

# UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE NUEVAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE HARINA DE MAÍZ

## A SIMULATION MODEL FOR THE ANALYSIS OF NEW OPERATING POLICIES IN A CORN FLOUR PRODUCTION PLANT

Graciela Bueno-Aguilar<sup>1\*</sup>, Enrique Arjona-Suárez<sup>1</sup>, Lourdes Santiago-Zaragoza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estadística. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (gbueno@colpos.mx). <sup>2</sup>Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital. 42300. Hixmiquilpan, Hidalgo. México.

### RESUMEN

Con el propósito de evaluar nuevas políticas de operación en una planta productora de harina de maíz, se construyó un modelo de simulación de la planta como una alternativa a efectuar experimentos *in situ* que pudieran ser incontrolables, o de un costo considerable. El modelo desarrollado fue validado por la gerencia de producción en la planta y con él se analizaron los procesos en la planta bajo diversos insumos, inventarios y políticas de operación, seleccionando las más apropiadas. El modelo es de un alto nivel de abstracción y fue fácilmente comprensible para el personal de la planta.

**Palabras clave:** enfoque de actividades, modelos discretos, políticas de operación, procesos industriales.

### INTRODUCCIÓN

En la industria de alimentos, desde 1980 se usan técnicas de simulación y modelado para analizar procesos, ayudar a resolver problemas complejos y proponer nuevos sistemas de operación. Hay modelos de simulación integrales sobre la elaboración de harinas de trigo (Liu *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1993; Loza-Garay y Flores, 2000), pero respecto a la elaboración de harinas de maíz sólo se han publicado modelos de simulación de algunos de sus procesos individuales como la nixtamalización (Singh y Singh, 2004) y el secado (Dickey *et al.*, 1997; Souza *et al.*, 2002), y un modelo resumido del proceso integral (Pérez *et al.*, 2006).

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo de simulación integral que considerara todos

### ABSTRACT

A simulation model was constructed of a corn flour production plant for the purpose of evaluating new operating policies of the plant as an alternative to carrying out *in situ* experiments that could have been uncontrollable, or very costly. The developed model was validated by the production management of the plant, and with this model the processes of the plant were analyzed under diverse inputs, inventories and operating policies, selecting the most appropriate. The model is of a high level of abstraction and was easily understandable for the plant personnel.

**Key words:** activity approach, discrete models, operating policies, industrial processes.

### INTRODUCTION

In the food industry, since 1980 simulation and modeling techniques have been used to analyze processes, help to solve complex problems and propose new operating systems. There are integral simulation models of the elaboration of wheat flour (Liu *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1993; Loza-Garay and Flores, 2000), but with respect to corn flour, only simulation models of some of its individual processes have been published, such as nixtamalization (Singh and Singh, 2004) and drying (Dickey *et al.*, 1997; Souza *et al.*, 2002), and a summarized model of the integral process (Pérez *et al.*, 2006).

The objective of the present study was to develop an integral simulation model that considers all of the elements that influence the performance of a corn flour production plant and to use it for the analysis of processes in the plant. The model was proposed as an alternative to carrying out *in situ* experiments that could be uncontrollable due to the stochastic nature

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Diciembre, 2009. Aprobado: Febrero, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 45: 207-220. 2011.

los elementos que influyen en el desempeño de una planta productora de harinas de maíz y utilizarlo para el análisis de procesos en la planta. El modelo se propuso como una alternativa a efectuar experimentos *in situ* que pudieran ser incontrolables debido a la naturaleza estocástica del momento de la entrega de algunos insumos, o de un costo considerable. La metodología para construir el modelo, a diferencia de las metodologías en los estudios mencionados, que usan ecuaciones de diferencia o restricciones matemáticas, utiliza entidades, actividades, líneas de espera y flujos para modelar por analogía los procesos físicos de la planta y su modo de operación. Así, el personal técnico de la planta comprendió el modelo desarrollado y participó en su verificación y validación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para desarrollar el modelo se utilizó un conjunto de datos sobre la configuración y los procesos en la planta, la cual produce harinas de maíz nixtamalizadas usando diversos tipos de grano. Para la implementación y experimentación con el modelo se utilizó el lenguaje computacional C++ y una estación de trabajo Hewlett Packard KAJAK XM600. Primero se usó un método para la construcción de modelos de actividades (Arjona-Suárez y López-Mellado, 1996) y luego la implementación en C++ de un algoritmo para ejecutar modelos de actividades mediante tablas de finales programados (Banks *et al.*, 2009). Asimismo se usaron implementaciones en C++ de algoritmos para el mantenimiento y manejo de listas dinámicas y pilas (Deitel y Deitel, 2009).

### Configuración de la planta

La planta se encuentra ubicada en el Estado de México y consta de cuatro áreas: 1) ingreso e inspección: es el patio por donde transitan los camiones cuya carga es aceptada o rechazada por los inspectores de control de calidad y donde los camiones esperan turno para ser descargados; 2) producción: consta del patio de recepción y descarga de las unidades de transporte y del edificio donde se procesa el maíz, el equipo de producción está dispuesto en varios niveles iniciando el proceso productivo en los niveles superiores y operan dos líneas de producción; 3) administrativa: consta de las oficinas de los supervisores de control de calidad, las de los ingenieros de proceso, la gerencia y los departamentos de contabilidad y ventas; 4) área de almacenamiento: en la primera parte están los silos de almacenamiento de maíz y en la segunda la bodega donde se almacena el producto terminado.

of the moment of delivery of some inputs, or be extremely costly. The methodology for constructing the model, contrary to the methodologies in the abovementioned studies, which use equations of difference or mathematical restrictions, uses entities, activities, waiting lines and flows to model by analogy the physical processes of the plant and its operation mode. Thus, the technical personnel of the plant understood the developed model and participated in its verification and validation.

## MATERIALS AND METHODS

To develop the model, a set of data was used of the configuration and the processes in the plant, which produces nixtamalized corn flour using diverse types of grain. For the implementation and experimentation with the model, the computer language C++ was used along with a Hewlett Packard KAJAK XM600 work station. First, a method for the construction of activities models was used (Arjona-Suárez and López-Mellado, 1996) and then the implementation in C++ of an algorithm for utilizing models of activities through tables of programmed finals (Banks *et al.*, 2009). In addition, implementations in C++ were used for the maintenance and management of dynamic lists and stacks (Deitel and Deitel, 2009).

### Configuration of the plant

The plant is located in the Estado de México and is comprised of four areas: 1) entry and inspection: the patio where the trucks pass, whose cargo is accepted or rejected by the quality inspectors and where the trucks wait their turn to be unloaded; 2) production: comprised of the patio of reception and unloading of the transport units and of the building where the corn is processed, the production equipment is placed in various levels initiating the production process in the upper levels and operating two production lines; 3) administrative: consists of the offices of the quality control supervisors, those of the processing engineers, management and the accounting and sales departments; 4) storage area: in the first part are the corn silos and in the second the warehouse where the finished product is stored.

