

Simulación en construcción

Del CPM y PERT. Al modelo CYCLONE.

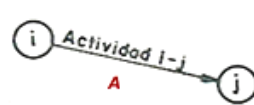
Del CPM y PERT

Referencia

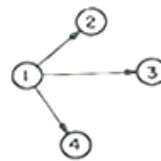
Melchor Rodríguez Caballero. *Métodos modernos de Planeación, Programación y Control de procesos productivos*. Editado por el autor. México, 1962.

Representación gráfica de las actividades

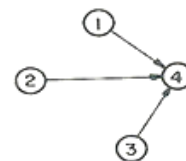
En los métodos CPM y PERT se utiliza las gráficas de flechas para representar actividades. La base es una flecha (dirigida, por tanto; recta o curva) con un nodo de inicio y un nodo de término. Los nodos suelen representarse por círculos numerados en su interior. También suele recomendarse que el número final sea mayor que el inicial, y que ambos sean enteros. Cada flecha con sus nodos, representa una actividad. El arreglo ordenado de flechas mostrando un grupo de actividades en secuencia y en simultáneo, pueden representar un proceso (de construcción, por ejemplo). Se trata de un *diagrama de flechas*.



Representación y designación de una actividad



Representación de actividades que pueden iniciarse simultáneamente



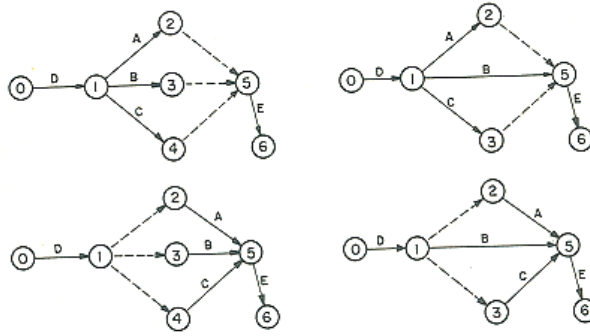
Representación de actividades que pueden terminar simultáneamente

REPRESENTACIÓN DE ACTIVIDADES CON GRÁFICOS DE FLECHAS

Cada actividad puede designarse por su nombre o por la secuencia de los números de inicio y término. Un nodo puede ser común para actividades que *pueden iniciarse* simultáneamente. O para actividades que *pueden terminar* simultáneamente.

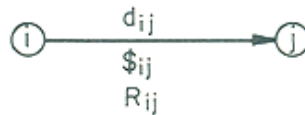
La diagramación se facilita con el uso de *actividades ficticias* (de duración nula) representadas por flechas a trazos. Ayudan en las relaciones entre actividades y para garantizar una numeración independiente para cada actividad.

Como se aprecia en los gráficos, los diagramas de flechas son dirigidos (tienen un inicio y un término, para designar el comienzo y el final del proceso que representan). A su interior, dos nodos cualesquiera de numeración distinta, representan un *tramo*. Se observa que podrían existir varias *rutras* o *trayectorias* relacionadas con cada tramo.



USO DE ACTIVIDADES FICTICIAS PARA INTEGRAR UN PROCESO

Para la planeación y el control del proceso representado por un diagrama de flechas, se requiere que éste sea cuantificado. Para ello, se necesita saber para cada actividad, sus: *recursos*, *duración*, y *costos*.



RECURSOS, DURACIÓN Y COSTOS EN LA CUANTIFICACIÓN DE CADA ACTIVIDAD

Los recursos implican los métodos de trabajo adoptados, el personal (su experiencia, calificación y disponibilidad), la maquinaria, los materiales.

La duración está asociada a los recursos y los rendimientos. La planeación implica que la duración será adoptada en un valor fijo, o será asumida como variable aleatoria (conociendo los respectivos parámetros).

Los costos están asociados a los recursos y la duración, y por lo tanto pueden resultar ser variables.

