

# Modelación y simulación de operaciones de construcción

## Rodrigo Verbal R.

Ingeniero Investigador, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile. Casilla 306, Santiago.

## Alfredo Serpell B.

Profesor, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Santiago.

**Resumen:** se presenta una metodología de modelación y análisis de operaciones de construcción, basada en el computador, que ofrece un gran potencial para el mejoramiento de la productividad en obra. Para granear esta metodología, se desarrollan algunos ejemplos donde se pueden apreciar ciclos de procesamiento, relaciones entre recursos y análisis de productividad operacional. De esta manera, se pretende mostrar una técnica innovadora en el análisis de productividad y diseño operacional a través de diferentes aplicaciones en el campo de la Construcción. Por último, se discuten algunos comentarios obtenidos de la experiencia de modelar y simular procesos de construcción.

## I. INTRODUCCIÓN

Una de las labores que toda administración efectiva de un sistema de producción debe realizar continuamente, es el análisis y mejoramiento de los procesos de producción. A través de ello es posible ir incorporando en forma progresiva, aumentos de productividad en la ejecución de las distintas operaciones. A continuación se expone una metodología de estudio de la productividad de operaciones de construcción, que utiliza un programa computacional basado en un lenguaje orientado a la representación de procesos constructivos. Para la aplicación de este programa, se requiere cumplir dos etapas: modelación o creación del modelo que representa el sistema de interés y simulación o procesamiento computacional de modelos.

El programa computacional que se presenta corresponde a MicroCYCLONE (CYCLic Operations NETwork system), creado por Daniel W. Halpin (1). La necesidad de las empresas constructoras del país por contar con sistemas que incluyan los parámetros fundamentales para el diseño y modelación de operaciones repetitivas, puede verse ampliamente satisfecha con un lenguaje de modelación como el que provee este programa. Además, estos modelos permiten almacenar el conocimiento actual de cada procedimiento, y predecir respuestas ante variaciones en su diseño.

## II. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MODELACIÓN

Para describir el proceso de modelación, se definirán algunos conceptos previos. Se entenderá por modelo a la representación simplificada de una situación de la vida real, que hace uso de un conjunto de hipótesis que establecen la forma en que se relacionan las variables involucradas. La concepción de un modelo se realiza normalmente a través de las siguientes etapas:

- Definición del problema o sistema
- Identificación de los recursos o unidades de flujo relevantes
- Identificación de todos los estados posibles (actividad y ocio) de las unidades de flujo e identificación de los ciclos Individuales de recursos
- Integración de los ciclos de los recursos
- Inicialización o ubicación inicial de los recursos
- Determinación de la duración de las actividades
- Validación del modelo a través de verificación (manual) de resultados con casos reales

Ya que cada modelo representa a un sistema, interesa conocer la respuesta de éste a los estímulos que el analista seleccione. Esto se consigue gracias al proceso de simulación del modelo, por medio de un análisis y síntesis no determinístico. Es decir, se analiza la respuesta del modelo ya estructurado ante variaciones de los estados temporales de las actividades, para luego variar la estructura del modelo, dejando constante las características de entrada o salida (análisis de sensibilidad). Al indicar un estudio no determinístico, se quiere decir que es posible estimar una probabilidad de ocurrencia para ciertos estados e incorporar la incertidumbre propia de muchas de las variables de una operación de construcción.

Dado que es muy ineficiente realizar manualmente las iteraciones de todos los ciclos de una simulación, se requiere contar con programas computacionales de procesamiento de datos que generalmente proveen las siguientes capacidades:

- Ingreso computacional de una representación gráfica ("malla") del modelo y de los datos asociados
- Procesamiento y extracción de resultados
- Control de las variables cruciales y optimización del manejo de recursos
- Aplicación teórica de soluciones y evaluación de las consecuencias

En la figura 1 se esquematiza la relación de las tareas de observación de terreno, adquisición de datos, análisis estadístico, construcción del modelo matemático y, finalmente, su simulación computacional. En caso que no se cuente con información previa ni se tenga una biblioteca de datos concernientes al proceso, la adquisición de información se puede realizar en terreno, por medio de observaciones visuales o filmaciones de video (2).

### **III. LENGUAJE DE MODELACIÓN**

A continuación, se pretende introducir brevemente el lenguaje de modelación CYCLONE, para luego construir modelos que ejemplifican su uso y que representan situaciones de interés para la construcción.

Este lenguaje define tres estados básicos en que se puede encontrar cualquier recurso en un instante de tiempo: estado activo o de procesamiento, estado pasivo o de espera, y transición entre estados. La representación de estos estados otorga un formato gráfico para la construcción del modelo, el cual se transcribe a un lenguaje computacional que permite realizar el proceso de simulación (3) (4) (5).

Siguiendo la convención de representar el estado activo con un cuadrado, el pasivo por un círculo y los arcos de unión por flechas, se tienen los elementos mostrados en la figura 2.

#### **3.1 Elemento de modelación NORMAL**

Es un elemento con una función intrínseca de demora del flujo de unidades y con propiedad de libre acceso. La magnitud y características de distribución probabilística de las demoras las establece inicialmente el modelador.

De un nodo NORMAL pueden salir y entrar cuantos arcos se desee. En caso que salgan, por ejemplo dos arcos con distinto rumbo, se estará procesando una unidad por cada vía. En este caso, una unidad de recurso procesada se encontrará con la misma probabilidad de continuar por un camino u otro. También, a cada uno de los caminos de salida se le puede asociar una probabilidad de ruta distinta, siempre y cuando la suma de las probabilidades de todos los caminos que salen de un nodo sea igual a 1.

### **3.2 Elemento de modelación COMBI**

Es un elemento con una función intrínseca de demora del flujo de unidades, que opera en el instante en que ciertos recursos se encuentran disponibles. Es por ello que cada arco que ingresa al nodo COMBI debe provenir directamente de un nodo QUEUE.

Al igual que el nodo NORMAL, el nodo COMBI permite una definición de duraciones constantes (determinísticas), o aleatorias dentro de un rango con distribución probabilística. También cabe la asignación probabilística de rutas que salgan desde él.

### **3.2 Elemento de modelación QUEUE**

Es un elemento que define disponibilidad de recursos que esperan ser utilizados o servidos en el nodo COMBI. Es en estos nodos donde se asignan los recursos que circularán en la malla del modelo. Si un QUEUE libera recursos a dos o más COMBI, es decir, tales recursos deben satisfacer varias actividades, se preferirá aquellos COMBI que primero cumplan sus condiciones de admisión y, en caso que ocurra lo mismo en más de uno, la unidad optará por aquel nodo COMBI etiquetado con el número más bajo.

Los informes finales de simulación demuestran particular Interés en los nodos QUEUE, ya que indican el porcentaje de desocupación de los recursos que se definieron en él. Otra utilidad de este nodo es una función intrínseca de generación de unidades a partir de las que recibe, donde gracias a su función GENERATE amplifica las unidades que arriban a él por un número predeterminado por el modelador.

### **3.4 Elemento de modelación ARCO de Unión**

Es un elemento que define la dirección del flujo de unidades y no tiene demora de tiempo asignada. El paso de unidades a través de él puede ser probabilístico, según se mencionó en 3.1 y 3.2, pero cabe recordar que no se puede asociar probabilidad a ARCOS que salgan de nodos QUEUE.

### **3.5 Elemento de modelación COUNTER o ACCUMULATOR**

Es un elemento que permite contar las unidades que lo atraviesan, con lo que se puede cuantificar la productividad del proceso y determinar el fin de éste después de una cantidad de ciclos preestablecida. Sólo se debe colocar un nodo de este tipo en cada modelo.

### **3.6 Elemento de modelación FUNCTION**











Es un elemento que no presenta funciones intrínsecas, sino que deben ser definidas por el modelador. Una de ellas es la de consolidar unidades (CONSOLIDATE) al dividir las unidades según un número predefinido por el modelador. Otras funciones de menor interés y con fines estadísticos son las de STATISTICS y MARKING, más una función COUNT muy similar al COUNTER.

