesta por Law y Kelton (2000). El diagrama que representa la metodología de simulación es el que se observa en la Figura 1.

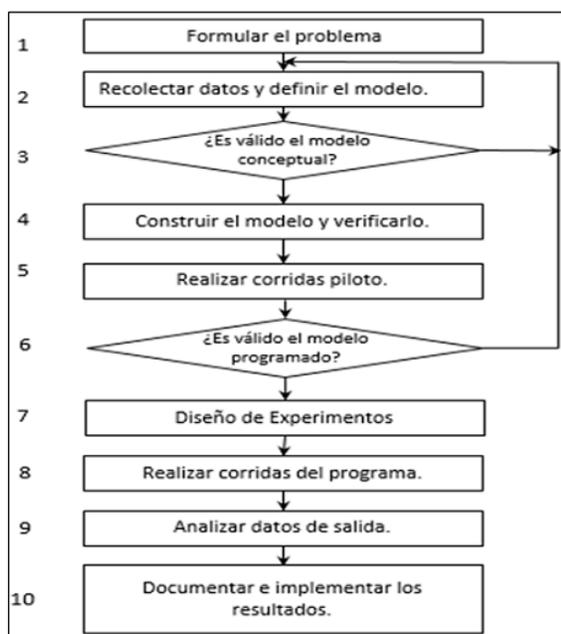


Figura 1. Metodología de simulación. Fuente: Law y Kelton, 2000.

Etapa 1. Formular el problema y planear el estudio.

Se formuló el problema y los objetivos a alcanzar, como paso siguiente se definieron las variables entrada y salida. Las variables de interés que se seleccionaron fueron las siguientes: tiempo entre llegadas de los camiones recolectores, tiempo de recorrido de un vehículo dentro de la estación de transferencia, tiempo de descarga, cantidad de toneladas descargadas, cantidad de kilogramos descarga de material valorizable por los camiones del programa BYP, tiempo de proceso de las prensas. Las variables de salida que se eligieron para el estudio fueron: Total de toneladas enviadas al relleno sanitario, potencial económico obtenido por cada material valorizable recuperado por el programa BYP y la eficiencia de las prensas.

Etapa 2. Recolectar datos y definir el modelo

Se recolectó la información necesaria sobre el sistema para construir el modelo conceptual y posteriormente alimentar el modelo de simulación. Una vez recolectados los datos de las variables de interés se realizaron las pruebas de bondad de ajuste para encontrar la distribución de probabilidad a la cual pertenece el conjunto de datos. Para realizar las pruebas de bondad de ajuste se utilizó un software estadístico, estas pruebas fueron: la prueba Chi- cuadrada χ^2 , la prueba Kolmogorov – Smirnov y la prueba Anderson – Darling. Las distribuciones de probabilidad obtenidas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribuciones de probabilidad obtenidas. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Distribución de probabilidad
Tiempo entre llegadas camiones	Uniforme (60, 90) minutos
Tiempo entre llegadas camión BYP	Triangular(4, 4.25, 4.5) horas
Tiempo de recorrido entrada-patio de maniobras	Empírica Continua (1.7682, 0.1951, 2.3871, 0.4634, 2.6473, 0.7804, 3.45, 1.0) minutos
Tiempo de recorrido patio de maniobra-nivel superior rampa	Normal (37, 7.9) segundos
Tiempo de descarga de los RSU del camión recolector a la tolva	Empírica Continua (0.8798, 0.1012, 1.2856, 0.3291, 1.6386, 0.4177, 2.3568, 0.6455, 2.7963, 0.7848, 3.4166, 0.8860, 5.43, 1.0) minutos.

Etapa 3. Modelo conceptual y verificación.

En esta etapa se conceptualiza el sistema para describir su funcionamiento, la Figura 1 muestra el modelo conceptual.

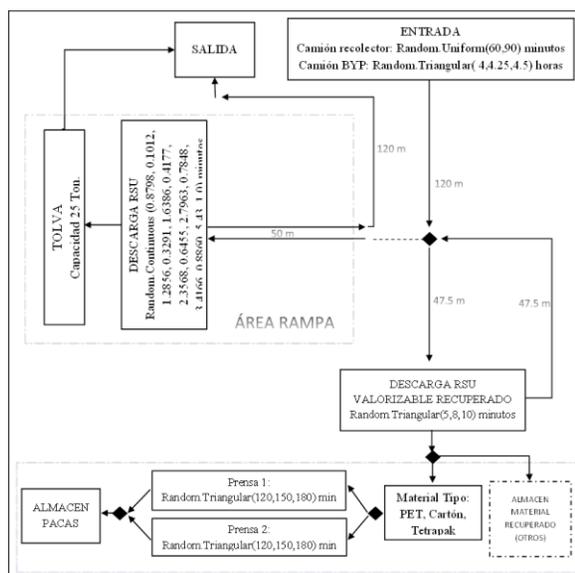


Figura 2. Modelo Conceptual de la estación de transferencia. Fuente: Elaboración propia.