Método CPM o de la Ruta Crítica

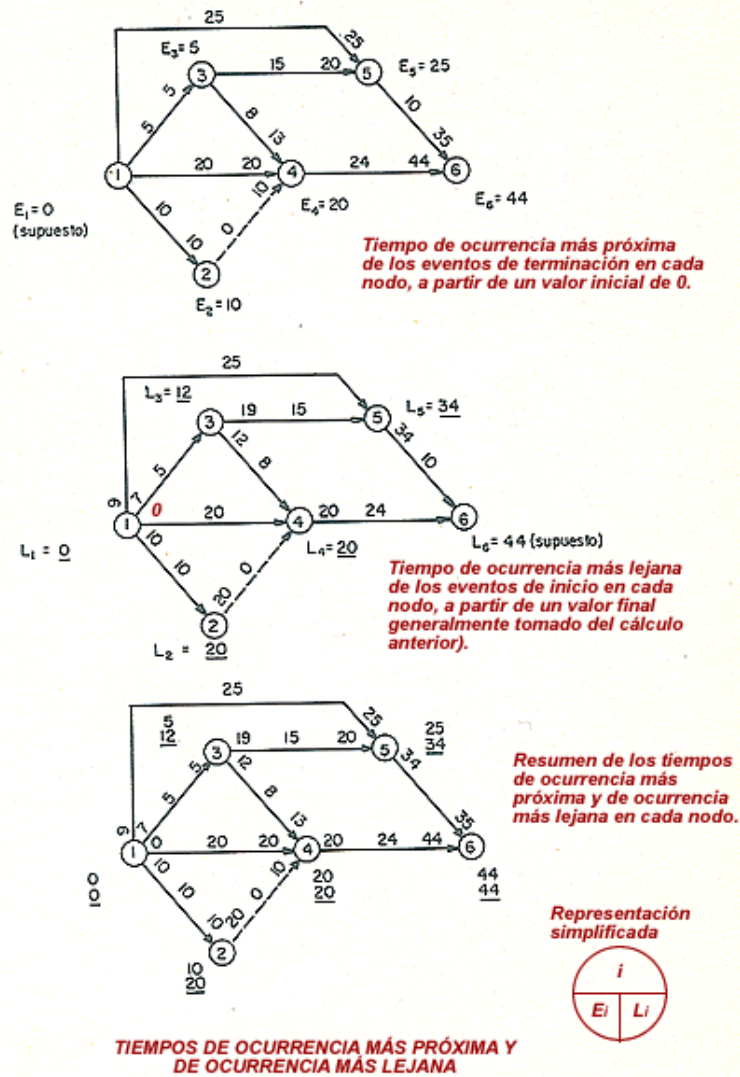
El método CPM (Critical Path Method) fue desarrollado en 1957 por personal de las empresas DuPont y Remington Rand, y aplicado en un proyecto de construcción. Progresivamente ha tenido amplia difusión en procesos productivos diversos.

Este método requiere la selección de la duración de cada actividad, así como del tiempo de inicio de cada una de ellas. La terminación de cada actividad puede retrasarse siempre que no afecte la duración del proceso.

Un primer cálculo se efectúa cuando cada nodo se identifica con el evento de terminación de las actividades que concurren a él. Se considera que el tiempo en que empieza el proceso es 0. Agregando la duración para cada una de las actividades siguientes, se encuentran los tiempos de terminación, y así se hace progresivamente. Sin embargo, cuando varias actividades concurren a un mismo nodo, se puede llegar con valores diferentes. Al *mayor* de estos tiempos se le denomina el *tiempo de ocurrencia más próximo* del evento o nodo en cuestión, E_i . Se llega al final del proceso con un valor que representa el *tiempo de ocurrencia más próximo del final del proceso*.

Asumiendo como terminación del proceso su tiempo de ocurrencia más próximo (estrictamente, podría asumirse un valor mayor), se efectúa la

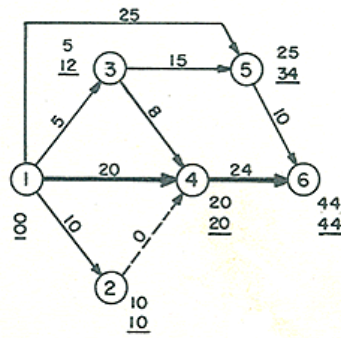
secuencia inversa para encontrar los tiempos de inicio de cada actividad. Sin embargo, cuando varias actividades parten de un mismo nodo, se puede llegar con valores distintos. Al *menor* de los tiempos de inicio, se le llama el *tiempo de ocurrencia más lejano* del nodo o evento en cuestión, L_i . Con el supuesto de término indicado, se llega al inicio del proceso con el valor 0.



Estos valores, junto con la duración de cada actividad, permiten el cálculo de distintas holguras. La *holgura libre* $HL_{ij} = E_j - (E_i + d_{ij})$, es el tiempo que dispone cada actividad sin afectar la duración del proceso, ni las holguras de las actividades subsecuentes.

La *holgura total* $HT_{ij} = L_j - (E_i + d_{ij})$ es el tiempo disponible para cada actividad sin retrasar el proceso, pero afectando las holguras de las actividades subsecuentes. Cuando una actividad tiene holgura total *nula*, se le denomina *actividad crítica*. El conjunto de estas actividades conforman una o más trayectorias o *rutas críticas*.

Existe también la *holgura independiente* $HI_{ij} = E_j - (L_i + d_{ij})$ es el máximo tiempo en que pueden retrasarse las actividades que llegan a i sin retrasar la terminación del proceso.



