

SIMULACION DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS DE NATURALEZA CICLICA

Ing. José Rafael Menéndez Acurio, Ing. Ricardo Garnica Florez

1 INTRODUCCION

Actualmente en un proceso u operación constructiva los tiempos, la cantidad de mano de obra, cantidad de equipo, la cantidad de recursos procesados y la secuencia de trabajo; se asumen determinísticamente en función a la experiencia y/o destreza del constructor; tomando medidas correctivas a lo largo del tiempo que tienden a la optimización del proceso constructivo.

En Procesos Constructivos complejos y Procesos Constructivos Novedosos la distracción de recursos es mayor (llegando incluso a niveles determinantes) que en procesos estandarizados, por la cantidad de variables que se manejan o por la inexperiencia en la particularidad del proceso. De manera similar en Procesos Constructivos repetitivos o cíclicos (según la magnitud de la obra) la distracción de recursos significa una pérdida importante de recursos acumulados. De esto se desprende la necesidad de que en estos casos se requiera la optimización del proceso mediante la anticipación y/o el refinamiento del proceso, aplicando metodologías de modelación o de simulación. La modelación es una alternativa para optimizar un Proceso Constructivo, formulando un modelo sintético (estático) que englobe de la mejor manera posible el Proceso Constructivo, pero dentro de las metodologías de modelación tenemos la modelación probabilística que al ser factible de iterar innumerables veces (dinámica) por procesos computarizados adquiere la calidad de Simulación, haciendo más cercana la realidad del proceso. La importancia adicional de aplicar esta metodología de simulación radica en el bajo costo frente a una simulación experimental (campo) y la rapidez en la obtención de los resultados que como ya dijimos conllevan a la optimización del proceso u operación constructiva.

2. OBJETIVOS

Analizar, visualizar, diseñar, planear, comparar y optimizar procesos y/o operaciones constructivas de naturaleza cíclica o repetitiva de magnitud importante, mediante la simulación de eventos discretos; técnica que resulta aplicable durante la ejecución de un proceso constructivo o previa a esta etapa. Anticipando y/o analizando el impacto (en: tiempo, costo, tecnología constructiva, productividad, etc.) de modificar variables relevantes controlables dentro del sistema e incluso la lógica que lo rige; lo que nos permite tomar las decisiones correctivas que fueran necesarias.

Cuantificar los recursos mano de obra, maquinaria, entre otros; su configuración y determinar la secuencia en la que se interrelacionan dichos recursos dentro de un proceso de vaciado de losas de concreto de pavimento rígido; con el objeto de analizar y optimizar dicho proceso constructivo. Anticipando el posible impacto en el sistema al verse modificadas las variables relevantes.

3. METODO

La simulación de eventos discretos es considerada una rama experimental de la Investigación de Operaciones. Ante sistemas de complejidad mayor la abstracción global del sistema a través de modelos matemáticos resulta insuficiente por lo que la simulación se constituye en una opción importante, básicamente por ser desarrollada esta a lo largo del tiempo (Tiempo Dinámico), ingrediente básico para retratar con precisión la realidad de los procesos constructivos. Lo que se hace es identificar comportamientos matemáticos individuales dentro del sistema, combinarlos en orden natural y lógicamente; analizar sus interacciones imitando la realidad para luego analizar y filtrar la información relevante. Podemos ver las operaciones y procesos como una colección de tareas relacionadas lógicamente con una estructura estática sobre la que fluyen los recursos (ejemplo, volquetes) y el estado del sistema puede definirse por el monitoreo de dichos recursos dinámicos fluyendo a través de rutas de flujo, pasando de estados activos (productivos) a estados disponibles (desocupados) esperando cubrir ciertas condiciones para pasar a un estado también activo. Bajo el marco presentado realizamos la simulación de interés elaborando varios modelos en el sistema CYCLONE (Halpin-1976-redes de operaciones cíclicas) y lo implementamos en un lenguaje de programación de propósito general específicamente diseñado para operaciones y procesos constructivos STROBOSCOPE (J. Martinez-1996).

El proceso constructivo objeto de simulación corresponde a los trabajos ejecutados en la obra de ampliación y remodelado del Espigon y Rampas Alfa y Bravo del Aeropuerto Velasco Astete Cusco. La empresa responsable de dichos trabajos fue Cosapi S.A. Ingeniería y Construcción. Mientras que la ejecución específica de interés de estudio, es decir la ampliación de las rampas Alfa y Bravo estuvo a cargo de la empresa constructora OCHOA-CRUZ INGS. La recolección de información de campo fue realizada entre las fechas 16-02-2000 al 29-02-2000, fecha en la que se concluyeron los trabajos de vaciado de losas de concreto para pavimento rígido en la rampas del Aeropuerto del Cusco.