En la tabla 1 se resumen las relaciones de precedencia entre cada uno de estos elementos, entendiéndose por: R = requerido por definición; N = no factible y P = posible.

## **IV. PROCESO DE SIMULACIÓN**

Una vez que la tecnología operacional haya sido decidida, corresponderá asignar duraciones de tiempo a cada actividad. Para ello se puede acudir a una biblioteca o base de datos que relaciona los tiempos medios y su variación, o simplemente realizar observaciones en terreno que satisfagan los requerimientos de validación estadística para el ajuste de distribución de ocurrencias (6).

**Tabla 1. Tabla de precedencia, del elemento A precediendo al elemento B**

A \ B					
	N	P	P	P	P
	N	P	P	P	P
	R	N	N	N	N
	N	P	P	P	P
	N	P	P	P	N

Por ejemplo, si se realiza X cantidad de observaciones al ciclo de transporte de material en camiones, se podrá utilizar la duración más probable y su variabilidad de acuerdo a un ajuste estadístico como el representado en la figura 3, en el cual se compara la distribución de frecuencias obtenida con una variedad de distribuciones teóricas.

Para resumir la información de los recursos involucrados y sus relaciones en los ciclos, es conveniente utilizar una tabla como la que se adjunta a continuación (ver tabla 2). A ello, se puede agregar el cálculo de costos operacionales, desagregados en variables y fijos (7), de modo de incluir parámetros de control factibles de modificar durante la simulación, para analizar su influencia en la respuesta del sistema (8).

**Tabla 2. Parámetros relevantes**

#Nodo	Descripción	Tipo de Nodo	Recursos	Duración (minutos)

Las simulaciones computacionales de estos modelos, se han ejecutado utilizando el programa MicroCYCLONE, creado por Daniel W. Halpin, de la Universidad de Purdue, EE.UU. Aunque no es de interés mostrar los comandos de manejo del programa MicroCYCLONE, vale la pena indicar que cuenta con un lenguaje natural especialmente orientado al problema de emulación de procesos (POL = problem-oriented language).

La organización del software MicroCYCLONE considera una serie de módulos independientes que controlan segmentos particulares de procesamiento (2) (3), según se muestra en figura 4.

## V. EJEMPLO DE APLICACIÓN NÚMERO 1

La descripción del proceso que se analiza a continuación orienta respecto de las etapas que se deben seguir para la modelación de operaciones. Este primer ejemplo consiste en el análisis y

modelación del arneo y acopio temporal de suelos, en una planta de selección de éstos. Tales materiales son utilizados en la construcción de una presa de tierra de un embalse.

Se supondrá que se debe separar alrededor de ocho tipos de suelos distintos, los que contemplan procesos similares de transporte y arneo. La atención se centrará sólo en el material que conforma el relleno impermeable del núcleo central, denominado lajar.

El transporte comprende el acarreo del material desde acopios o botaderos temporales (que rodean el yacimiento de extracción) hacia una tolva que alimenta un amero. El amero descarga los materiales clasificados mediante correas transportadoras hacia las zonas preestablecidas dentro de la planta, desde donde se cargan y transportan hacia otras zonas de acopio temporal.

Como ya se dijo, la metodología de estudio que se usará será la de modelación de las operaciones elementales del proceso, para luego combinarlas de acuerdo a ciclos relacionados. Dado que se pretende ejemplificar en forma simple esta metodología de estudio, se ha querido usar un caso sencillo. Sin embargo, ello no desmerece los alcances que ofrece la modelación de procesos, pudiendo desarrollarse un análisis tan completo como se desee (7).

En seguida, respetando la secuencia de pasos descrito en la sección 2, corresponde identificar los recursos o unidades de flujo relevante. En esta primera aproximación, ellos son el suelo acopiado alrededor del yacimiento y que luego será arneado y seleccionado, un cargador frontal de 5.5 m<sup>3</sup> de capacidad, tres camiones de 20 m<sup>3</sup> (o lo que es similar 35 ton.) de capacidad de carga y transporte, un equipo de arneado con una tolva de 50 toneladas de capacidad y tasa de arneado promedio de 250 ton/hr, y por último el personal requerido para cada operación.

Vale la pena indicar que se puede incluir una mayor cantidad de recursos dependiendo del nivel de detalle con que se enfoque el problema. Otras unidades de flujo podrían ser: unidades de control de los turnos de trabajo, unidades de control de vías de acceso, unidades de espacio disponible para acopiar material, equipo de reparaciones, combustibles, lubricantes y accesorios, los mismos materiales que se subdividen después de cada arneo, el permiso de inspectores, temperatura o calor ambiental que otorgue humedades especificadas a los suelos, etc.

En la figura 5 se describe la secuencia de actividades de excavación, transporte y selección del suelo tipo lajar, por una unidad de volumen (o peso). Los elementos incluidos en dicho flujo son los siguientes:

- 1: Suelo en yacimiento
- 2: Suelo excavándose y acopiándose alrededor de su yacimiento
- 3: Suelo acopiado esperando a ser transportado
- 4: Suelo cargándose a los camiones
- 5: Suelo transportándose en camiones hacia el amero
- 6: Suelo en tolva del amero, seleccionado y descargado mediante cintas transportadoras a acopios pequeños
- 7: Suelo seleccionado esperando a ser transportado a acopios temporales o a volver a ser arneado y subdividido
- 8: Suelo cargado en camiones de transporte
- 9: Suelo transportado hacia acopios temporales
- 10: Suelo descargándose en los acopios
- 11: Suelo seleccionado esperando en acopios temporales para ser llevado a la zona de construcción de la presa.

Respecto a los equipos de carga y transporte, también se identifican ciclos que delimitan sus movimientos a zonas específicas dentro de cada turno de trabajo. Para un cargador frontal actuando en estado de régimen, el ciclo puede ser el descrito en la figura 6 o figura 7, dependiendo del nivel de simplificación que se adopte.

La variable  $pr(l)$  indica la probabilidad de que se tenga suficiente material acopiado para cargar otro camión en el siguiente ciclo. Por ejemplo,  $pr(l)=0.8$  indica que para ocho de cada diez ciclos seguirá

otro carguío de camión de inmediato al carguío anterior. A su vez la variable  $pr(2)$  corresponde a la probabilidad que no se tenga suficiente material acopiado para el próximo carguío de camión. En el ejemplo,  $pr(2)=0.2$ .

Si se adopta un caso más simple, como el de la figura 7, se independiza al cargador de la responsabilidad de cooperar al apilamiento de material, debiendo sólo esperar junto al camión (que debe cargar) y a que haya suficiente tierra.

Algo similar ocurre con los camiones. Tomando cada camión como un medio de transporte con una probabilidad de avería, a éste le corresponderá ser cargado, transportar la carga y descargarla en la tolva del amero o en el acopio que le corresponda a su trayecto. Un esquema de lo mencionado se muestra en la figura 8.

En este caso,  $pr(3)$  es la probabilidad de que el camión no sufra averías o "pannes" en el trayecto y  $pr(4)$  corresponde a la probabilidad de que el camión se eche a perder y deba ser retirado para reparación.

Finalmente, se pueden identificar dos estados para el equipo de arneado: esperando material y procesando material. Sin embargo, el procesamiento de materiales presenta algunas características que determinan el ritmo de avance si se cuenta con el apoyo adecuado de carga y transporte de suelos. Esto es, que de una descripción como la de la figura 9, se analice el nodo de estado activo con más detalle, en figura 10.