### Processes in the plant

#### Reception of raw materials

Trucks (5, 10 and 20 t) and tractor-trailers arrive to the plant with trailers (up to 40 t) loaded with corn. Prior to entry, quality

## Procesos en la planta

### Recepción de materia prima

A la planta llegan camiones (5, 10 y 20 t) y tracto-camiones con remolques (hasta 40 t) cargados de maíz. Antes de ingresar, personal de control de calidad toma muestras de cada vehículo las cuales se analizan en el laboratorio para determinar el contenido de humedad y aflatoxinas en el grano, y los porcentajes de impurezas, grano roto, grano picado, daños por calor, daños por heladas y daños por hongos. Si se cumplen los requerimientos de calidad determinados por la empresa, se acepta el lote muestreado. Si su carga es aceptada, el vehículo transita por el patio de recepción hacia el área de descarga donde hay un volteador hidráulico que lo eleva para que el maíz caiga a unas rejillas metálicas en el piso, bajo las cuales hay unas tolvas dosificadoras y receptoras subterráneas. Las rejillas metálicas detienen materiales de gran tamaño como olores y pedazos de costales. A la salida de las tolvas hay transportadores de cadena que llevan el grano a un elevador de canjilones. El grano que se debe procesar de inmediato entra al edificio de proceso; en caso contrario, pasará a otro transportador y elevador para ser almacenado en uno de los silos de la planta.

### Pre-limpia

El grano enviado a proceso directo desde el área de recepción o enviado desde el área de almacenamiento (silos) para producción, pasa por una pre-limiadadora que separa los materiales de mayor tamaño, como fibras largas, piedras y pedazos de olores. En el interior de la pre-limiadadora hay un tambor cribador rotatorio que permite el paso del maíz por la camisa (malla perforada) a la salida, donde el grano pasa por una zona magnética que detiene materiales ferrosos, y entra a un silo de maíz pre-limpio.

### Limpia

El maíz depositado en las celdas (silos) de maíz pre-limpio se descarga a un conjunto de transportadores que lo llevan a un elevador. En este punto hay dos líneas de producción idénticas y el grano se deposita en una limpiadora de grano para la limpieza final. Las limpiadoras son separadoras de grano compuestas por dos placas; la placa superior contiene perforaciones de 1.5 cm de diámetro y la inferior perforaciones de 0.3 cm, las que permiten la separación en tres componentes: maíz, impurezas mayores e impurezas menores. El grano limpio cae a los silos de maíz limpio, conocidos como celdas de día que alimentan a los cocedores.

control personnel take samples from each vehicle, which are analyzed in the laboratory to determine the content of moisture and aflatoxins in the grain, and the percentages of impurities, broken grain, bored grain, heat damage, frost damage and fungus damage. If the quality requirements determined by the company are met, the sampled lot is accepted. If the cargo is accepted, the vehicle passes through the reception patio to the unloading area where it is lifted by a hydraulic dumper, from which the corn falls onto some metal grids in the floor, under which there are some dosing hoppers and receptors. The metal grids retain large materials such as corn cobs and pieces of sacks. At the exit of the hoppers there are transporting lines that take the grain to a bucket elevator. The grain to be processed immediately enters the processing building; otherwise it will pass to another transporter and elevator to be stored in one of the plant's silos.

### Pre-cleaning

The grain sent to direct process from the reception area or sent from the storage area (silos) for production, passes through a pre-cleaner that separates the largest materials, such as long fibers, stones and pieces of corn cobs. In the interior of the pre-cleaner there is a rotating screener drum that allows the corn to pass through the shirt (perforated mesh) at the exit, where the grain passes through a magnetic zone which detains ferrous materials, and enters a pre-cleaning corn silo.

### Cleaning

The corn deposited in the pre-cleaning corn cells (silos) is unloaded to a set of transporters that take it to an elevator. At this point there are two identical production lines and the grain is deposited in a grain cleaner for the final cleaning. The cleaners are grain separators comprised of two plates; the upper plate contains perforations of 1.5 cm diameter and the lower plate contains perforations of 0.3 cm, which permit the separation in three components: corn, larger impurities and smaller impurities. The clean grain falls into the clean corn silos, known as day silos that feed the cookers.

### Cooking

Before the cooking is carried out, water is fed to the cookers, a prepared alkaline solution is added and vapor is injected through a system of valves. When the desired temperature is reached, they are closed and the corn is introduced. Cooking time varies according to the type of grain processed and is regulated by the velocity of the grain through the body of the cooker, in a coil type transporter contained in its interior. This

## Cocimiento

Antes de realizar el cocimiento se suministra agua a los cocedores, se adiciona una solución alcalina preparada y se comienza a inyectar vapor a través de un sistema de válvulas. Al llegar a la temperatura deseada se cierran y se introduce el maíz. El tiempo de cocción varía de acuerdo al tipo de grano procesado y es regulado por la velocidad del grano a través del cuerpo del cocedor, en un transportador de tipo helicoidal contenido en su interior. Este tiempo es determinado por la experiencia del operador con base en ciertos parámetros de control. La solución alcalina se prepara en los tanques de mezclado con cal y agua. Las características que debe presentar el nixtamal obtenido son evaluadas mediante análisis en el laboratorio: medición de la correa y consistencia de la masa, grado de gomosidad y absorción de agua.

## Lavado

Después del cocimiento la mezcla sale por un transportador interno ubicado en el extremo del cocedor y cae en las lavadoras. El lavado se realiza en una criba vibratoria con un sistema de inyección de agua tibia que permite la eliminación del nejayote y la descarga del nixtamal en las tolvas de reposo.

## Reposo

El reposo permite un mayor escurrimiento del agua de lavado para evitar problemas en los molinos, cernedores y ductos de transporte.

## Molienda

Después de reposar el nixtamal pasa a los molinos en la salida de descarga de las tolvas de reposo. Los molinos son de tipo martillo que giran a alta velocidad y el nixtamal se desintegra por el impacto y se pulveriza por un cizallamiento al pasar por la estrecha abertura de los martillos.

## Secado

Las partículas obtenidas de la primera molienda son una mezcla con partículas gruesas, intermedias y finas con 39 a 44 % de humedad. Éstas son transportadas a los secadores neumáticos instantáneos que elevan la temperatura hasta 400 °C. Los gases calientes de combustión deshidratan las partículas en fracciones de segundos, eliminando el agua y obteniendo 10 a 13 % de humedad. Después la mezcla va a los ciclones de separación de gases que los succionan mediante un ventilador. El material restante pasa a los pre-cernedores.

time is determined by the experience of the operator based on certain control parameters. The alkaline solution is prepared in the mixing tanks with lime and water. The characteristics that the nixtamal should have are evaluated through analysis in the laboratory: measurement of the belt and consistency of the dough, degree of gumminess and water absorption.

## Washing

After cooking the mixture comes out through an internal transporter located at the end of the cooker and falls into the washers. The washing is carried out in a vibrating bed with a warm water injection system that allows the elimination of the cooking water and the unloading of the nixtamal in the resting hoppers.

## Resting

Resting permits more drainage of the rinse water to prevent problems in the mills, sieves and transport ducts.