RUTA CRÍTICA

El método PERT

El PERT (Program Evaluation and Review Technique) fue desarrollado por personal de la empresa Booz, Allen y Hamilton, de Chicago, Illinois, USA, en 1958.

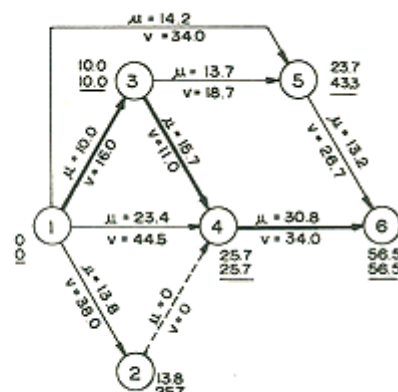
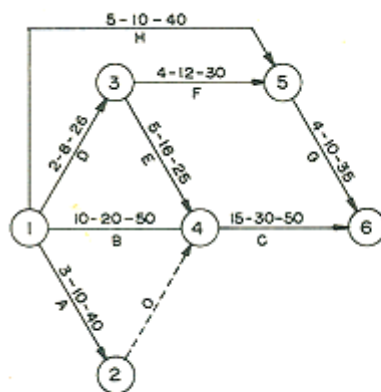
En vez de asignar una cantidad a la *duración* de cada actividad, se le considera como una variable aleatoria, con una distribución beta estándar, para la cual se aproximan tres valores: optimista (*a*), pesimista (*b*), y más probable (*m*).

En la duración optimista, la probabilidad de que la duración sea menor que *a*, es muy escasa, aproximadamente 0.01. En la duración pesimista, la probabilidad de que la duración sea mayor que *b*, es aproximadamente 0.01. La duración más probable es considerada la más frecuente.

Con estos valores, es posible estimar el valor medio y la desviación estándar de la duración de la actividad, de la siguiente manera.

$$\mu = \frac{a + 4m + b}{6} \quad \sigma = \frac{b - a}{6}$$

Con estos valores por actividad, pueden encontrarse los parámetros probabilísticos para los diagramas de flechas de un proceso. En las figuras se indican los estimados *a*, *m*, *b*, μ , σ^2 , E_i , L_i (estos últimos para los valores medios).



VALORES EN EL MÉTODO PERT

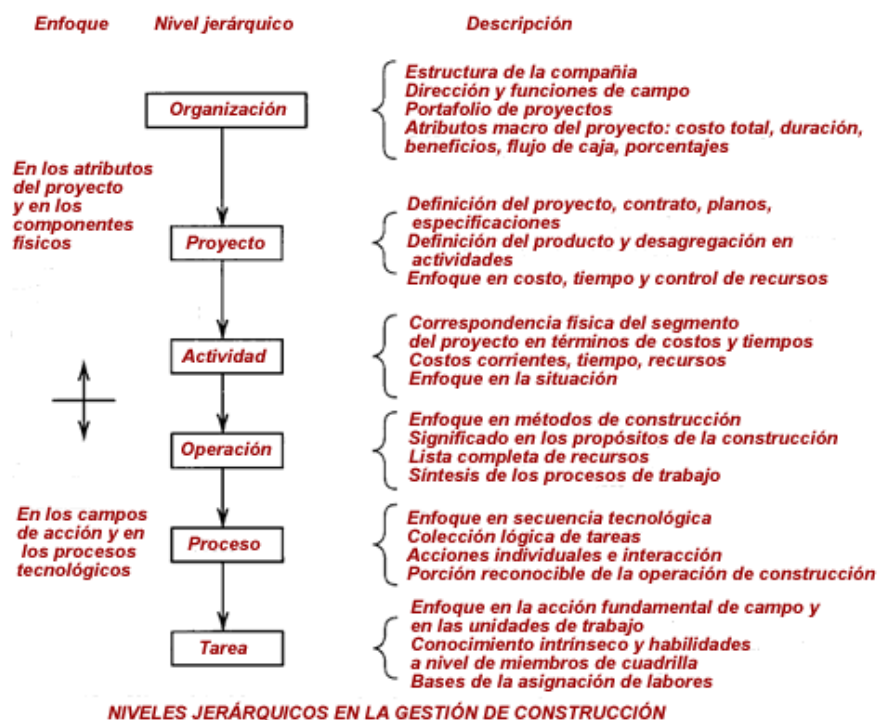
Al modelo CYCLONE

Referencia

Daniel W. Halpin (Purdue University) and Leland S. Riggs (Georgia Institute of Technology). *Planning and Analysis of Construction Operations*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1992.