Debido a que para comenzar a arnear y a separar los distintos suelos por tamaño se requiere material original y personal de operación, al nodo 41 se le deberá enlazar un bucle con un nodo QUEUE de disposición de tales recursos. Pero, la operación de arneado introduce una serie de variables que hasta ahora se habían evitado y que aunque no afectan mayormente la definición de su modelo, influyen de distinta modo en su rendimiento. Ellas son las variaciones de tipo de suelo y granulometría que se maneja, la humedad del suelo extraído y luego arneado, la velocidad adecuada (por condiciones de seguridad) para el traslado de los distintos materiales en correas transportadoras, y probabilidad de falla de los equipos de arneo. Un ejemplo de modelación del proceso de separación de materiales es el indicado en la figura 10. Las variables en este caso son las siguientes:

- 60: nodo CONSOLIDATE, que modifica la tasa de producción por tenerse un rango de humedades mayores del suelo, lo cual desmejora en un 50% el rendimiento
- 50: carguío de tolva de recepción de materiales
- 51: separación de materiales en amero vibratorio
- 52: tolva de carga desocupada (nodo reemplazante del nodo 40 de la figura 8)
- 49: limpieza o preparación del equipo para recibir la nueva carga
- 53: conducción de materiales tipo A hacia acopios contiguos al amero. Sólo el material tipo A se destinará al núcleo de la presa
- 54: conducción de materiales tipo B hacia acopios contiguos al amero
- 55: correa transportadora clase A disponible
- 56: correa transportadora clase B disponible
- 57: nodo contador de producción del material clase A.
- 58: almacenamiento de suelo tipo A en acopio temporal, previo al traslado a la zona de la presa.
- 59: almacenamiento de suelo tipo B, en acopio temporal, previo a un reprocesamiento de otros distintos arneados.  $pr(5)$  y  $pr(6)$ : proporción de materiales A y B respectivamente, o lo que es lo mismo (para el diseño del modelo), probabilidad de trabajar con materiales A y B.

La Integración de los ciclos descritos previamente y en forma individual, se llevará a cabo según la simplificación mostrada en la figura 11, suponiendo que X unidades de carga del cargador corresponden a una unidad volumétrica de camión.

A continuación, se presentará otro ejemplo que dará muestras de la aplicabilidad de la modelación y simulación en procesos menos extensos.

## VI. EJEMPLO DE APLICACIÓN NÚMERO 2

Este ejemplo consiste en un análisis realizado a una operación de hormigonado de losas de un edificio. La secuencia de pasos se desarrollará en términos similares al caso anterior, y se incluirán datos reales de las duraciones de las actividades básicas, observadas mediante filmaciones de video y analizadas estadísticamente.

El hormigonado de losas se realizaba con una grúa torre, que trasladaba capachos de 0.7 m<sup>3</sup> de capacidad. Se disponía de dos capachos, con dos obreros que se encargaban de dirigir la ubicación de los capachos, además de su enganche y desenganche de la grúa. El abastecimiento de hormigón estaba determinado por la llegada de camiones de hormigón premezclado, cada 35 minutos. Luego del transporte del capacho cargado, posteriormente dirigido por dos ayudantes hacia la zona de colocación, el hormigón era descargado por dos "concreteros", esparcido por tres "paleros", vibrado por dos operarios "concreteros" con un vibrador de inmersión y con un ayudante cada uno, regleado por tres "concreteros" y finalmente platachado por tres "albañiles".

Los ciclos de los recursos para este caso son bastante elementales, explicándose por sí solos en las figuras 12 a 18. El ciclo de la operación de colocación de hormigón observado en terreno, se reduce al representado en la figura 17. Los esfuerzos de optimización de recursos se realizaron sobre una base de operación favorable y conservadora, de modo que incrementos de la productividad a través de la simulación computacional optimicen el uso de los recursos ideado originalmente por diseñadores o en terreno. La pregunta que cabía formularse en este caso era: ¿cómo mejorar la operación de las cuadrillas (o del sistema) desde la situación conservadora en que se opera según se programó?

Haciendo uso del esquema de tabulación de datos propuesto en la sección 4, en la tabla 3 se resumen los parámetros de interés del modelo a simular.

Si también se incluyeran los costos operacionales de los recursos involucrados, se podría evaluar el costo por hora y por m<sup>3</sup> de hormigón colocado. En esta oportunidad no vale la pena detallar el desglose de costos unitarios, aunque sería interesante observar las disminuciones porcentuales en costos por concepto de ahorros en equipo y mano de obra.

Del análisis de la ociosidad de los recursos, después de una simulación de 200 minutos, o lo que es equivalente a 32 ciclos de carga de capacho, se apreció que la grúa tenía un tiempo de desocupación relativamente bajo en los estados de operación en régimen, supeditado a la capacidad del capacho y a la habilidad para enganchar y desocupar capachos.

Los resultados obtenidos indicaron lo siguiente:

- los obreros relacionados al transporte presentaban un bajo grado de utilización (75% del tiempo estaban esperando)
- los concreteros-paleros que esparcían el hormigón indicaron un 28% del tiempo desocupados
- uno de los vibradores estaría esperando una gran parte de su tiempo (97.7%)
- los concreteros del regleado tenían una espera alta de tiempo (75.3%)
- los albañiles del platachado estaban cerca de la mitad de su tiempo desocupados (44%)

# NODO	DESCRIPCIÓN	TIPO DE NODO	RECURSOS	DURACIONES (min)
2	obreros carguío esperando	Q	2 Ayudantes	
3	capacho disponible	Q	2 Capachos	
4	Carguío capacho	COMBI		Beta u=0.37 desv.=0.03 mín.=0.33 máx.=0.40
5	capacho esper. transporte	Q		
6	grúa disponible	Q	1 Grúa	
7	transporte hormigón	COMBI		Beta u=.77 desv.=0.14 mín.=0.40 máx.=0.92
8	hormigón disponible			Q
9	obreros descarg. esperando	Q	2 Concreteros	
10	descarga hormigón	COMBI		Beta u=0.25 desv.=0.11 mín.=0.12 máx.=0.55
i i	retorno grúa	NORMAL		Beta u=0.47 desv.=0.06 mín. =0.38 máx.=0.62
12	retorno capacho	NORMAL		Beta u=0.25 desv.= 0.11 mín.=0.38 máx.=0.62
13	horm. descarg. disponible	Q		
14	obreros esparcido esper.	Q	3 Paleros	
15	esparcido hormigón	COMBI		Beta u=1.07 desv.=0.22 mín.=0.70 máx.=1.43
16	horm. esparcido disponible	Q		
17	vibrador disponible	Q	2 Vibradores	
18	obreros vibrado esperando	Q	2 Concreteros + 2 Ayudantes	
18	vibrado hormigón	COMBI		CTE. = 1.2
20	consóidate	FUNCTION		Consolida 4 unidades
21	horm. vibrado disponible	Q		
22	obreros esperando	Q	3 Concreteros	
23	reglear hormigón	ÓÓMÉI		CTE.=1.5
24	horm. regleado	Q		
25	obreros esperando	Q	3 Albañiles	
26	platachado hormigón	COMBI		CTE.=3.5
27	counter	CONTADOR		cantidad= 2.2 m3

Como se estaba modelando la operación en estado de régimen, se consideró apropiado intentar mejorar el proceso a partir de estas condiciones favorables.

Del análisis de ociosidad de los equipos y maquinaria, se pudo observar que la grúa era el recurso mayormente utilizado en la colocación de hormigón, de tal manera que la eficiencia de su utilización determinaba en gran medida la productividad de la mano de obra que participaba en la operación de hormigonado. En la tabla 4 se demuestra que si se reducía uniformemente la duración de las actividades en que participaba la grúa (nodos 7, 10, 11 y 12), se obtendría una disminución del tiempo ocioso de los recursos humanos involucrados. De esta forma, al aumentar ficticiamente la productividad de la mano de obra y grúa, hasta alcanzar un incremento del 30% sobre el rendimiento inicial, se conseguiría una ocupación total de los esparcidores de hormigón. Ello es difícil de alcanzar en la práctica, no obstante, un análisis de este tipo permite cuantificar las condiciones de borde de una política de aumento de rendimientos.