## Milling

After the nixtamal is allowed to set it passes to the mills at the unloading exit of the resting hoppers. The hammer type mills spin at high speed and the nixtamal is disintegrated by the impact and is pulverized by a shear when it passes through the narrow opening of the hammers.

## Drying

The particles obtained from the first milling are a mixture of thick, medium and fine particles with 39 to 44 % moisture. They are transported to the instant pneumatic dryers that raise the temperature to 400 °C. The hot combustion gases dehydrate the particles in fractions of seconds, eliminating the water and obtaining 10 to 13 % moisture. Then the mixture goes to the gas separation cyclones that suction them by means of a ventilator. The remaining material passes to the pre-sifters.

## Sifting

During pre-sifting, the thick particles are separated, which are returned to the first mill and the others continue their path toward the cooling cyclones that lead to the first three sections of the primary sifters where the thick and medium granules pass on to the remilling hoppers which let them fall directly into the mills to fragment their size even more and to obtain the desired size of granulometry. Then the grains pass through a sleeve filter

## Cernido

Durante el pre-cernido se separan las partículas gruesas que son regresadas a la primera molienda y las otras continúan su trayecto hacia a los ciclones de enfriamiento que desembocan en las tres primeras secciones de los cernedores primarios donde los gránulos gruesos e intermedios pasan a las tolvas de remolienda que los dejan caer directamente a los molinos de remolienda para fragmentar más aún su tamaño y poder adquirir la granulometría deseada. Luego los gránulos viajan a través de un filtro de mangas que funciona por vía electromagnética dejando caer por gravedad el material hacia las dos últimas secciones de los mismos cernedores principales. Los gránulos finos obtenidos en el paso de la harina por el cernedor se depositan en las tolvas de paso de producto terminado y pasarán a las tolvas de almacenamiento de producto terminado y la harina será envasada.

## Envasado

La ruta a seguir depende de la presentación deseada para el producto. Para empacar en sacos de 5 y 10 kg, la harina es enviada por un transportador helicoidal a una empacadora con una rosca dosificadora que llena los sacos con el peso exacto y éstos son transportados en una banda a la cosedora de sacos para ser estibados en la bodega. Para la presentación en paquetes de 1 kg, la harina es llevada por el transportador helicoidal hacia una envasadora.

## Almacenamiento

El producto terminado es almacenado en la bodega.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Desarrollo del modelo

Primero se identificaron las entidades requeridas para el estudio, que constituyen recursos físicos y lógicos. Para cada entidad se determinaron sus atributos necesarios y con un conjunto de valores permisibles para cada atributo. Luego se determinaron los ciclos de actividad-inactividad de cada entidad y al conjuntar todos ellos se determinaron las actividades y líneas de espera requeridas en el modelo. En los Cuadros 1 y 2 se muestran las entidades con sus atributos y las líneas de espera utilizadas. En el Cuadro 3 se muestran las actividades usadas y las condiciones de inicio (entidades requeridas) para cada una. El modelo comprende un total de 40 entidades, 43 líneas de espera y 19 actividades.

that functions electromagnetically, allowing the material to fall by gravity toward the last two sections of the same principal sifters. The fine granules obtained in passing the flour through the sifter are deposited in the step hoppers and then pass on to the finished product storage hoppers, to later be packaged.

## Packaging

The route to follow depends on the desired presentation for the product. To pack in 5 and 10 kg sacks, the flour is sent by a coil transporter to a packer with a dosing nozzle that fills the sacks with the exact weight, and then they are transported on a band to the stitcher to close the sacks, which are stowed in the warehouse. For presentation in 1 kg packages, the flour is taken by the coil transporter toward a packager.

## Storage

The finished product is stored in the warehouse.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Development of the model

First, the entities required for the study were identified, which consist of physical and logical resources. For each entity, its necessary attributes were determined along with a set of permissible values for each attribute. Then the cycles of activity-inactivity of each entity were determined, and when they were put together, the activities and waiting lines required in the model were determined. Tables 1 and 2 show the entities with their attributes and waiting lines used. Table 3 presents the activities used and the starting conditions (required entities) for each one. The model includes a total of 40 entities, 43 waiting lines and 19 activities.

Abbreviations L1 and L2 in the waiting lines and activities refer to production lines 1 and 2. Abbreviations LE followed by a number refer to the corresponding waiting lines and the abbreviations A to the activities. The latter are used when two similar activities are described simultaneously in both production lines and an entity comes from different waiting lines according to the activity in question. The statistics of use that appear in the column of attributes of most of the entities refer to the sets of attributes that vary according to the entity. The deposits are shared entities and the activities that introduce and withdraw material to/from a deposit

**Cuadro 1. Entidades físicas y lógicas, y sus atributos.**  
**Table 1. Physical and logical entities, and their attributes.**

| Entidad   | Atributos  |
|---|--|
| 1. Camión   | Número de camión; Tipo de maíz; Tamaño de la carga.                            |
| 2. Tolva receptora                                  | Estadísticas de uso  |
| 3. Volteador hidráulico                             | Estadísticas de uso  |
| 4. Equipo de transporte a silos                     | Estadísticas de uso  |
| 5. Equipo de transporte a proceso inmediato         | Estadísticas de uso  |
| 6-7. Silos de maíz                                  | Tipo de maíz; Cantidad almacenada;<br>Espacio disponible; Estadísticas de uso. |
| 8. Pre-limiadadora                                  | Estadísticas de uso  |
| 9. Equipo de transporte a proceso                   | Estadísticas de uso  |
| 10. Impurezas mayores                               | Cantidad   |
| 11-12. Silos de maíz pre-limpio                     | Tipo de maíz; Cantidad almacenada;   |
| Espacio disponible; Estadísticas de uso.            |  |
| 13. Impurezas menores                               | Cantidad   |
| 14-15. Limpiaadora                                  | Estadísticas de uso  |
| 16-17. Equipo de transporte a limpiadora            | Estadísticas de uso  |
| 18-19. Silos de maíz limpido                        | Tipo de maíz; Cantidad almacenada;   |
| Espacio disponible; Estadísticas de uso.            |  |
| 20-21. Cociadores continuos                         | Tipo de maíz; Cantidad almacenada;   |
| Espacio disponible; Estadísticas de uso.            |  |
| 22-23. Lavadoras                                    | Estadísticas de uso  |
| 24. Caldera   | Estadísticas de uso  |
| 25. Orden   | Características  |
| 26. Solución alcalina                               | Cantidad   |
| 27-28. Tolvas de reposo                             | Tipo de maíz; Cantidad almacenada;   |
| Espacio disponible; Estadísticas de uso.            |  |
| 29. Carga de maíz, nixtamal, harina o harina húmeda | Tipo de maíz; Número de orden; Número de carga.                                |
| 30-31. Molinos                                      | Estadísticas de uso  |
| 32-33. Equipo de secado, cernido y enfriado         | Estadísticas de uso  |
| 34-35. Tolvas de harina                             | Tipo de maíz; Cantidad almacenada;<br>Espacio disponible; Estadísticas de uso. |
| 36. Equipo de transporte a empacadora de bolsas     | Estadísticas de uso  |
| 37. Equipo de transporte a empacadora de sacos      | Estadísticas de uso  |
| 38. Empacadora de bolsas                            | Estadísticas de uso  |
| 39. Empacadora de sacos                             | Estadísticas de uso  |
| 40. Bodega  | No. de sacos y bolsas de harina por tipo; Espacio disponible.                  |

Las abreviaturas L1 y L2 en las líneas de espera y actividades se refieren a las líneas de producción 1 y 2. Las abreviaturas LE seguidas de un número se refieren a las líneas de espera correspondientes y las abreviaturas A a las actividades. Estas últimas se usan cuando se describen simultáneamente dos actividades similares en las dos líneas de producción y una entidad proviene de líneas de espera diferentes de acuerdo a la actividad de que se trate. Las estadísticas

can be done simultaneously. The cooking activity was modeled as a quasi-continuous activity.