El modelo CYCLONE es una metodología de simulación de procesos de construcción presentada en 1976 por el profesor Daniel W. Halpin, originalmente en la Universidad de Illinois, y posteriormente en la de Purdue. El nombre se deriva de CYCLic Operations NETwork. Se sustenta en una representación gráfica que simula un sistema conteniendo variables que pueden ser determinísticas o aleatorias. Cuando el sistema corresponde a un proceso de construcción, se requiere que éste se desagregue en tareas y se conozca como éstas interactúan.

Niveles jerárquicos en la gestión de la construcción



◆ Respecto al proyecto y sus componentes







La unidad mayor es la empresa u *organización*, de la que interesa su dirección, ámbito de acción y proyectos. Aquí se ubica el proyecto de interés en sus variables generales. La siguiente instancia es el *proyecto*, con toda su documentación técnica y económica, así como el señalamiento del producto que su ejecución permite alcanzar. Entendiendo *actividad* como la acción o conjunto de acciones que permiten obtener un objetivo determinada, es posible dividir el proyecto en actividades (conducentes a subproductos dentro del proyecto). Existe entonces correspondencia entre las *actividades* y los componentes físicos del proyecto. De cada actividad interesan los costos, los tiempos y los recursos.

◆ **Respecto a los campos de acción**

Según el método, la base del modelo es la *tarea*. En el campo, es la unidad de trabajo más pequeña y que se asigna a una cuadrilla. La metodología reconoce a un *proceso* como la agrupación lógica de tareas. Y de cada proceso, lo que interesa es su enfoque tecnológico. Los procesos (uno o más) conforman una *operación*, de la cual interesan los métodos de construcción.

Elementos básicos del modelo

Un modelo es una representación de una situación real y usualmente proporciona un marco para investigar esa situación. El método para el modelaje utiliza un conjunto de símbolos para representar la situación de las tareas, recursos y el flujo de recursos. Así, utiliza un **cuadrado** (o rectángulo) para representar una tarea en estado activo. Un **círculo** para representar la espera de un recurso, o de un mecanismo de control (que en el lenguaje del método, son llamados *entidades*). Una **flecha** (o un arco dirigido) para indicar el flujo o los movimientos.

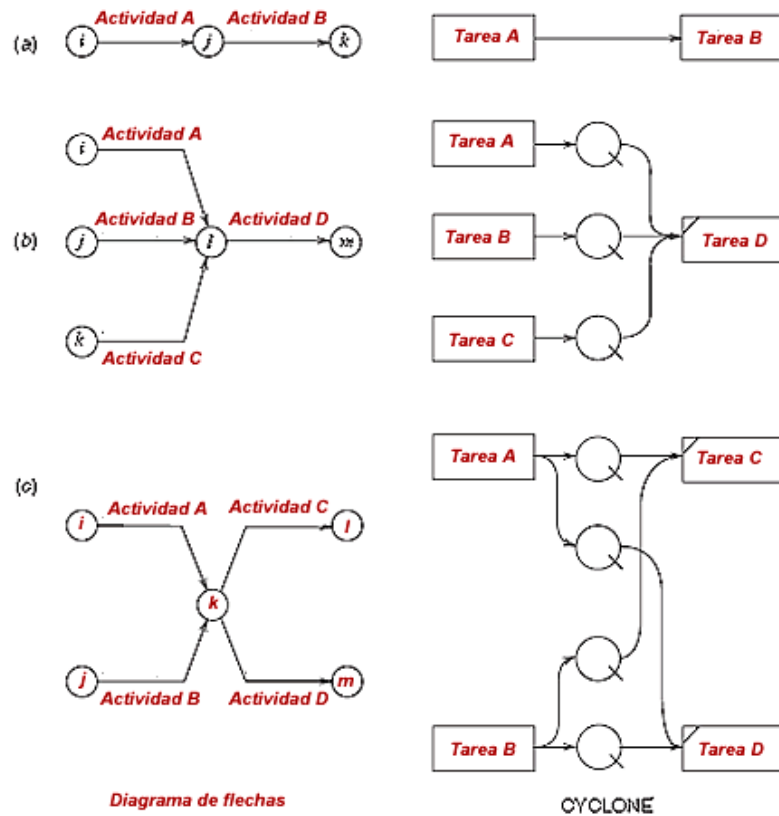
<i>Nombre</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Función</i>
COMBI		<i>Este elemento requiere que todos los recursos estén disponibles para empezar., en cuyo caso se combinan. Siempre está precedido por elementos ESPERA. Si algunas de las unidades necesarias no están disponibles, pues se encuentran en ESPERA, las que han llegado deben esperar.</i>
NORMAL		<i>Representa una tarea que puede empezar tan pronto como llegue una unidad o recurso (cargador, cuadrilla) del elemento precedente, sin esperar restricciones</i>
ESPERA (QUEUE)		<i>Este elemento precede a todos los COMBI y se relaciona con una ubicación en la cual esperan los elementos pendientes de combinación. Se miden las estadísticas de demora o espera.</i>
FUNCIÓN (FUNCTION)		<i>Se incluye para desarrollar una función especial, activando los elementos que le preceden. Puede ser para conteo, consolidación, marcado o acopio estadístico.</i>
ACUMULADOR (ACCUMULATOR)		<i>Es un elemento de conteo de ciclos en un subsistema o en el total del sistema. No detiene ninguna operación.</i>
FLECHA o ARCO DIRIGIDO (ARC)		<i>Indica la estructura lógica del modelo y la dirección del flujo de una entidad (recurso o mecanismo de control)</i>