Etapa 4. Construcción del modelo de simulación.

La construcción del modelo en SIMIO se basó en el modelo conceptual previamente realizado. El modelo se compone de dos partes la primera incluye el área de descarga de RSU, la cual se muestra en la Figura 3 y la segunda se compone del área de almacén de material recuperado, en donde se localizan las prensas, ésta se observa en la Figura 4.

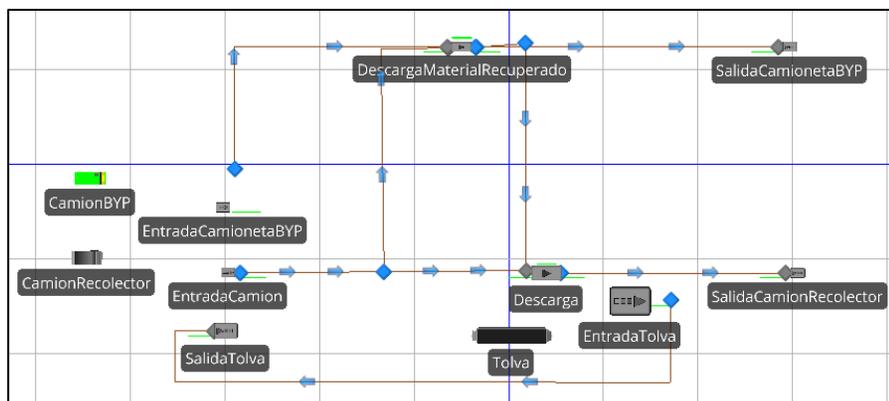


Figura 3. Construcción de la parte 1 del modelo. Fuente: Elaboración propia.

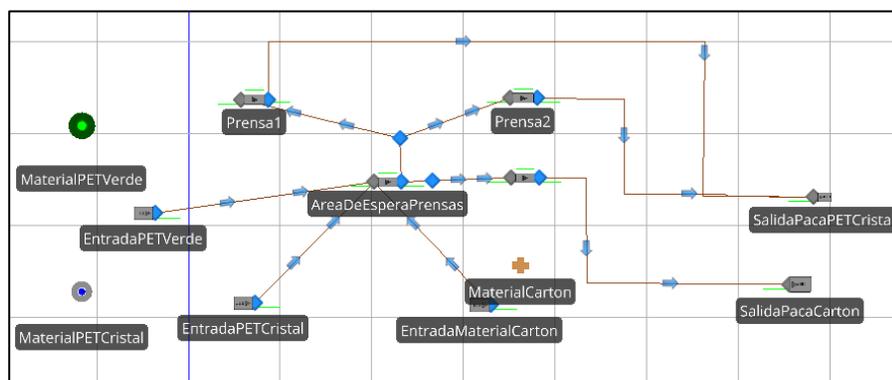


Figura 4. Construcción de la parte 2 del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Etapa 5. Realizar Corridas piloto.

Las corridas piloto son necesarias para tener resultados del modelo de simulación que sirvan como referencia para la validación del modelo. Se decidió realizar 30 corridas piloto previas con números aleatorios distintos para llevar a cabo la validación en la siguiente etapa.

Etapa 6. ¿Es válido el modelo programado?