Figure 1 shows the cycles of activity-inactivity determined for two of the entities of the model (truck and dumper) and the ways in which they combine. Figure 2 shows the model resulting from combining the activity-inactivity cycles of all the entities and contains all of the flow relationships of entities between waiting lines and activities; waiting

de uso que aparecen en la columna de atributos de la mayoría de las entidades se refieren a conjuntos de atributos que varían según la entidad. Los depósitos son entidades compartidas y las actividades que ingresan y retiran material a/de un depósito pueden realizarse simultáneamente. La actividad de cocimiento se modeló como una actividad quasi-continua.

La Figura 1 muestra los ciclos de actividad-inactividad determinados para dos de las entidades del modelo (camión y volteador) y las maneras en que se conjuntan. La Figura 2 muestra el modelo resultado de conjuntar los ciclos de actividad-inactividad de todas las entidades y contiene todas las relaciones de flujo de entidades entre líneas de espera y actividades; la línea de espera 38 se muestra punteada detrás de la 37 por tener los mismos flujos.

Una vez satisfechas las condiciones para su inicio, cada actividad ejecuta una serie de acciones (flujos de entrada y salida, consunción y generación de entidades, cálculos de variables de estado, lectura y despliegue interactivo, envío de señales a otras actividades, muestreo de distribuciones, estimación de su duración, etc.). Por ejemplo, la actividad 2 “Descarga de camión y envío a L1 a proceso inmediato” requiere las siguientes entidades para su realización:

- Camión en la línea de espera 1 (LE1) de camiones aceptados por los inspectores de control de calidad listo para ser descargado.
- Tolva receptora desocupada en condiciones de operar (en la LE2).
- Volteador hidráulico disponible (en la LE3).
- Equipo de transporte a proceso desocupado (en la LE5).
- Pre-limiadadora desocupada (en la LE8).
- Silo de maíz pre-limpio (en la LE11) con tipo de maíz igual al tipo de grano que contiene el camión que se descargaría y capacidad disponible mayor o igual a la cantidad de maíz que contiene el camión.

Así, cuando las entidades anteriores están disponibles, la actividad 2 iniciará y se ejecutará una serie de flujos de entrada que extraerán las entidades (aquellas tratadas en el modelo como objetos) de las líneas de espera correspondientes, y se ejecutarán las otras tareas relacionadas con dicha actividad que incluyen la determinación de su duración (que consta de una parte proporcional a la carga y de un factor estocástico de ajuste) y la actualización de los valores

**Cuadro 2. Líneas de espera.****Table 2. Waiting lines.**

| Línea de espera  |
|--|
| 1. Camión esperando descargar maíz                                       |
| 2. Tolva receptora disponible.   |
| 3. Volteador hidráulico esperando voltear un camión                      |
| 4. Equipo de transporte esperando envío a silos                          |
| 5. Equipo de transporte esperando envío a proceso inmediato              |
| 6-7. Silos de maíz 1 y 2 esperando recibir o descargar                   |
| 8. Pre-limiadadora disponible  |
| 9. Equipo de transporte esperando descarga de silos a proceso            |
| 10. Impurezas mayores  |
| 11-12. Silos de maíz pre-limpio en L1 y L2 esperando recibir o descargar |
| 13. Impurezas menores  |
| 14-15. Limpiadoras en L1 y L2 esperando limpiar grano                    |
| 16-17. Equipo de transporte esperando envío a limpiadoras en L1 y L2     |
| 18-19. Silos de maíz limpio en L1 y L2 esperando recibir o descargar     |
| 20-21. Cocedores en L1 y L2 esperando cocer grano de maíz                |
| 22-23. Lavadoras en L1 y L2 esperando lavar nixtamal                     |
| 24. Caldera esperando calentar agua de cocción                           |
| 25. Orden inactiva   |
| 26. Solución alcalina disponible   |
| 27-28. Tolvas de reposo en L1 y L2 esperando recibir o descargar         |
| 29-30. Nixtamal en L1 y L2 esperando molienda                            |
| 31-32. Molinos en L1 y L2 esperando triturar nixtamal                    |
| 33-34. Cargas de harina húmeda en L1 y L2 esperando secado               |
| 35-36. Equipos de secado, cernido y enfriado en L1 y L2 disponibles      |
| 37-38. Tolvas de harina A y B esperando recibir o descargar              |
| 39. Equipo de transporte a empacadora de bolsas disponible               |
| 40. Equipo de transporte a empacadora de sacos disponible                |
| 41. Empacadora de bolsas disponible                                      |
| 42. Empacadora de sacos disponible                                       |
| 43. Bodega inactiva esperando almacenaje                                 |

line 38 is presented as a dotted line behind 37 for having the same flows.

Once the conditions for its start have been satisfied, each activity executes a series of actions (flows of entrance and exit, burnout and generation of entities, calculations of variables of state, reading and interactive display, sending of signals to other activities, sampling of distributions, estimation