ELEMENTOS BÁSICOS DEL MODELO

Diagrama de flechas y modelo CYCLONE

Los diagramas de flechas que se preparan en las redes CPM y PERT, pueden trasladarse directamente a modelos CYCLONE, conforme se indica en el gráfico adjunto.

- Las actividades en serie dan lugar a tareas normales en secuencia.
- Las actividades que concurren a un nodo, y son seguidas por una sola actividad, se trasladan al modelo en forma de tareas normales y de espera. En el caso de la figura, conducen a una tarea combinada. *Una tarea combinada, está precedida por más de una tarea.* La espera en la tarea es el equivalente a la holgura en las redes CPM y PERT.

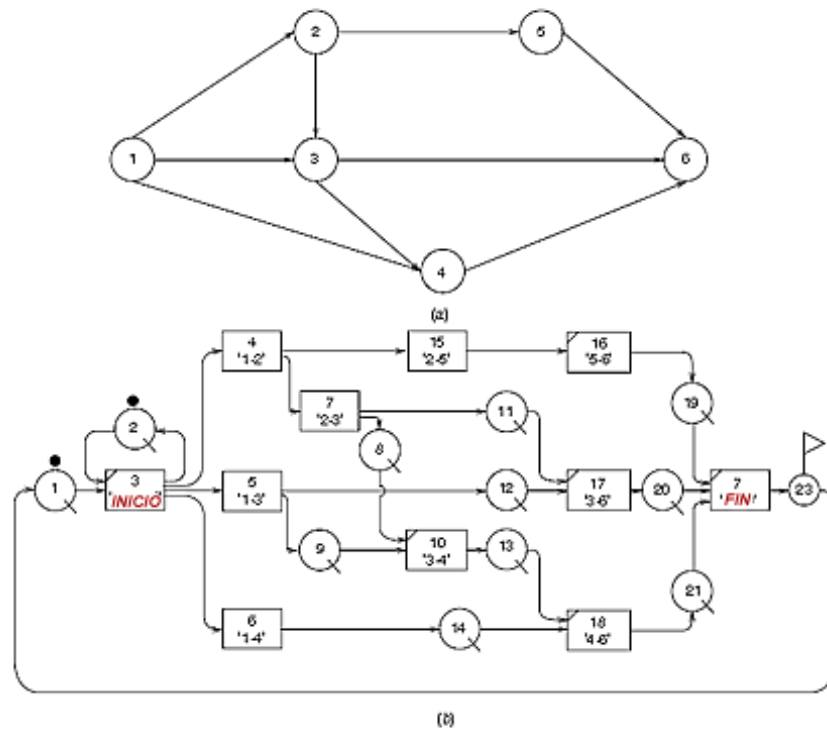


CORRESPONDENCIA ENTRE DIAGRAMAS DE FLECHAS Y MODELOS CYCLONE

- En el caso de actividades que ingresan a un mismo nodo, y son seguidas por otro grupo de actividades, la equivalencia es la siguiente. Cada tarea combinada de salida, está precedida por tantas esperas como actividades concurren al nodo. Así, cada tarea normal de inicio, está seguida por tantas esperas como tareas de salida. Se ilustra esta explicación en la siguiente figura.

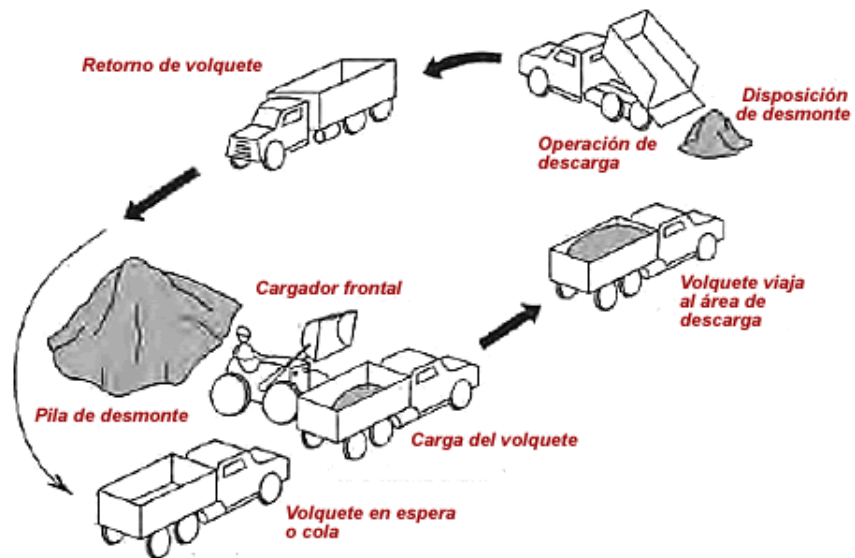
Se desarrolla también el equivalente de una red PERT.