**Tabla 4. Reducción de esperas y su influencia en la productividad**

Número de simulación	Duración de tareas de la grúa (min)				% de reducción de duración	Productividad (m3/hr)	% de tiempo en esperas				
	Tarea #						Tarea #				
	7	10	11	12			0	14	18	22	26
1	.63	.25	.47	.47	0	16.7	77	28	98	75	44
2	.53	.23	.42	.42	10	20.48	81	10	91	70	30
3	.50	.20	.37	.37	20	23.10	81	2	85	66	22
4	.44	.18	.33	.33	30	23.63	81	0	84	66	21

Los siguientes pasos correspondieron a sucesivas modificaciones de las relaciones entre recursos, con el fin de reducir la cantidad de recursos ociosos o aumentar su rendimiento. En la figura 18 se representa una modificación de la estructura del modelo inicial, la cual consta de una reducción de 18 a 12 operarios y un reordenamiento de sus funciones, manteniendo el rendimiento inicial de colocación de hormigón de 16.7 m3/hr. Se estima que en este ejemplo se ha conseguido disminuir en un 25% los costos directos relativos a la mano de obra, a través de una disminución de la ociosidad de los recursos y modificaciones del proceso productivo en que éstos participan, cuidando no disminuir el rendimiento de producción de la cuadrilla.

La modificación de la cuadrilla de hormigonado de losas consistió en: un obrero encargado de cargar capacho, cuatro descargan capacho y esparcen hormigón, un sólo vibrador con un concretero, y cuatro obreros que reglean y platachan hormigón. Los tiempos ociosos fueron reducidos en promedio desde el 86% hasta un 21%, aunque el tiempo de desocupación de obreros relacionados con el transporte se mantuvo alto (75%).

## VII. DURACIÓN DE LAS ACTIVIDADES MODELADAS

Es importante mencionar dos tipos de factores (1) que determinan la elección del tiempo o demora asignados a cada actividad: ellos son la naturaleza de la operación y las habilidades del estimador. En vista de ello, a continuación se proponen cuatro métodos simples (adicionales a las filmaciones) de obtención de datos relativos a la duración de actividades.

- (i) Experiencia: quienes participan del proceso de trabajo en cuestión normalmente conocen el tiempo requerido para cada tarea, debido a su experiencia y a la frecuencia con que ejecutan tareas similares o de magnitud comparable.
- (ii) Estimaciones: quienes realizan la planificación o estimaciones relativos al trabajo comunmente obtienen información de otras obras, previas o similares, permitiéndoles establecer tasas de productividad y rendimientos en función del tamaño y combinación de los recursos utilizados en cada actividad.
- (iii) Ensayos iniciales propios: en aquellos casos en que la experiencia no sea aplicable a la realidad que se enfrenta, o no se cuenta con expertos cercanos, es conveniente crear cuadrillas y faenas "piloto" para medir rendimientos por tarea y factores de variabilidad.
- (iv) Uso de modelos predictivos: conociéndose las tareas componentes de una actividad y el rendimiento de sus recursos, se podría variar la magnitud de combinaciones de ellos por medio de un modelo simple, con el fin pronosticar las posibles duraciones de las actividades.

En lo que concierne a las duraciones determinísticas, que es la asignación de un valor específico y fijo para la duración de la tarea, se pueden presentar los siguientes casos de variabilidad:

- a. - El tiempo está relacionado a factores inherentes o

complementarios de la actividad, por ejemplo, por el tiempo de revoltura del hormigón en la betonera, o los tiempos de curado del hormigón, o la duración de jornadas de trabajo complementario.

b. - La duración de cada tarea que conforma una actividad puede estar sujeta a muy pequeñas variaciones alrededor de un valor promedio, de tal modo que se pueden fijar valores constantes a las duraciones de tareas, y mediante la combinación de ellas (adición, traslapos, etc.) se establece una duración para la actividad que las globaliza en un sólo ítem de trabajo,

c- El propósito de la modelación es tal que se permite ignorar cualquier variación probabilística.

Por el contrario, en aquellos sistemas donde las duraciones de tareas están gobernadas por una asignación de tiempo aleatoria, la productividad de las operaciones puede verse influenciada por sus duraciones y variabilidad, y por consiguiente, por la ocurrencia de acumulaciones de tiempo en estados ociosos y de espera (6) (8).

## 9. Conclusiones

Generalmente los sistemas de administración en obras de construcción se desempeñan en base a un concepto de "administración por excepción", en función de la detección de desviaciones del plan de trabajo y a través de la readecuación de recursos para nuevas metas de plazo y costo. Los métodos de modelación y simulación computacional responden efectivamente a este esquema de administración, en tanto se tenga una medida del tiempo transcurrido en los ciclos de cada recurso. De esta manera, no sólo se pueden detectar las causas de ineficiencia, sino que se cuenta con una herramienta para el mejoramiento de procesos y para la instrucción de supervisores.

Sin embargo, el esfuerzo profesional adicional al normal y la exactitud variable de las respuestas, sólo se justifican para operaciones de una importancia o envergadura tal que los recursos invertidos en modelar y simular sean menores que los beneficios de las mejoras factibles de aplicar. Este puede ser el caso de actividades críticas para el avance del proyecto como actividades que ocupan maquinaria y mano de obra cara y escasa.

Otro factor determinante se refiere al tamaño del proyecto de construcción y de las operaciones que se pretende modelar y simular. Actualmente, el programa MicroCYCLONE no permite archivos de datos demasiado extensos en la definición de relaciones entre recursos, debiéndose parcelar los problemas o simplificar los ciclos. Las aplicaciones mostradas en este artículo pueden ser un buen ejemplo de ello. Otros casos factibles de evaluar mediante modelación y simulación de actividades pueden ser la edificación residencial e industrial, construcción de caminos y canales, instalación de tuberías, construcción de túneles y represas, excavaciones, movimientos de tierra, explotación minera, procesos agrícolas repetitivos y de carácter lineal, procesos industriales de fabricación y reparación, etc.

En resumen, se puede asegurar que la técnica de modelación presenta notables ventajas para el análisis de procesos, al exigir una definición de los recursos y ciclos que ellos comprenden, y al aceptar incertidumbres previas a la ejecución. La simulación computacional permite iterar el flujo de los recursos y evaluar rendimientos y costos. En la etapa de materialización de las faenas de construcción, se pueden evaluar modificaciones en un muy corto plazo.

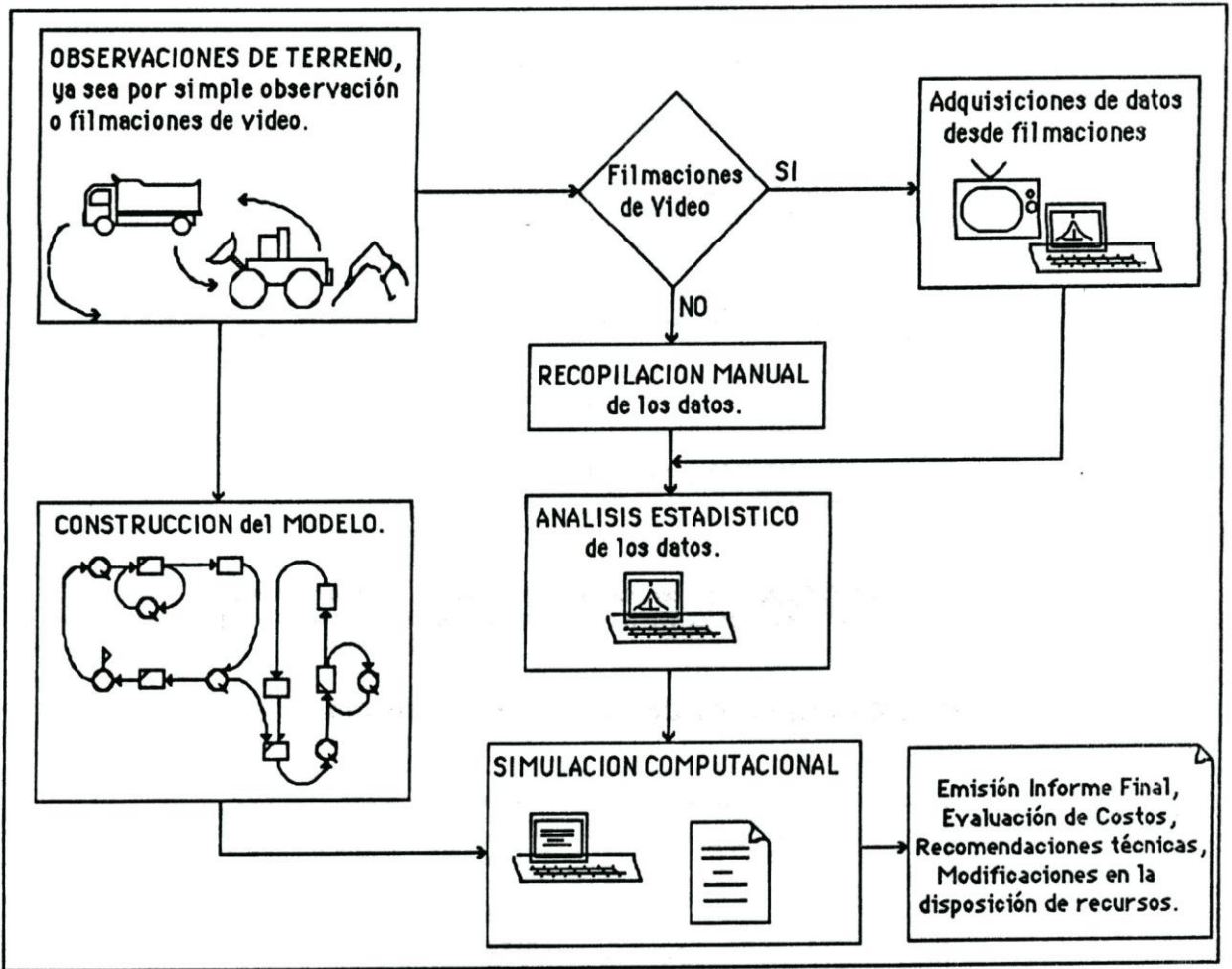
Por último, es interesante mencionar una aplicación adicional que permite almacenar y actualizar información particular de cada empresa. Ella se refiere al uso de Videos Interactivos con el computador (8) y almacenamiento en bases de datos relacionadas. Un Video Interactivo es un sistema de interconexión de un equipo de video a un microcomputador o computador personal, en que, por medio de una interfase se puede manejar los controles del equipo de video desde el computador. Gracias a un software adecuado es posible grabar señales de tiempo en la cinta de video, las que son reconocidas por el computador para buscar imágenes según lo solicite el usuario, pudiendo almacenarse datos relevantes para futuras comparaciones. De esta forma, es posible automatizar la adquisición de datos de