**Cuadro 3. Actividades.****Table 3. Activities.**

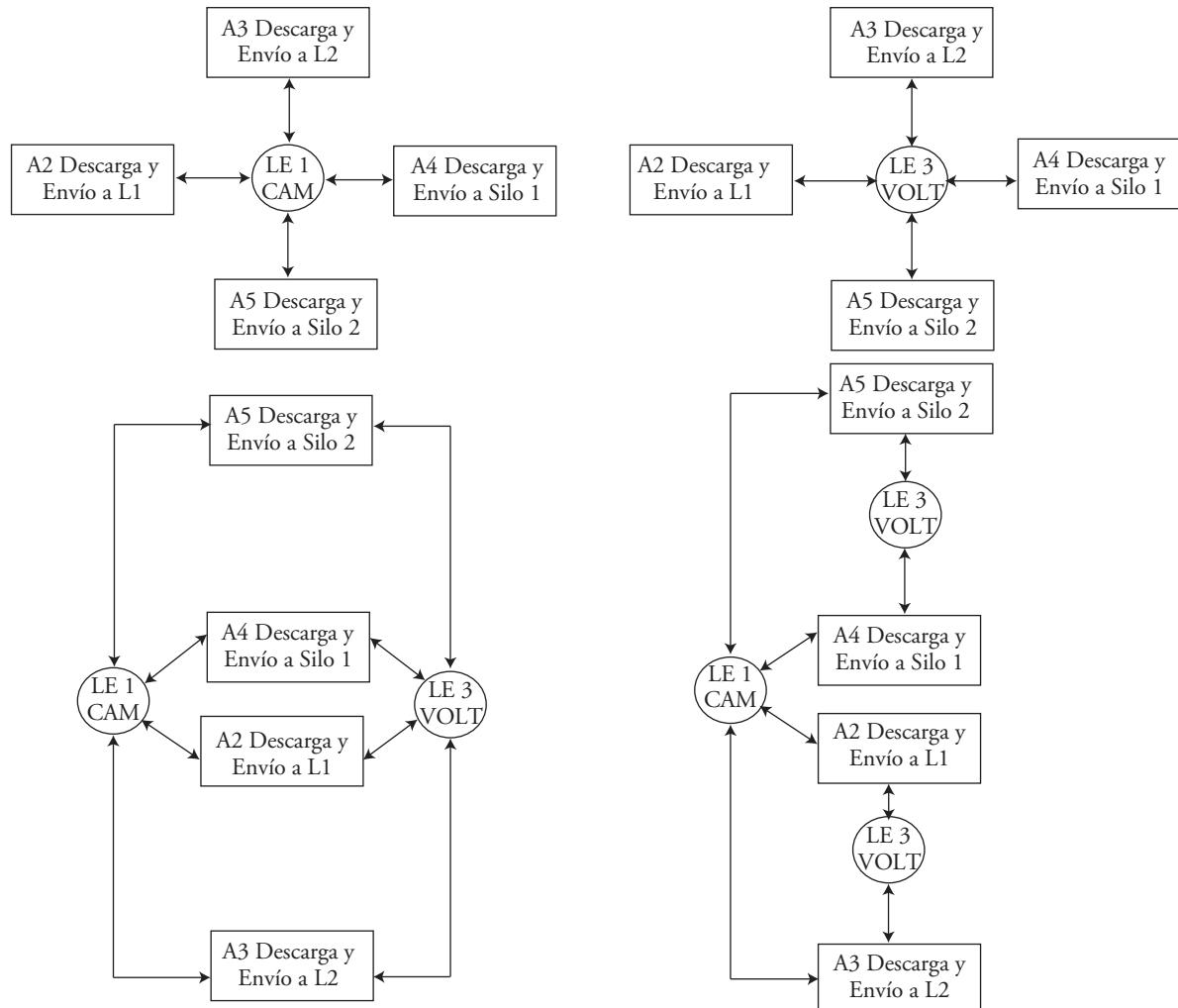
| Actividad   | Entidades requeridas para su inicio   |
|---|---|
| 1. Calentamiento previo del agua para cocimiento              | Orden en LE25; Caldera disponible en LE24.  |
| 2-3. Descarga de camión y envío a L1 y L2 a proceso inmediato | Camión en LE1; Tolva receptora en LE2. Volteador hidráulico en LE3; Pre-limiadadora en LE8; Equipo de transporte a proceso inmediato en LE5; Silo de maíz pre-limpio en LE11 (A2) o en LE12 (A3).   |
| 4-5. Descarga de camión y envío a silos 1 y 2                 | Camión en LE1; Tolva receptora en LE2; Volteador hidráulico en LE3; Equipo de transporte a silos en LE4; Silo de maíz en LE6 (A4) o en LE7 (A5.)  |
| 6-7. Extracción de silos 1 y 2 y envío a L1 y L2              | Pre-limiadadora en LE8; Equipo de transporte a proceso en LE9; Silo de maíz en LE6 (A6) o en LE7 (A7); Silo de maíz pre-limpio en LE11 (A6) o en LE12 (A7).   |
| 8-9. Limpieza de grano en L1 y L2                             | Limiadadora en LE14 (A8) o en LE15 (A9); Equipo de transporte a limiadadora en LE16 (A8) o en LE17 (A9); Silo de maíz pre-limpio en LE11 (A8) o en LE12 (A9); Silo de maíz limpio en LE18 (A8) o en LE19 (A9).  |
| 10-11. Cocimiento de grano en L1 y L2                         | Orden en LE25; Solución alcalina en LE26; Cocedor en LE20 (A10) o en LE21 (A11); Lavadora en LE22 (A10) o en LE23 (A11); Silo de maíz limpio en LE18 (A10) o en LE19 (A11); Tolva de reposo en LE27 (A10) o en LE28 (A11).  |
| 12-13. Reposo de nixtamal en L1 y L2                          | Tolva de reposo en LE27 (A12) o en LE28 (A13)   |
| 14-15. Molienda de nixtamal en L1 y L2                        | Nixtamal (carga) en LE29 (A14) o en LE30 (A15); Molino en LE31 (A14) o en LE32 (A15).   |
| 16-17. Secado, cernido y enfriado de harina en L1 y L2        | Equipo de secado, cernido y enfriado en LE35 (A16) o en LE36 (A17); Harina húmeda (carga) en LE33 (A16) o en LE34 (A17); Tolva de harina en LE37 o en LE38.   |
| 18-19. Empacado de harina en bolsas y sacos                   | Empacadora de bolsas en LE41 (A18) o de sacos en LE42 (A19); Equipo de transporte a empacadora de bolsas en LE39 (A18) o de sacos en LE40 (A19); Tolva de harina en la línea de espera 37 (LE37) o en la línea de espera 38 (LE38); Bodega en la línea de espera 43 (LE43). |

de los atributos del silo de maíz pre-limpio. Al concluir la actividad, como resultado de la misma y de sus flujos de salida, el estado del sistema se modifica y podrá realizarse de nuevo la misma actividad, o bien otras actividades.

La forma usada para describir el modelo de simulación anterior mediante sus entidades, líneas de espera, actividades, condiciones de inicio de las actividades y flujos de entidades entre líneas de espera y actividades, está acorde con la forma estándar para describir este tipo de modelos (Kreutzer, 1986; Martínez y Ioannou, 1995; Marzouk *et al.*, 2007).

of their duration, etc.) For example, activity 2 “Unloading of truck and dispatch to L1 to immediate processing” requires the following entities in order to be carried out:

- Truck in waiting line 1 (LE1) of trucks accepted by the quality control inspectors ready to be unloaded.
- Receiving hopper unoccupied and in operating conditions (in LE2).
- Available hydraulic dumper (in LE3).
- Equipment of transport to process unoccupied (in LE5).