- Los elementos combinados en CYCLONE son aquellos precedidos por más de una actividad en la red PERT. No pueden empezar hasta que no lleguen todas las unidades que están en espera.
- Las esperas preceden a elementos combinados, y pueden seguir tanto a elementos normales como a combinados.
- En CYCLONE, el inicio se modifica respecto a la red PERT. Se inserta un elemento combinado INICIO (START) así como otro FIN (END).
- Al agregársele un elemento de conteo al final, la red PERT se convierte en un proceso cíclico en el modelo CYCLONE. Ello demanda una acción de realimentación que alimenta la espera previa al combinado de INICIO.



EQUIVALENCIA ENTRE UNA RED PERT Y UN MODELO CYCLONE

Modelos de procesos de construcción



CICLO DE UNA OPERACIÓN DE MOVIMIENTO DE DESMONTE

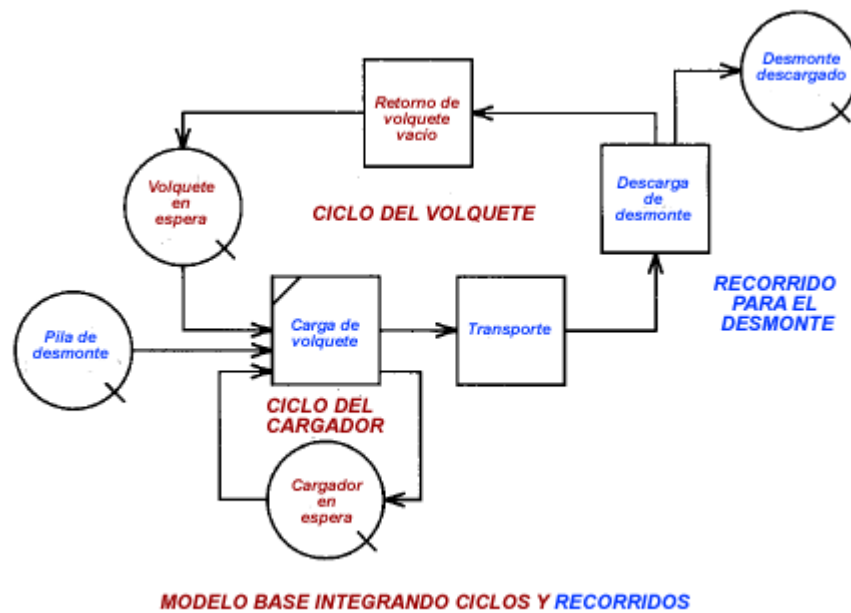
◆ Ejemplo de movimiento de desmonte

La operación, que engloba procesos y tareas, de la remoción y transporte de desmonte desde el lugar donde se encuentra originalmente apilado hasta su disposición final, está ilustrada en el esquema adjunto. Se utiliza un cargador frontal y varios volquetes, que cargan, movilizan y depositan un volumen de desmonte en operaciones cíclicas. Cargador, volquetes y desmonte, son los recursos principales involucrados.