duraciones y secuencias que alimentan los modelos y se podría almacenar un respaldo visual de los modelos para la capacitación posterior de profesionales y técnicos.

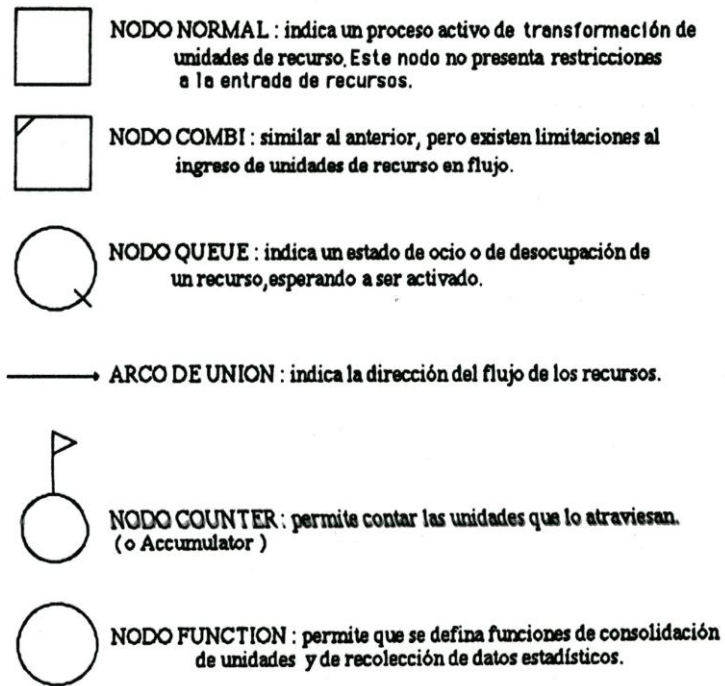
**AGRADECIMIENTOS.** Los autores desean agradecer el apoyo de la Corporación de Capacitación de la Cámara Chilena de la Construcción, y a alumnos e Investigadores del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile que colaboraron en una investigación de mejoramiento de la productividad a través de modelación y simulación de operaciones.

## REFERENCIAS

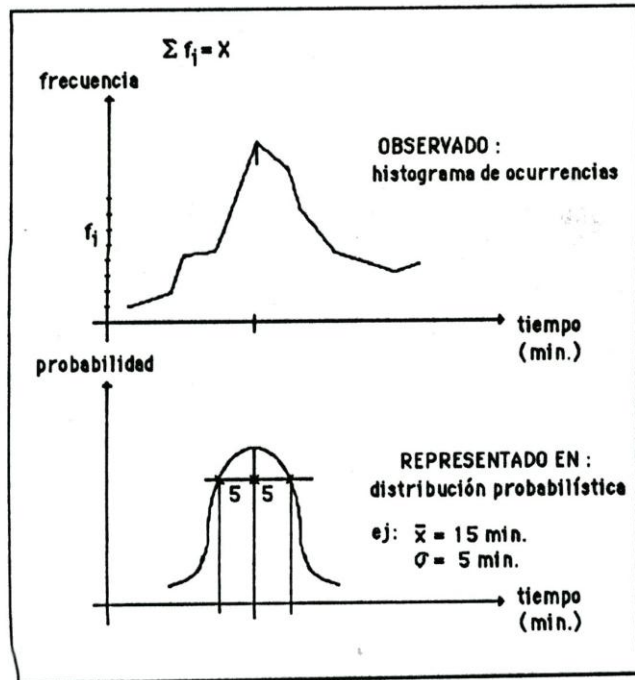
1. Halpin, D.W. y Woodhead, R.W. Design of Construction and Process Operations, John Wiley & Sons, Inc., 1976.
2. Paulson, B.C., Douglas, S.A., Kalk, A., Touran, A. y Víctor, GA., "Simulation and Analysis of Construction Operations", Journal of Technical Topics In Civil Engineering, ASCE, vol.109. No. 2, August 1983, pp.89-104.
3. Halpin, D.W., "CYCLONE-Method for Modeling Job Site Processes", Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers ASCE, vol 103, No. C03, September 1977, pp.489-499.
4. Halpin, D.W. y McCahill, D.F., "Modeling Construction Operations in the Classroom", Computing in the Civil Engineering, Proceedings of the Fourth Conference, ASCE., Editado por Tracy Lenocker, 1986. October 27-31, pp. 379-393.
5. Crandall, K.C., "Probabilistic Time Scheduling", Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers ASCE, vol 102, No.C03, September 1976, pp.415-423.
6. Clemmens. J.P. y Willenbrock, J.H., "The SCRAPESIM Computer Simulation", Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers ASCE, vol 104, No. C04, December 1978. pp.419-435.
7. Halpin, D.W., MicroCYCLONE User's Manual, version 1.0, 1988.
8. Halpin, D.W., MicroCYCLONE User's Manual, version 2.0, 1989.
9. Ashley, D.B., "Simulation of Repetitive-Unit Construction". Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers ASCE, vol 106, No.C02, June 1980, pp. 185-194.
10. Oglesby, C, Parker, H. y Howell, G., Productivity Improvement in Construction, McGraw-Hill Book Company, 1989.
11. Riggs, L.S., "Graphic Input to Cyclone", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol 1, No. 3, July 1987, pp. 175-182.
12. Paulson, B.C., "Integrated Microcomputers System for Remote Operations Analysis, Design and Simulation with Graphical Interaction", Final Report for NSF, Grant CEE-83-11641, August 1986.
13. Halpin, D.W. y Riggs, L.S. Planning and Analysis of Construction Operations, John Wiley & Sons, Inc.. 1992.
14. Dabbas. M.A. y Halpin, D.W., "Integrated Project and Process Management", Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers ASCE, vol 108, No. C03, September 1982, pp.361-374.