**Figura 1. Ciclos de actividad-inactividad del camión y del volteador y dos formas de conjuntarlos gráficamente.**  
**Figure 1. Cycles of activity-inactivity of the truck and the dumper and two forms of grouping them graphically.**

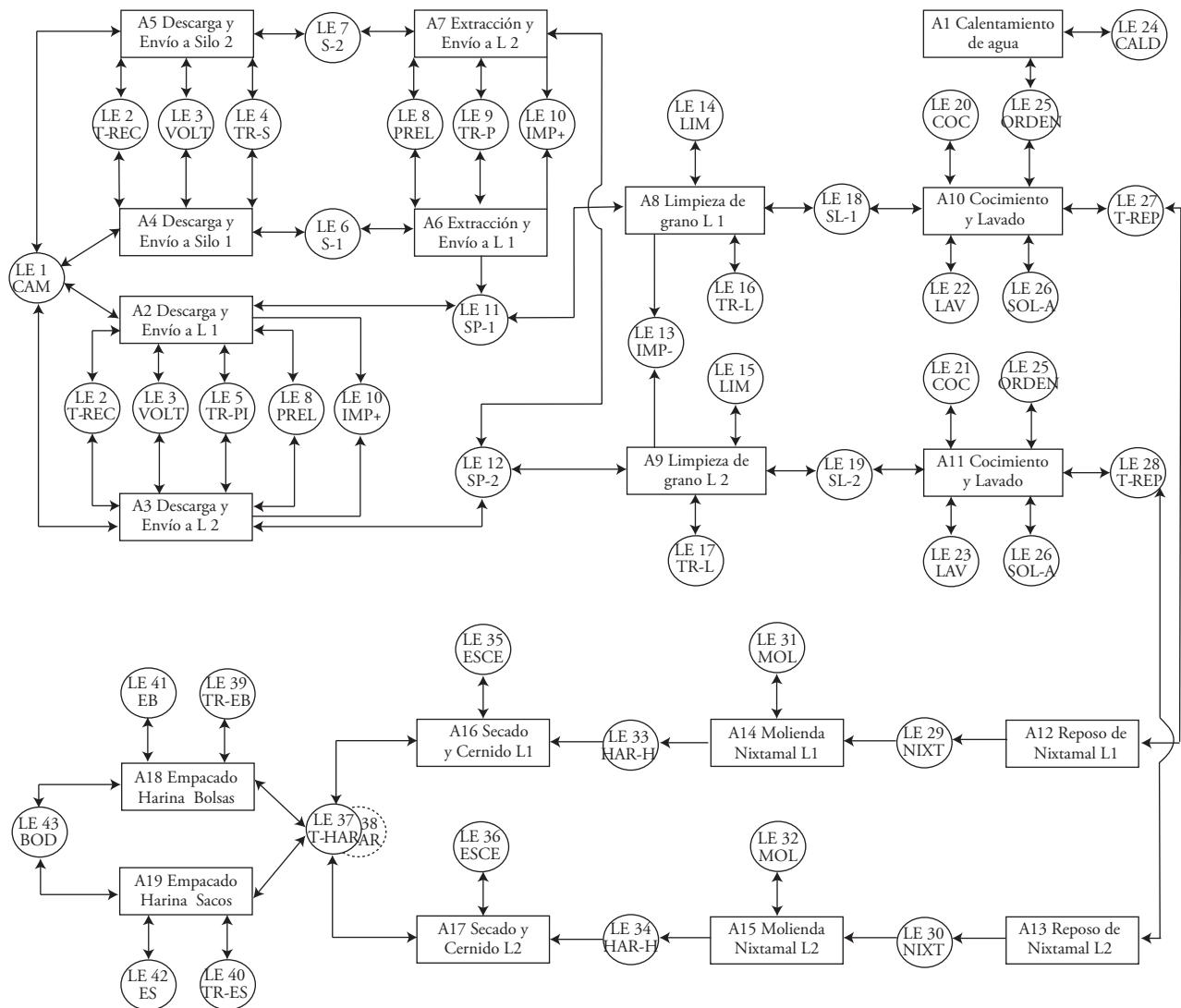
### Implementación del modelo

Para implementar el modelo en la computadora, todas las entidades, actividades y líneas de espera del modelo se tradujeron a objetos y programas en C++ y se usaron procedimientos de soporte para su manejo: 1) para el control de la simulación, 2) para la inserción, ordenamiento y extracción de entidades en las líneas de espera, 3) para la toma de estadísticas dinámicas de las líneas de espera y actividades, y 4) para el despliegue de resultados.

Las estadísticas dinámicas recolectadas son de dos tipos: las generales que se toman para cualquier modelo de simulación discreto (Law, 2006) y las particulares que se toman para las entidades de interés.

- Pre-cleaner unoccupied (in LE8).
- Pre-cleaning corn silo (in LE11) with same type of corn contained in the truck to be unloaded and available capacity greater or equal to the amount of corn contained in the truck.

Thus, when the abovementioned entities are available, activity 2 starts and a series of entrance flows will be executed that will extract the entities (those treated in the model as objects) from the corresponding waiting lines, and the other tasks related to this activity will be performed, which include the determination of their duration (which is comprised of a proportional part of the cargo and of a stochastic fit factor) and the actualization of the



A = Actividad

BOD = Bodega

CALD = Caldera

CAM = Camión

COC = Cocedor

EB = Empacadora de Bolsas

ES = Empacadora de Sacos

ESCE = Equipo de Secado, Cernido y Enfriado

HAR-H = Harina Húmeda

IMP- = Impurezas menores

IMP+ = Impurezas mayores

L = Línea de producción

LAV = Lavadora

LE = Línea de Espera

LIM = Limpiadora

MOL = Molino

NIXT = Nixtamal

PREL = Pre-limiadadora

S = Silo

SL = Silo maíz limpio

SOL-A = Solución Alcalina

SP = Silo Maíz Pre-limpio

T-HAR = Tolva de Harina

T-REC = Tolva Receptora

T-REP = Tolva de Reposo

TR-EB = Transporte a Empacadora de Bolsas

TR-ES = Transporte a Empacadora de Sacos

TR-L = Transporte a Limiadadora

TR-P = Transporte a Proceso

TR-PI = Transporte a Proceso Inmediato

TR-S = Transporte a Silios

VOLT = Volteador

**Figura 2. Modelo integrado.**  
**Figure 2. Integrated model.**

Las estadísticas generales para las líneas de espera son sus longitudes máximas y mínimas con sus respectivos tiempos de duración, sus longitudes promedio

values of the attributes of the pre-cleaning corn silo. When the activity is concluded, as a result of this activity and of its exit flows, the state of the system

y sus desviaciones estándar. Las estadísticas generales para las actividades son sus proporciones de tiempo de ocupación y sus medias y desviaciones estándar de sus duraciones. Las estadísticas particulares para las entidades son sus tiempos de permanencia en líneas de espera y en el sistema. Las estadísticas se despliegan al terminar una ejecución del modelo y se utilizan para determinar puntos críticos y de holgura en el modelo.

### Análisis de procesos en la planta

Una vez completado el modelo se implementó en computadora y se validó por la gerencia de producción. Una vez validado se procedió a su explotación para analizar procesos en la planta con diferentes insumos, inventarios y políticas de operación. A continuación se muestran algunos resultados de un análisis operacional que considera seis camiones (30, 20, 10, 10, 40, 40 t) cargados de maíz de tipos alternos (1, 2, 1, 2, 1, 2) esperando ser descargados.

Después de 23 min el primer camión ya descargó y se encuentra en la posición de salida. Se inicia la descarga del segundo camión que ya está sobre la tolva receptora, y quedan 4 camiones esperando en la fila de entrada. Del paso de maíz proveniente de la descarga del camión 1 a la pre-limiadadora se separaron 1.57 t de impurezas mayores. Como en el silo de maíz pre-limpio 1 ya hay materia prima, se inicia la actividad de limpieza de grano el cual se depositará en el silo de maíz limpio.