Para validar el modelo se usó la base de datos creada con los resultados de las corridas piloto previas (Y_i) y los datos recolectados del sistema real (X_i). La validación de los resultados se realizó aplicando la prueba t-pareada, en la cual deben considerarse las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_x = \mu_y$$
$$H_0: \mu_x \neq \mu_y$$

Al evaluar los resultados se rechaza la hipótesis nula si el intervalo de confianza calculado no incluye al cero, esto indica que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa. Si esto ocurre el modelo de simulación no es adecuado. Por el contrario, si el intervalo de confianza calculado incluye al cero indica que la diferencia entre las medias no es estadísticamente significativa, por lo que la hipótesis nula no se rechaza, al no

rechazar la hipótesis nula se considera que el modelo de simulación es adecuado y que los resultados obtenidos son de utilidad. Las fórmulas para aplicar la prueba t-pareada son las siguientes:

$$Z_i = X_i - Y_i$$

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

$$\hat{var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)}$$

Para calcular el intervalo de confianza se aplica la siguiente formula:

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{var}[\bar{Z}_{(n)}]}$$

Al realizar la prueba t-pareada se obtuvieron intervalos para todas las variables de interés evaluadas, los cuales si incluyen al 0, por lo que la hipótesis nula no se rechaza y se demuestra que la diferencia de las medias de los valores reales y los valores simulados no es estadísticamente significativa, por lo que se concluyó que el modelo es válido. Esto se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Evaluación de la hipótesis nula para los intervalos de la prueba t-pareada. Fuente: Elaboración propia.

Medida de desempeño	Intervalo de confianza	H ₀
Toneladas totales enviadas al relleno sanitario (Ton)	(-74.9883, 36.7730)	No se Rechaza
Cantidad descargada de cartón (kg)	(-794.5149, 289.4513)	No se Rechaza
Cantidad descargada de PET cristal (kg)	(-324.3872, 120.4258)	No se Rechaza
Cantidad descargada de PET verde (kg)	(- 97.1614, 44.1141)	No se Rechaza

Etapa 7. Diseño de Experimentos

El objetivo de esta etapa es calcular el número óptimo de replicaciones que se correrá el modelo de simulación. La fórmula para el calcular el número de corridas óptimas es la que se muestra a continuación:

$$n^*(\beta) = \min\{i \geq n: t_{i-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{i}} \leq \beta\}$$

Para calcular el número de corridas óptimas se estableció un nivel de confianza del 90%, los resultados del cálculo se muestran en la Tabla 3. El número de corridas óptimas general para el modelo fue de 61 corridas, ya que fue el mayor valor de todos los calculados.

Tabla 3. Número de corridas óptimas para cada variable de interés. Fuente: Elaboración propia.

	Toneladas enviadas al relleno sanitario (Ton)	kilogramos de cartón descargados (Kg)	kilogramos de PET cristal descargados (Kg)	kilogramos de PET verde descargados (Kg)
# de corridas óptimas	8	44	32	61

Etapa 8. Realizar corridas del programa

Se creó un experimento en SIMIO para realizar el número de corridas óptimas (61 corridas) del modelo para poder obtener los resultados de diferentes escenarios considerando el incremento de RSU que pueda existir en los próximos 15 años y del precio del material valorizable.

Resultados y discusión

La metodología realizada permitió conocer el funcionamiento del sistema actual y medir el desempeño de sus procesos. La proyección estimada de 15 años diagnostica a través de los escenarios simulados la situación

futura a largo plazo de la capacidad instalada de la estación de transferencia, contrastándolos para identificar áreas de oportunidad, que se pueden mejorar en investigaciones futuras con ayuda de técnicas de optimización.

Después de realizar las corridas óptimas se puede observar en la proyección de las toneladas que se envían al relleno sanitario un incremento de las toneladas de RSU en el periodo del 2023 al 2026, lo que indica que en este periodo de tiempo será necesario incrementar la capacidad instalada para la gestión de los RSU que llegan a la estación de transferencia, Ver Gráfico 1.