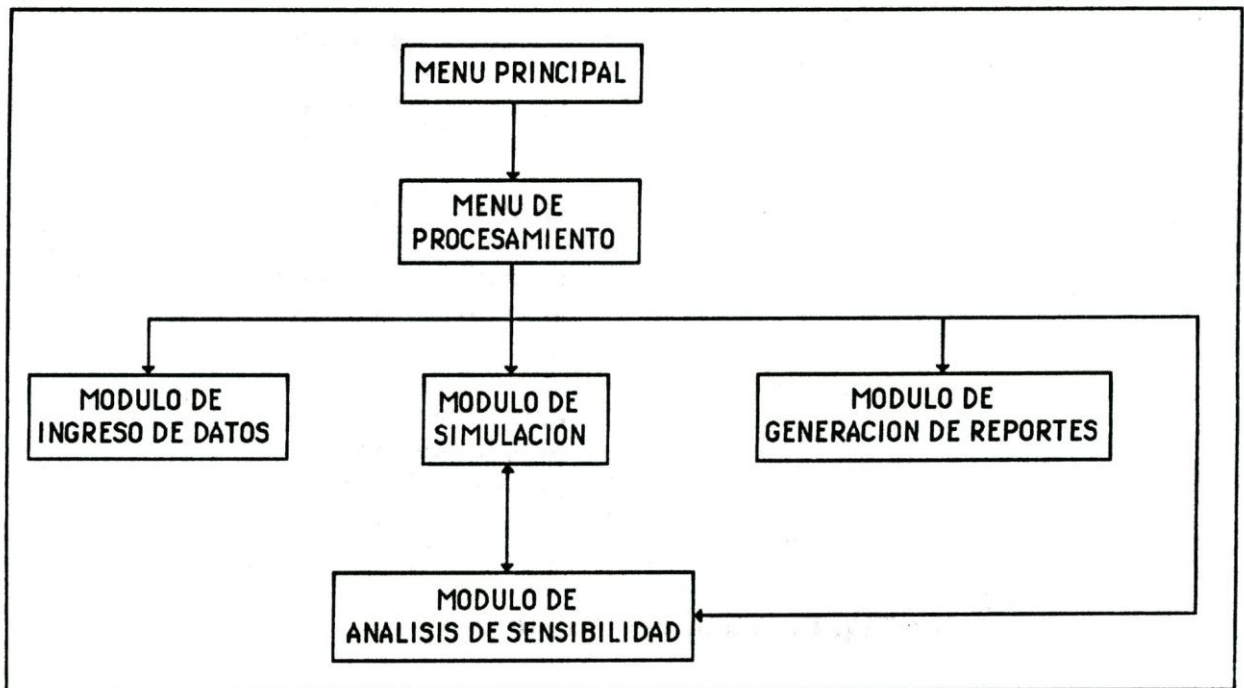
**Fig. 1. Relación de actividades para un estudio de simulación de procesos**



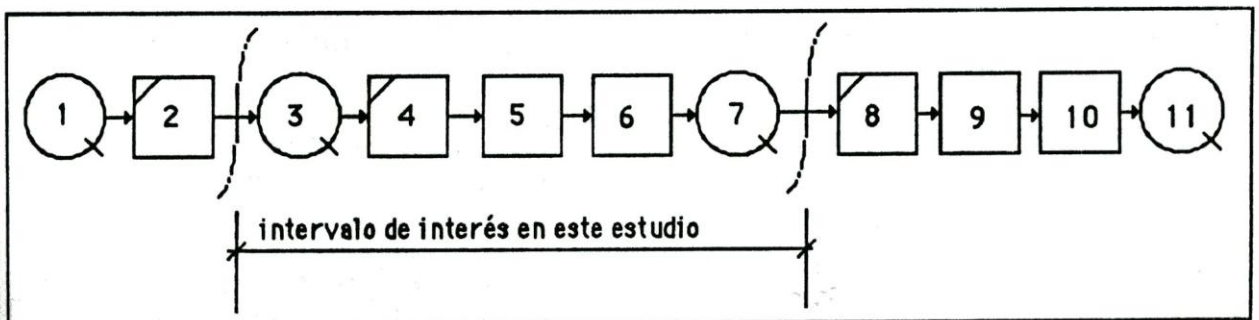
**Fig. 2 Elementos del lenguaje de simulación**



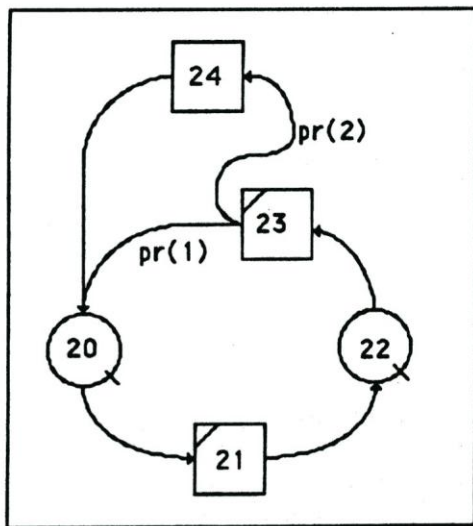
**Fig. 3. Relación entre frecuencias (de demoras) y distribución probabilística ajustada**



**Fig. 4. Organización del paquete computacional MicroCYCLONE**

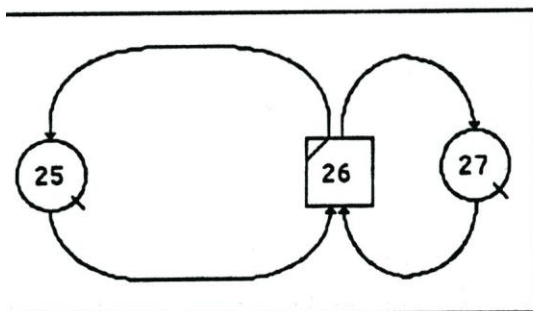


**Fig. 5. Flujo del movimiento y arneado de suelos para el ejemplo**



- 20: cargador frontal disponible
- 21: cargador abasteciendo de material a un camión
- 22: cargador frontal disponible
- 23: cargador ubicándose y revisando si cuenta con suficiente tierra para el próximo carguío
- 24: cargador esperando a que se acopie suficiente tierra proveniente de su yacimiento y luego cooperando a apilarla debidamente

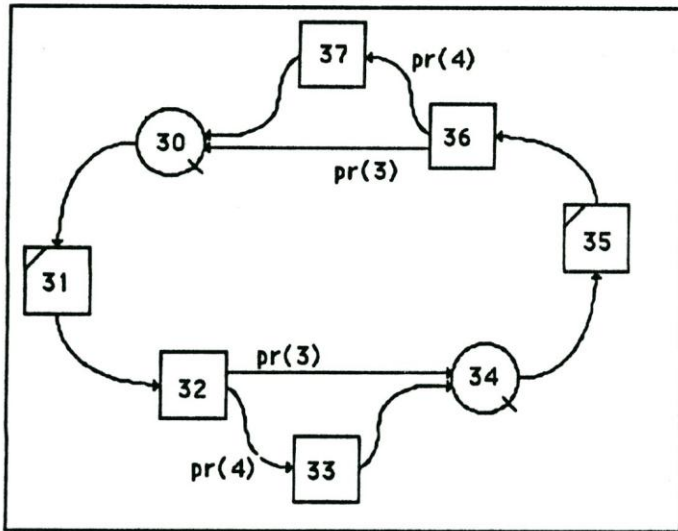
**Fig. 6. Ciclo del cargador frontal**



- 25: cargador frontal disponible
- 26: cargador abasteciendo de material a un camión y luego volviendo a ubicarse para el próximo ciclo
- 27: material disponible, debidamente acopiado para ser cargado

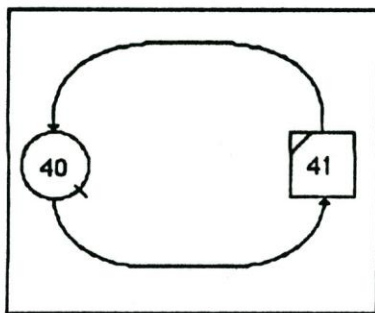
**Fig. 7. Ciclo modificado del cargador frontal**