Después de 30 min aunque ya existe maíz en los silos de maíz limpio, la actividad de coccimiento no puede comenzar porque se requieren 45 min para calentar el agua necesaria y las actividades subsecuentes no pueden iniciar en el sistema.

Después de 93 min cuatro camiones ya descargaron y las dos líneas de producción se encuentran totalmente en actividad. El quinto camión comienza a descargar y el maíz es enviado al silo 1 de maíz. El silo de maíz pre-limpio L2 tiene capacidad remanente pero no se usa porque contiene otro tipo de grano. Las cantidades de material en los depósitos se muestran en el Cuadro 4 (columna 2).

Después de 158 min se descargaron todos los camiones y el maíz requerido para producción se envía, extrayéndolo de los silos. Las cantidades de material en los depósitos se muestran en el Cuadro 4 (columna 3).

is modified and the same activity can be carried out again, or others can be performed.

The form used to describe the above simulation model by means of its entities, waiting lines, activities, starting conditions of the activities and flows of entities between waiting lines and activities, is according to the standard form for describing this type of models (Kreutzer, 1986; Martínez and Iannou, 1995; Marzouk *et al.*, 2007).

### Implementation of the model

To implement the model in the computer, all of the entities, activities and waiting lines of the model were translated to objects and programs in C++ and support procedures for its management were used: 1) for the control of the simulation, 2) for the insertion, ordering and extraction of entities in the waiting lines, 3) for taking dynamic statistics from the waiting lines and activities, and 4) for displaying the results.

The dynamic statistics gathered are of two types: the general statistics that are taken for any discrete simulation model (Law, 2006) and the particular statistics that are taken for the entities of interest. The general statistics for the waiting lines are their maximum and minimum lengths with their respective times of duration, average lengths and standard deviations. The general statistics for the activities are their proportions of time of occupation and their means and standard deviations of their durations. The particular statistics for the entities are their times of permanence in waiting lines and in the system. The statistics are displayed when an execution of the model is finished and are used to determine critical points and of surplus in the model.

### Analysis of plant processes

When the model was completed, it was implemented in the computer and was validated by the production management. Once it was validated, it was exploited to analyze processes in the plant with different inputs, inventories and operation policies. In continuation, some results are shown of an operational analysis that considers six trucks (30, 20, 10, 10, 40, 40 t) loaded with alternating types of corn (1, 2, 1, 2, 1, 2) waiting to be unloaded.

**Cuadro 4. Material en los depósitos (t).****Table 4. Material in the deposits (t).**

| Depósito                    | Cantidad<br>a los 93 min | Cantidad<br>a los 158 min |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Silo 1                      | 0.0                      | 20.0                      |
| Silo 2                      | 0.0                      | 36.0                      |
| Silo de maíz pre-limpio L1  | 22.2                     | 33                        |
| Silo de maíz pre-limpio L2  | 33.3                     | 35.8                      |
| Silo de maíz limpio L1      | 0.20                     | 0.12                      |
| Silo de maíz limpio L2      | 0.28                     | 0.03                      |
| Harina tipo 1 en la bodega. | 2.8                      | 6.8                       |
| Harina tipo 2 en la bodega  | 0.8                      | 4.8                       |

En uno de los experimentos en los que el modelo mostró su utilidad se prueban dos políticas de operación para el procesamiento de órdenes de producción en la planta. Las órdenes son para producir harinas con maíz de tipo 1 y tipo 2. Los tamaños de las órdenes son de 40, 60, 80 y 120 t, los cuales son típicos en la planta; cada orden incluye la producción de harinas de ambos tipos. La cantidad de harina de cada tipo requerida en cada orden es estocástica y se generó en el modelo mediante el ajuste de distribuciones a datos históricos. Las políticas de operación consisten en procesar primero la parte de la orden que requiere maíz tipo 1 (o tipo 2) en ambas líneas de producción. Al comenzar el proceso de una orden se toma el maíz en los silos y cuando llega un camión con tipo de maíz del que se está procesando su carga pasa a proceso inmediato; en caso contrario se almacena en silos. Si en determinado momento se agota el maíz del tipo que se está procesando primero en ambas líneas, se activa el procesamiento del maíz del otro tipo sólo en una de las líneas de producción y la otra espera el arribo del tipo de maíz requerido. Los tiempos de llegada, tamaños y tipos de carga de los camiones son estocásticos y se generaron en el modelo mediante el ajuste de distribuciones a datos históricos para cada uno de los tamaños de las órdenes. Para cada tamaño de orden se efectuaron 90 réplicas (45 para cada política de operación) y las réplicas fueron independientes entre sí y entre políticas de operación. El total de réplicas probadas considerando los 4 tamaños de las órdenes fue 360 (180 para cada política de operación). La Figura 3 muestra las medias de tiempos de proceso para cada tamaño de orden y política de operación. El Cuadro 5 muestra los tiempos mínimo y máximo de proceso para cada una de las muestras de 45 réplicas así como sus desviaciones estándar, y

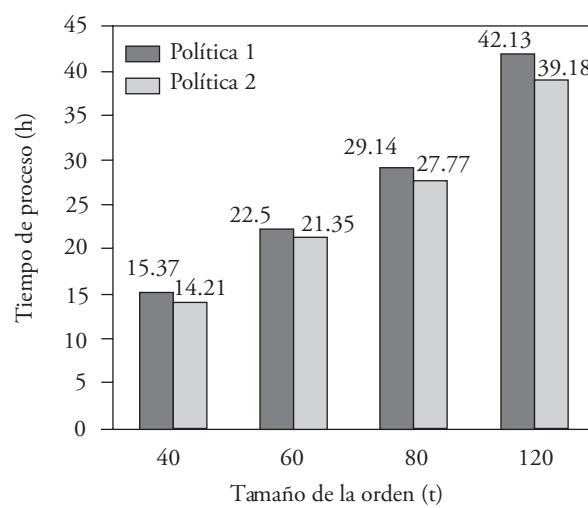
After 23 min the first truck was unloaded and is at the exit position. Unloading of the second truck begins, which is already on the receiving hopper, and there remain 4 trucks waiting in the entrance line. From passing the corn from the unloading of truck 1 to the pre-cleaner, 1.57 t of larger impurities were separated. As in the corn pre-cleaning silo 1 there is already raw material, the activity of grain cleaning begins, and the grain is deposited in the clean corn silo.

After 30 min, although there is already corn in the clean corn silos, the cooking activity cannot begin because 45 min are required for heating the necessary water and the subsequent activities cannot start in the system.

After 93 min, four trucks have already unloaded and the two production lines are in total activity. The fifth truck begins to unload and the corn is sent to silo 1. Pre-cleaning corn silo L2 has remaining capacity but it is not used because it contains another type of grain. The amounts of material in the deposits are shown in Table 4 (column 2).

After 158 min all of the trucks have been unloaded and the corn required for production is sent, extracting it from the silos. The amounts of material in the deposits are shown in Table 4 (column 3).