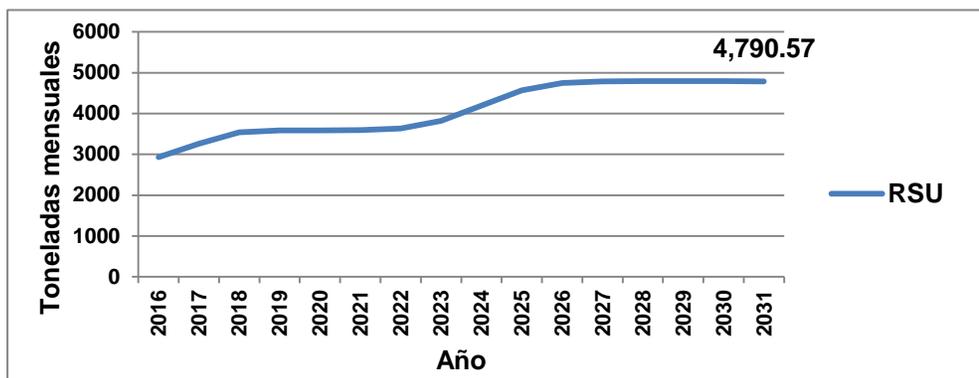


Gráfico 1. Proyección de toneladas enviadas al relleno sanitario. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la recuperación de material valorizable, indican que el material que tiene mayor recuperación es el cartón con 4,067.23 kg diarios para el año 2031 y el que tiene menor recuperación es el PET verde con 340.27 kg diarios para el mismo año, esto se muestra en el Gráfico 2, además se observa que existe una tendencia positiva en la recuperación de estos materiales alcanzando una recuperación de hasta 9,656.39 kg diarios en el año 2031. El potencial económico esperado por la recuperación del material valorizable es de hasta \$178,701.67 diarios, el material con mayor potencial económico es el cartón con \$60,928.98 diarios en el año 2031 y el que menos potencial económico tendrá para este mismo año es el material archivo con \$ 6,809.85 diarios, ver Gráfico 3.

El material valorizable recuperado por el programa BYP llega a la estación de transferencia y en el caso del cartón, el PET cristal y PET verde se dirigen al área de prensas en donde se arman pacas de cada material para que sea vendido a empresas dedicadas al reciclaje. La evaluación de las prensas dio como resultado que existe una baja productividad de estos equipos considerando el incremento de material valorizable recuperado. El porcentaje de kilogramos procesado en las prensas no sobrepasa el 30%, ver Gráfico 4. Lo anterior es un área de oportunidad para mejorar el funcionamiento del área de prensas, esto implica aspectos como: evaluar la contratación de más operadores para distribuir la carga de trabajo, aumentar el tiempo de utilización de las prensas y un mejor flujo de los materiales procesados.

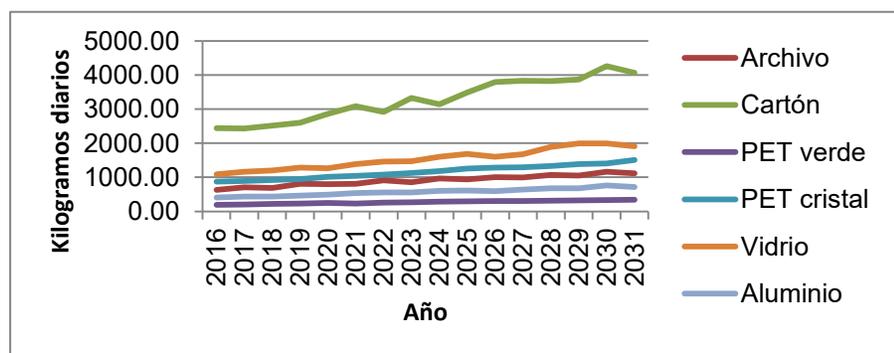


Gráfico 2. Proyección de kilogramos recuperados de material valorizable. Fuente: Elaboración propia.

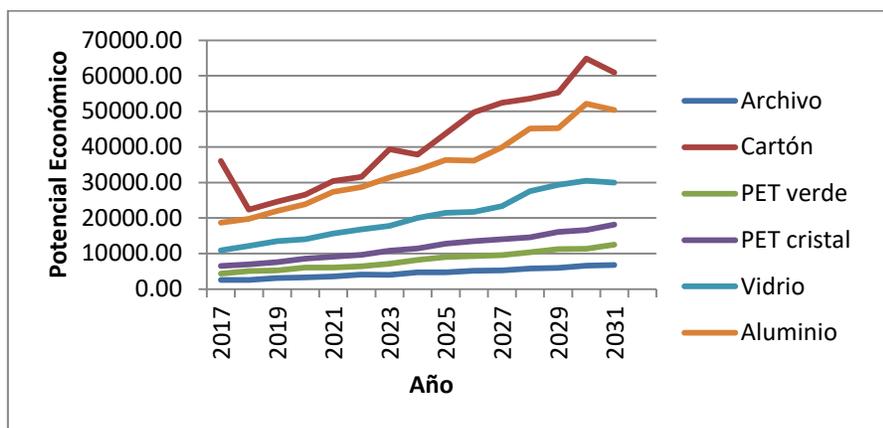


Gráfico 3. Proyección del potencial económico esperado por material valorizable. Fuente: Elaboración propia.