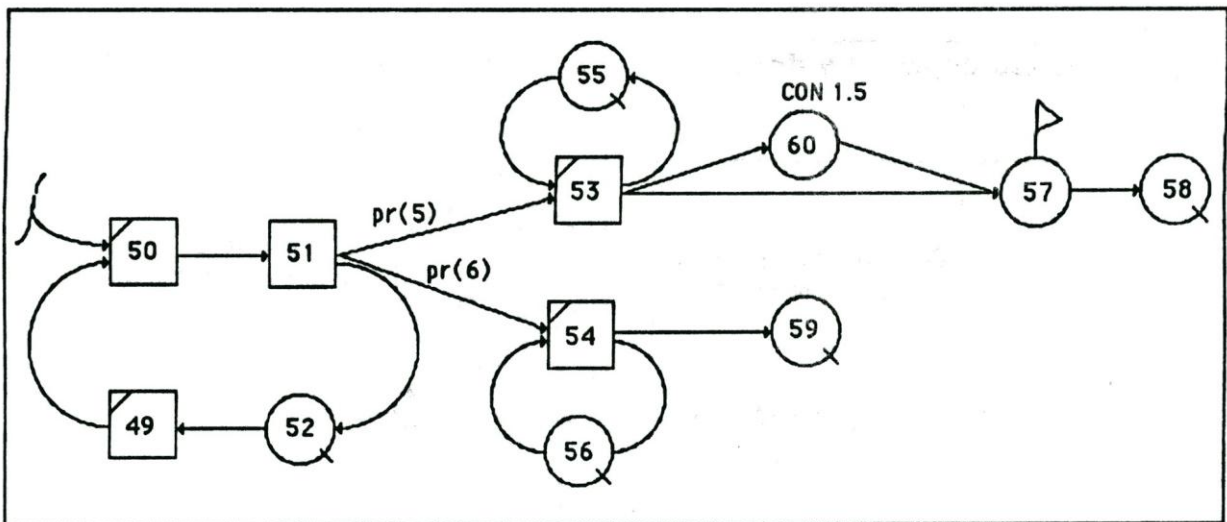
- 30: camión esperando a ser cargado
- 31: carguío del camión con material
- 32: viaje a descargar (aprox 300 m.)
- 33: "panne" o avería del camión y desvío a reparaciones
- 34: camión esperando a descargar
- 35: camión descargando el material
- 36: viaje de regreso para ser cargado (aprox 300 m.)
- 37: "panne" o avería del camión y desvío a reparaciones

**Fig. 8. Ciclo de los camiones**



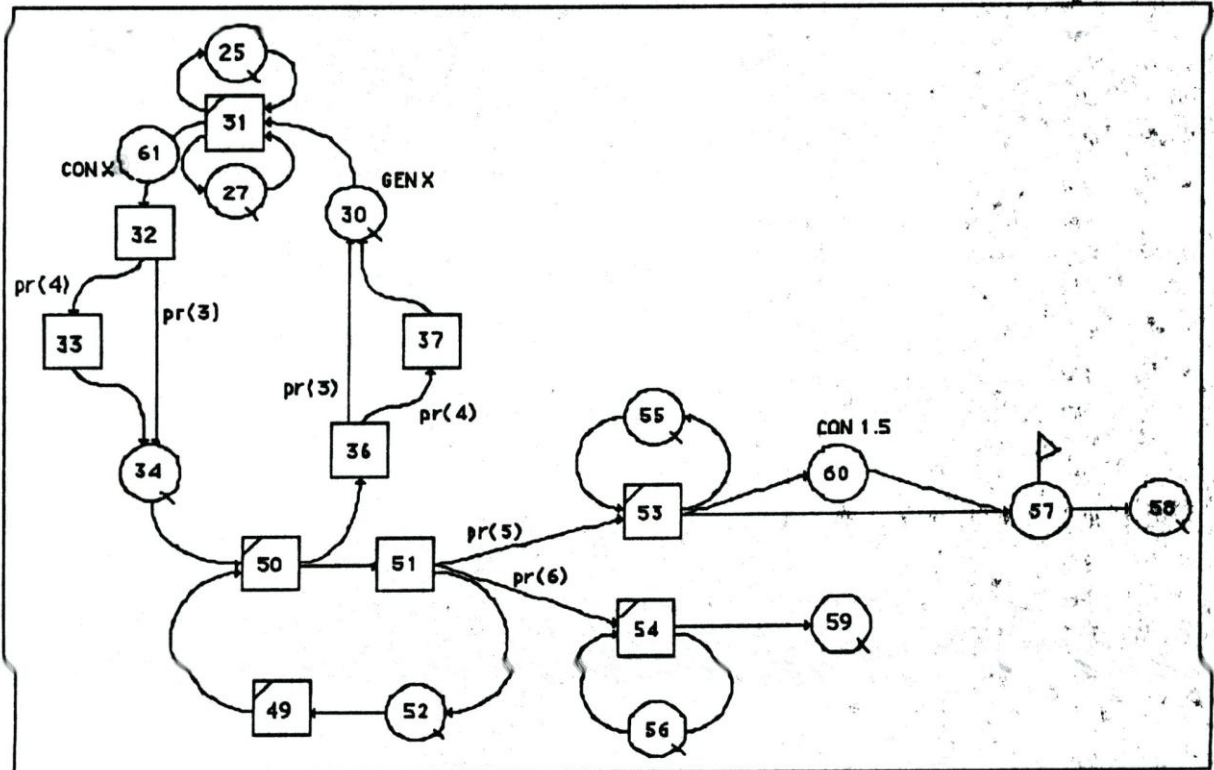
- 40: equipo de arneado esperando material
- 41: equipo de arneado procesando material

**Fig. 9. Ciclo simplificado del equipo de arneado**

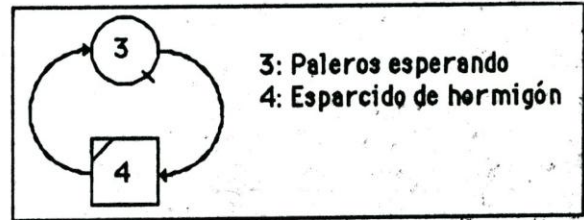
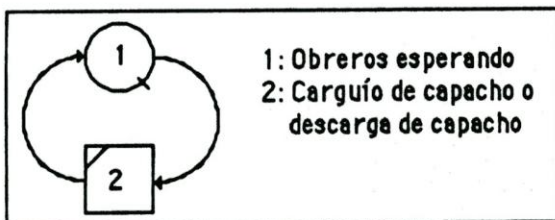


**Fig. 10. Ciclo modificado del proceso de arneado**

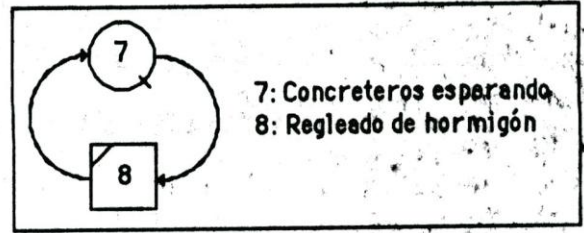
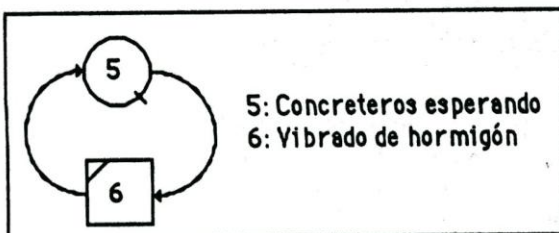