In one of the experiments in which the model showed its usefulness, two operating policies are tested for processing the production orders in the plant. The orders are for producing flours with type

**Figura 3. Medias de tiempo de proceso con dos políticas de operación.****Figure 3. Means of processing time with two operating policies.**

**Cuadro 5. Estadísticas de tiempo de proceso con dos políticas de operación.****Table 5. Statistics of processing time with two operating policies.**

|                               | Política de operación |       |            |       |             |       |             |       |
|-------------------------------|-----------------------|-------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
|                               | 1                     | 2     | 1          | 2     | 1           | 2     | 1           | 2     |
| Tamaño de la orden (t)        | 40                    | 40    | 60         | 60    | 80          | 80    | 120         | 120   |
| Tiempo mínimo (h)             | 14.08                 | 11.29 | 20.12      | 17.47 | 26.48       | 23.05 | 37.82       | 31.52 |
| Tiempo máximo (h)             | 16.96                 | 16.53 | 24.39      | 25.69 | 31.95       | 32.57 | 45.84       | 46.65 |
| Desviación estándar           | 0.91                  | 1.33  | 1.20       | 1.96  | 1.60        | 2.66  | 2.50        | 3.99  |
| Z muestral                    | 4.834                 |       |            | 3.359 |             | 2.949 |             | 4.202 |
| Z ( $\alpha/2=0.005$ )        |                       |       |            |       | 2.575       |       |             |       |
| Intervalo de confianza (99 %) | 1.160±0.618           |       | 1.152±.883 |       | 1.363±1.190 |       | 2.949±1.807 |       |

para cada tamaño de orden, el valor de la estadística Z calculada, la Z de tablas para  $\alpha=0.01$  y el intervalo de confianza de 99 % de la diferencia de medias. Para todos los tamaños de órdenes hubo diferencia estadísticamente significativa entre las dos políticas de operación ( $\alpha=0.01$ ) y la política de procesar primero el maíz tipo 2 fue la mejor con un tiempo de proceso considerablemente menor (con 99 % de confiabilidad).

## CONCLUSIONES

Con el modelo desarrollado se analizó la conveniencia de implementar nuevas políticas de operación en la planta: procesar un solo tipo de grano simultáneamente en ambas líneas de producción; procesar primero las órdenes para maíz tipo 1 y vice-versa; determinar el tipo de grano procesado en cada línea de producción de acuerdo a las cargas esperadas de los camiones en el día; y permitir la recepción de carga de cada tipo sólo en días predeterminados. El modelo es útil para la planeación administrativa dado que permite observar y analizar el comportamiento de todos los componentes de la planta a corto, mediano y largo plazo.

## LITERATURA CITADA

- Arjona-Suárez, E., and E. López-Mellado. 1996. Synthesis of coloured Petri nets for FMS task specification. Int. J. Robotics and Automation 11(3): 111-117.
- Banks, J., J. S. Carson, B. L., Nelson, and D.M. Nicol. 2009. Discrete Event System Simulation. 5th. ed. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 640 p.
- Deitel, P., and H. M. Deitel. 2009. C++ How to Program. 7th. ed. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 1104 p.
- Dickey, L. C., M. F. Dallmer, E. R. Radewonuk, N. Parris, M. Kurantz, and J. C. Craig Jr. 1997. Hydrocyclone separation of dry-milled corn. Cereal Chem. 74(5): 676-680.

1 and type 2 corn. The sizes of the orders are of 40, 60, 80 and 120 t, which are typical in the plant; each order includes the production of both types of corn. The amount of flour of each type required in each order is stochastic and was generated in the model by means of the fitting of distributions to historical data. The operating policies consist of processing the part of the order that requires type 1 corn (or type 2) in both production lines. When the process of an order begins, the corn is taken in the silos and when a truck arrives with the type of corn that is being processed, its cargo passes to immediate process; otherwise it is stored in silos. If in a given moment the corn of the type that is being processed first runs out in both lines, the processing of the other type of corn is activated only in one of the production lines and the other waits for the arrival of the required corn. The times of arrival, sizes and types of cargo of the trucks are stochastic and are generated in the model by means of the fitting of distributions to historical data for each one of the sizes of the orders. For each size of order 90 replicates were carried out (45 for each operating policy) and the replicates were independent from each other and among operating policies. The total of replicates tested considering the 4 sizes of the orders was 360 (180 for each operating policy). Figure 3 shows the means of processing time for each size of order and operating policy. Table 5 shows the minimum and maximum processing times for each one of the samples of 45 replicates along with their standard deviations, and for each size of order, the value of the Z statistic calculated, the Z of tables for  $\alpha=0.01$  and the confidence interval of 99 % of the difference of means. For all the sizes of orders there was statistically significant difference between the two operating policies ( $\alpha=0.01$ ) and the

- Flores, R. A., E. S. Posner, R. Phillips, and C. W. Deyoe. 1993. Modeling the economic evaluation of the wheat flour milling operations. *Trans. of the ASAE* 36(4): 1143-1149.
- Kreutzer, W. 1986. System Simulation: Programming Styles and Languages. Addison Wesley. Reading, Massachusetts. 366 p.
- Law, A. M. 2006. Simulation Modeling and Analysis. 4th. ed. McGraw-Hill. NewYork. 800 p.
- Liu, M. C., R. A. Flores, C. W. Deyoe, and E. S. Posner. 1992. Assessment of a computer simulation model for the flour milling industry. *Cereal Foods World* 37(8): 649-654.
- Loza-Garay, M., and R. Flores. 2000. Computer simulation of flour mill as a stochastic model. In: FOODSIM 2000-1<sup>st</sup>. Int. Conf. Simulation in Food and Bio-industries. Nantes, France. pp: 247-251.
- Martínez, J.C., and P.G. Ioannou. 1995. Advantages of the activity scanning approach in the modeling of complex processes. In: Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference. Arlington, VA, U.S.A. pp: 1024-1031.
- Marzouk M., H. Z. El-Dein, and M. El-Said. 2007. Application of computer simulation to construction of incremental launching bridges. *J. Civil Eng. Manage.* 13(1): 27-36.
- Pérez, S. A., Z. M. Niño, and G. Cisneros. 2006. SIMPHA: Simulation software for production processes of corn oil and pre-cooked corn flour. *Información Tecnológica* 17(6): 133-139.
- Singh, J., and N. Singh. 2004. Effect of process variable and sodium alginate on extrusion behavior of nixtamalized corn grit. *Int. J. Food Properties* 7(2): 329-340.
- Souza, C. M., D. Queiroz, and A. F. Lacerda. 2002. Simulation of the corn seed drying process in fixed bed. *Sci. Agric.* 59(8): 653-660.

policy of processing first corn type 2 was the best, with a processing time that was considerably shorter (with 99 % reliability).

## CONCLUSIONS

With the developed model the convenience of implementing new operating policies in the plant was analyzed: to process a single type of grain simultaneously in both production lines; to process first the orders of type 1 corn and vice-versa; to determine the type of grain processed in each production line according to the cargos expected from the trucks in the day; and to allow the reception of cargo of each type only on predetermined days. The model is useful for administrative planning, given that it makes it possible to observe and analyze the behavior of all the components of the plant in the short, intermediate and long term.