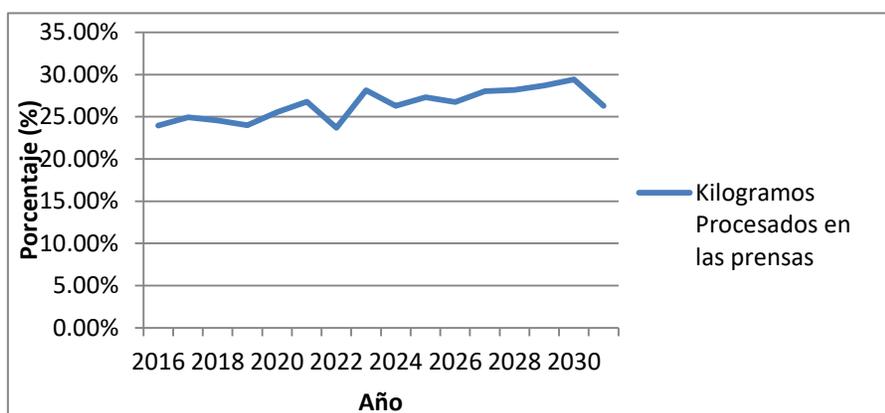


Gráfico 4. Productividad de las prensas. Fuente: Elaboración propia.

Trabajo a futuro

Los trabajos a futuro que se pretenden realizar son:

El estudio de caracterización de los RSU que llegan a la estación de transferencia para identificar los materiales valorizables que son susceptibles de ser recuperados.

Simular un sistema de separación y recuperación de RSU para recuperar los materiales valorizables y proponer una alternativa para aprovechar la fracción orgánica mediante la generación de energía eléctrica.

Conclusiones

La recolección de información confiable permitió realizar un modelo conceptual que describe de manera correcta el sistema actual. Se observó que en los datos recolectados de algunos procesos existe mucha dispersión tal como se pudo ver en el tiempo que tardan en descargar los RSU, ya que en este proceso los datos se ajustaron a una distribución empírica continua representada por una tabla de frecuencias. La interfaz que ofrece SIMIO para la construcción del modelo de simulación es amigable con el usuario, además el

simulador ofrece muchas herramientas que facilitan la construcción del modelo. Después de construido el modelo se realizó la validación mediante la prueba t-pareada la cual mostró que el modelo es válido ya que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los datos recolectados y los datos obtenidos mediante la simulación. Se realizó el cálculo del número óptimo de corridas, el cual fue de 61. El análisis e interpretación de los resultados permitió encontrar áreas de oportunidad en el sistema bajo estudio y con esto plantear propuestas de mejora. Se identificó que puede existir un incremento de los RSU que llegan a la estación de transferencia de hasta 4,790 toneladas mensuales en el año 2031. Además el potencial económico obtenido por la recuperación de materiales valorizables ofrece un área de oportunidad para el aprovechamiento de estos materiales, no solo a través del programa BYP, si no con la separación y recuperación de los materiales susceptibles de ser valorizados los cuales se encuentran en los RSU enviados al relleno sanitario.

Agradecimientos

Se agradece al H. Ayuntamiento Constitucional de Orizaba por las facilidades prestadas para la realización del estudio, a CONACYT por el apoyo que le brinda al Instituto Tecnológico de Orizaba, el cual es nuestra casa de estudios, así como al Tecnológico Nacional de México.

Referencias

- Azadi, S., & Karimi-Jashni, A. (s.f.). Verifying the performance of artificial neural network and multiple linear regression in predicting the mean seasonal municipal solid waste generation rate: A case study of Fars province, Iran. *Waste Management - Elsevier*.
- Banks, J. (1998). *Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, and*. (I. John Wiley & Sons, Ed.) Estados Unidos.
- H. Ayuntamiento de Orizaba. (Enero de 2017). *Coordinación de limpia pública y ecología*. Recuperado el Enero de 2017, de <http://www.byp.gob.mx/>
- INEGI. (2015). *INEGI México en cifras*. Obtenido de Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015. Módulo ambiental de residuos sólidos urbanos.: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30>
- Law, A. M., & Kelton, W. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. (M. G. Hill, Ed.) Estados Unidos.
- LGPGIR. (22 de Mayo de 2015). *LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS*. Obtenido de Fracción XXIX de la LGPGIR: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_220515.pdf
- SEDESOL. (2012). *Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales*. Obtenido de INAPAM: <http://www.inapam.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/1592/1/images/ManualTecnicosobreGeneracionRecoleccion.pdf>