◆ Estructura de las operaciones de construcción



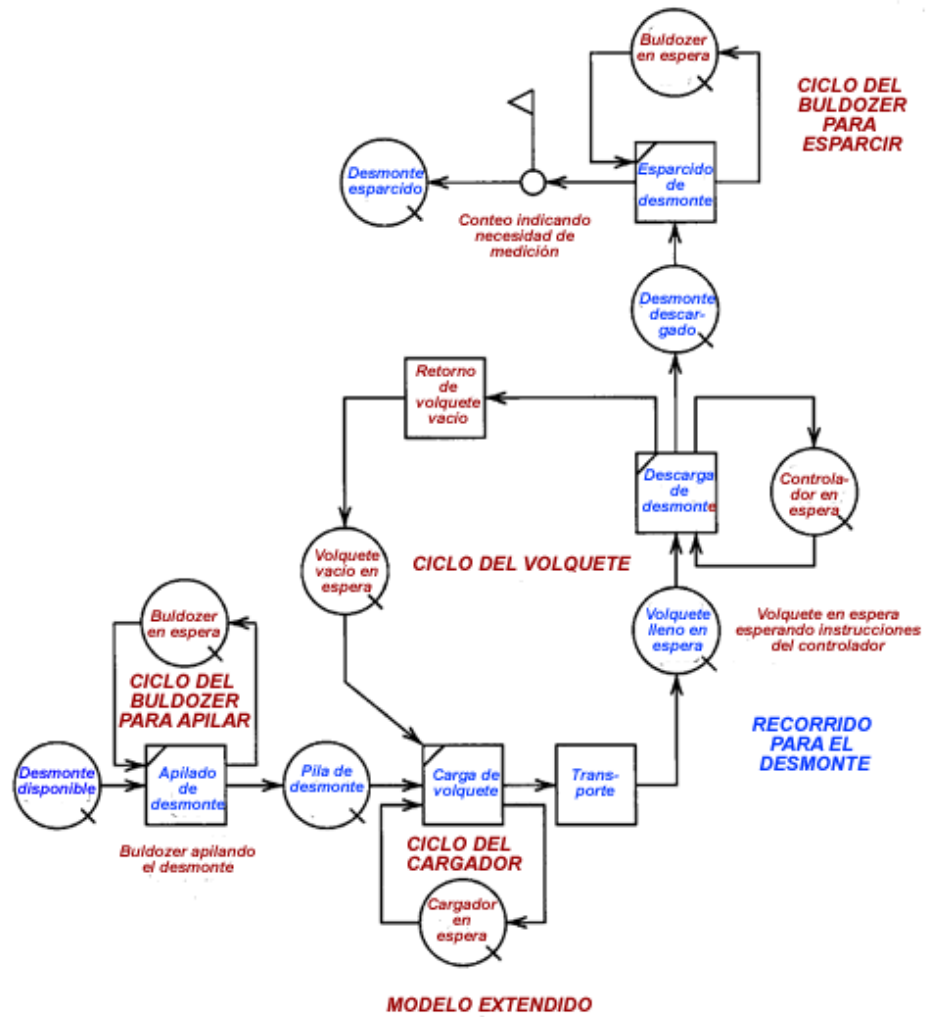
Para cada recurso principal identificado, se elaboran los respectivos modelos, en ciclos o recorridos según corresponda. Al ser integrados, se obtiene la estructura básica de la operación.



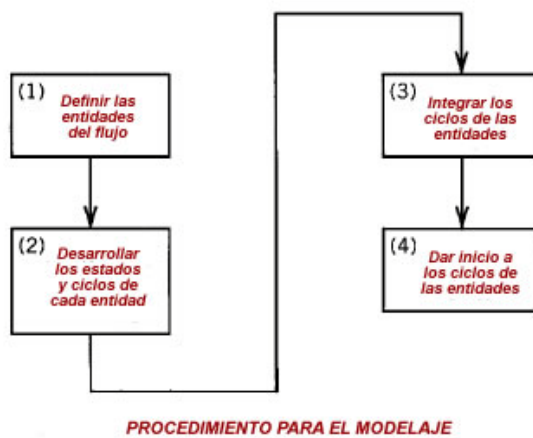
El modelo base puede ser ampliado en aspectos que sean de interés para el estudio. En la figura que sigue se han agregado operaciones relativas a lo siguiente.

- La inclusión de un buldozer para apilar el desmonte, agrupándolo para su carguío y transporte. Se agrega un nuevo ciclo.
- La participación de un capataz controlador del área de descarga del desmonte.
- La operación de esparcido del desmonte en su disposición final y con la ayuda de un buldozer. También le corresponde un nuevo ciclo.
- El recorrido del material de desmonte resulta entonces ampliado, según se muestra en la figura.

- La inclusión de un elemento de conteo en un punto en que se considera necesaria una medición.