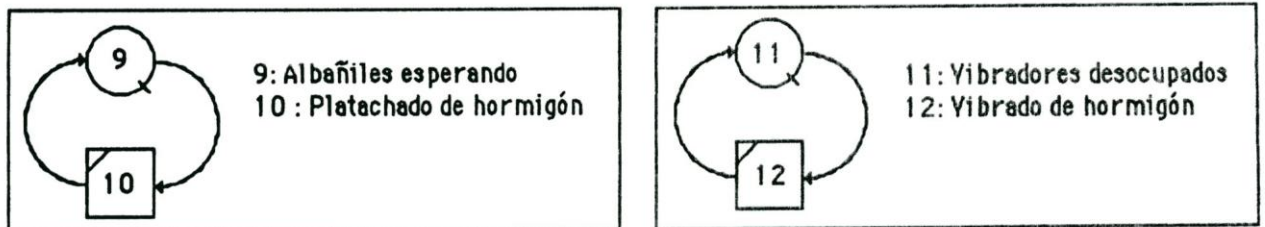
**Fig. 11. Integración de los ciclos, conformando el modelo de la malla de actividades**



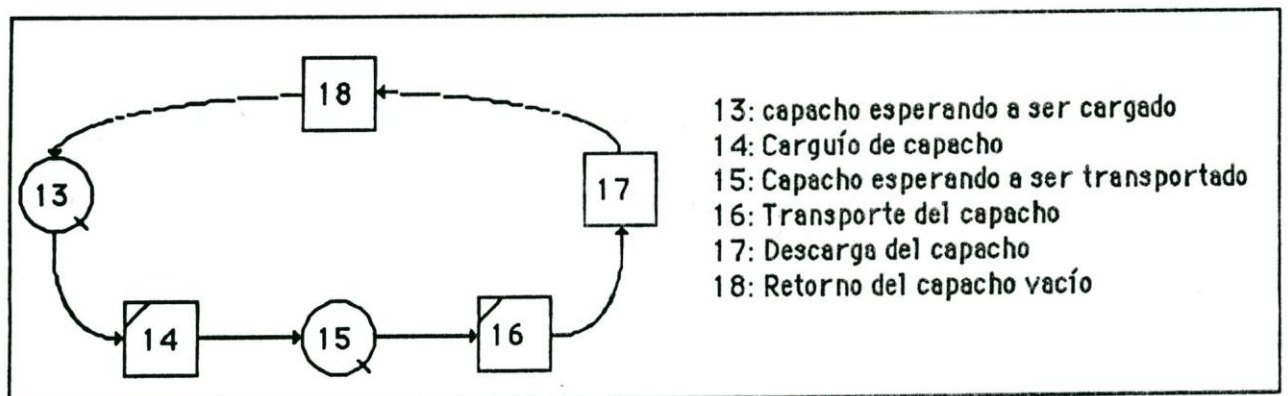
**Fig. 12. Ciclo de carga y descarga de capacho y de esparcido de hormigón**



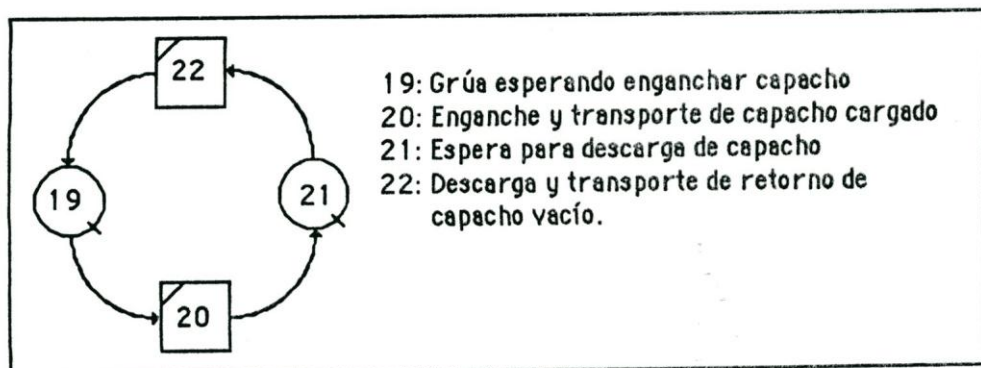
**Fig. 13. Ciclos de vibrado y regleado**



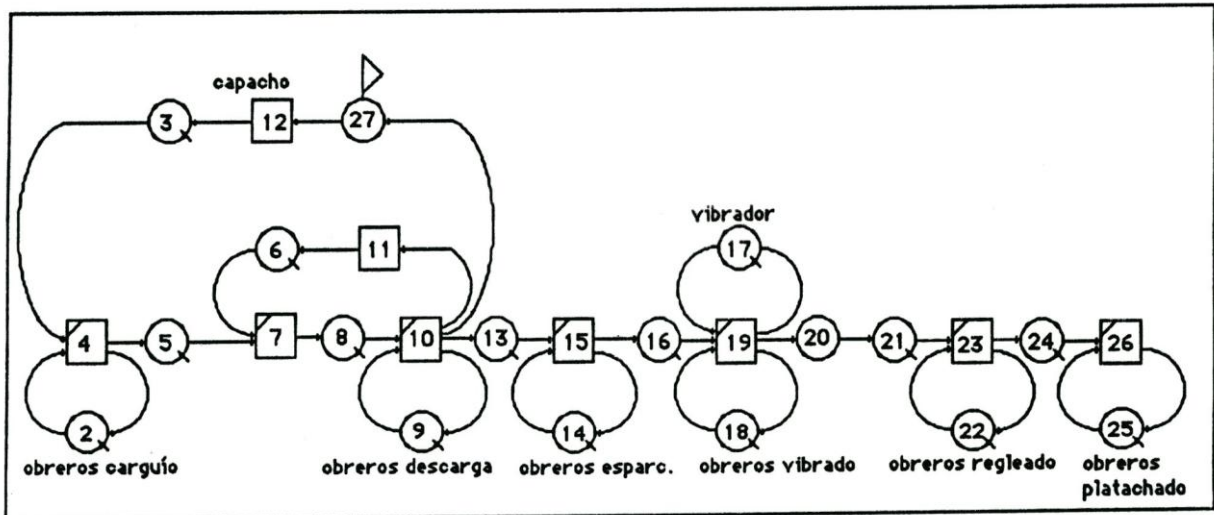
**Fig. 14. Ciclos de platachado y vibrado (equipos)**



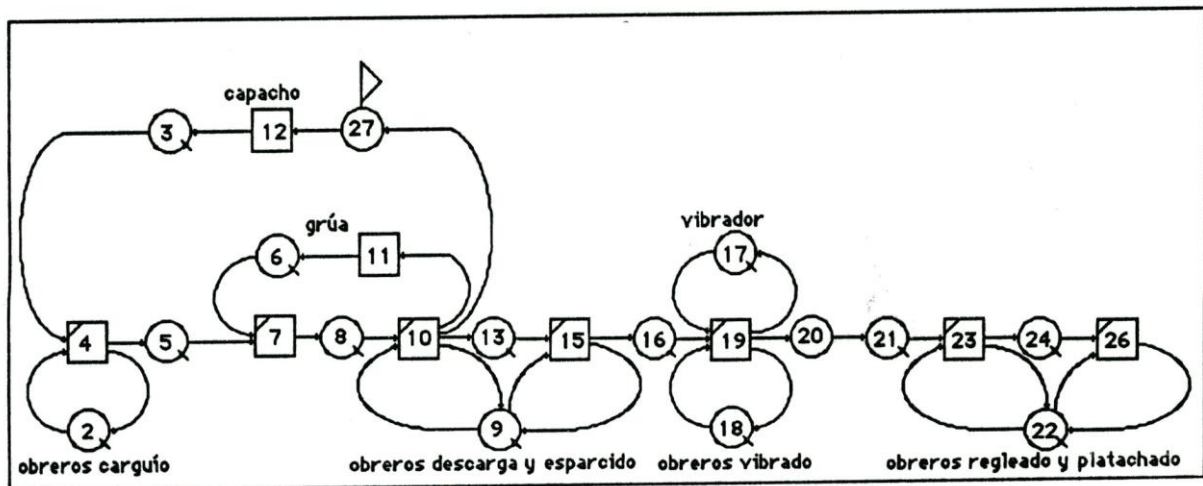
**Fig. 15. Ciclo del capacho**



**Fig. 16. Ciclo de la grúa**



**Fig. 17. Integración de los recursos de un modelo que representa lo observado en terreno**



**Fig. 18. Integración de los recursos en un modelo modificado**