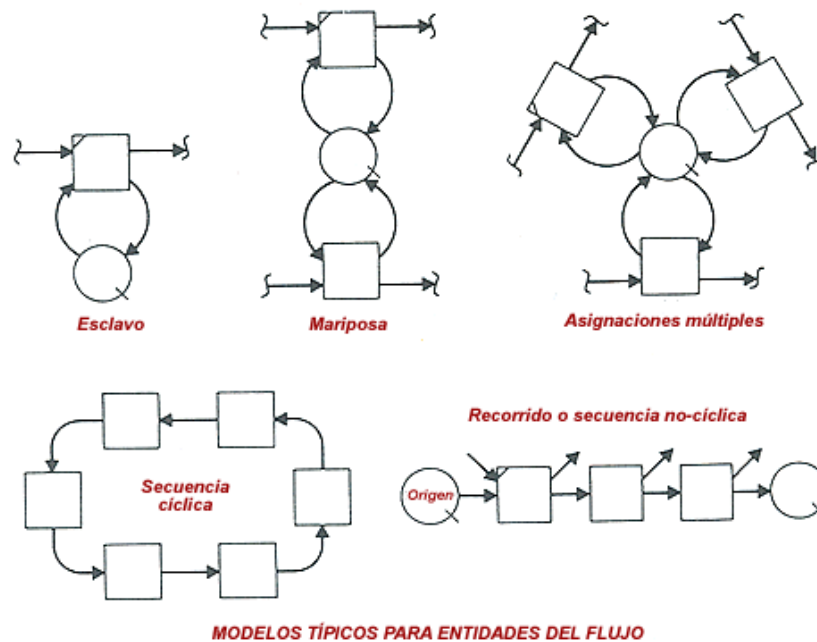
Procedimiento para el modelaje



Siguiendo el ejemplo expuesto, el modelaje en CYCLONE sigue las etapas siguientes.

- **Definir las entidades del flujo**, como aquellos recursos que son relevantes al desempeño del sistema, fijándose que sea obtenible la información de tiempo de tránsito. Es el caso de máquina a partir de las cuales se desarrollan varias tareas. O de materiales (o piezas) que se transportan o son sometidas a alguna transformación. También pueden ser acciones de control (como una inspección, información para un control lógico, o asignación de un recurso).
Esta etapa y la que sigue puede relacionarse directamente con la secuencia de estados por la que pasan los recursos (como en el caso de preparación, transporte y vaciado de concreto pre-mezclado).
- **Desarrollar los estados y ciclos de cada entidad**. Lo cual implica modelar los procesos en que cada entidad seleccionada participa. El modelaje debe incorporar el total posible de situaciones asociadas con cada flujo, identificando los *ciclos* que pasa, o los *recorridos* que transita cada entidad, según corresponda.
- **Integrar los ciclos y recorridos de las entidades**, a fin de conformar el modelo básico con los componentes de la construcción.
- **Dar inicio a los ciclos de las entidades seleccionadas**. Esto implica poner en práctica la simulación de la construcción a través del modelo base, a fin de comprobar su pertinencia. También para agregar otros ciclos sobre aspectos que deseen estudiarse. O para insertar elementos de conteo en puntos que demanden de mediciones.

Modelos típicos para las entidades del flujo



Se distinguen un conjunto de arreglos típicos para las entidades comunes en la construcción, según se muestran en la figura:

- Arreglo tipo *esclavo*, apropiado para graficar a una entidad que está atada a una tarea repetida. Es el caso de una máquina, de un trabajador especializado, de un material depositado, de un control lógico o de conteo
- Arreglo tipo *mariposa*. Como el de dos entidades que concurren a la misma tarea. Una descansa o en espera, mientras la otra está activa.

- Arreglo de *asignaciones múltiples*. Cuando son varias las entidades que convergen en tareas comunes. Podría requerir una entidad adicional de inspección o control.
- Arreglo *cíclico*, propio de procesos repetitivos, que pueden corresponder a tareas activas o a estados de espera.
- Arreglo para *recorridos o secuencias no cíclicas*, propio de un recurso que es sometido a una sucesión de tareas, y que al agotarse, dan por terminada la operación.

Propósitos de la simulación

La simulación de un sistema de construcción con el modelo CYCLONE está dirigida a los siguientes objetivos: examinar la interacción de las entidades, determinar los tiempos muertos de los recursos productivos, localizar cuellos de botella, y estimar la productividad del sistema. Para ello, debe simular el movimiento de las entidades como si estuvieran ocurriendo en el mundo real.

El sistema debe ser ejercitado y observado para determinar la respuesta y desbalance entre los recursos. Tales desbalances se manifiestan en cuellos de botella e ineficiencias, y que la simulación podría ayudar a evitar o minimizar balanceando los recursos.

En general, el eje del ejercicio de simulación es la duración de las distintas tareas. El estimado de esta duración puede ser determinístico o aleatorio.

En la estimación determinística, se puede recurrir a información: *de experiencia anterior* (por mediciones en tareas similares), *por estimación de las tasas de productividad* (también en base a trabajos pasados), *por prueba y ajuste* (ante ausencia de información previa), o por el uso de *modelos predictivos* (a partir de datos sobre productividades de los recursos empleados).

Las estimaciones aleatorias se basan en el uso de funciones de probabilidades, a partir de datos de campos, o como en el caso del método PERT, o por generación con el método Monte Carlo.

Aunque a partir del modelo CYCLONE, la simulación puede efectuarse *a mano*, también dispone de un propio software, para lo cual los autores desarrollaron funciones propias del modelo utilizadas como subrutinas llamadas por el programa principal, y que demandan datos del usuario.