3.1 Elaboración de los Modelos

Los elementos de modelado son básicamente cuatro: NORMAL, COMBI, COLA Y FLECHA (ver Ilustración 1); los mismos que pasamos a explicar a continuación.

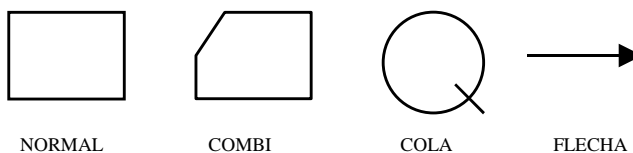


Ilustración 1 Elementos de modelado del sistema CYCLONE

Normal: El nudo cuadrado modela la tarea de trabajo "NORMAL". Una tarea de trabajo NORMAL no tiene ingredientes restringidos en sus entidades recurso. Para las tareas de trabajo NORMAL, el arribo de una entidad de recurso a su lado de ingreso es suficiente para permitir (dar inicio) el inicio de la tarea de trabajo; consecuentemente, no existen colas (de espera) de entidades recurso antes de una tarea de trabajo NORMAL. **COMBI:** El elemento de modelado COMBI es similar al elemento de modelado NORMAL con el requerimiento adicional lógico; que un grupo prescrito de requerimientos de ingreso en su lado de entrada que deben ser reunidos antes de que la tarea de trabajo pueda ser inicializada.

Cola: El nudo COLA actúa como una locación de almacenaje para los recursos disponibles (pasivos) y libera los recursos uno a la vez al siguiente nudo COMBI, siempre que el ingrediente lógico del nudo COMBI sea satisfecho.

Fecha: Una flecha o ARCO dirigido es usado para modelar la dirección de flujo de una entidad recurso entre diferentes estados activos "nudos cuadrados" y estados pasivos "nudos cola". El arco no tiene propiedades de tiempo de demora y simplemente modela la dirección del flujo de la entidad. El tiempo de tránsito de la entidad (entre tareas), una vez iniciado, es instantáneo.

Para la elaboración de los modelos podemos generalizar la siguiente secuencia: identificar los recursos relevantes, identificar los estados de los recursos y sus ciclos, integrar los ciclos de los recursos.

En nuestro caso tenemos el proceso de vaciado de losas de concreto de pavimento rígido, previa a su presentación es necesario puntualizar que el nivel de detalle de cualquier modelo de simulación esta en función a los objetivos que pretendamos alcanzar, bajo este criterio tenemos que los recursos y tareas de trabajo identificadas en campo son las siguientes:

Secuencia de inicio*	Tarea de Trabajo	Recursos Empleados	Cantidades-Recursos	Detalles Adicionales
1	Cargar Mixer con concreto	1. Planta de Concreto 2. Mixer Grande(MG) 3. Mixer Pequeño(MP)	1. 01 2. 01 3. 01	
2	Transporte Concreto	4. Mixer Grande(MG) 5. Mixer Pequeño(MP)	4. 01 5. 01	
3	Descarga Concreto	6. Mixer Grande(MG) 7. Mixer Pequeño(MP) 8. Recurso espacio	6. 01 7. 01	Se divide en: 1. Batido y Descarga
3	Esparcido Concreto	9. Cuadrilla Paleros (CP)	8. 01	1. 06 obreros
4	Vibrado	10. Vibradora (VI) 11. ReglaVibrat.(RV)	9. 01 10. 01	1 01 obrero movil** 2 Con Personal de CP
5	Acabado	12. Cuadrilla Acabado(CA)	11. 01	1. 06 obreros Se divide en:- 1er y 2do regleado-Frotachado
6	Acaba-Juntas	13. Cuadrilla Juntas(CJ)	12. 01	2 Con personal de CA
7	Esparcir Acelerante	14. Mochila (Mch)	13. 01	1 01 obrero m vil**

* define el orden de inicio pero no acaban necesariamente en este orden
** personal irrelevante para el modelo.

Dentro de este proceso el mayor detalle esta centrado en la interacción de la planta de concreto con los mixers por ser estos los que definen el ritmo de producción e implican el mayor costo dentro del proceso, aspectos que son objeto de nuestro interés. El modelo lo mostramos en la Ilustración 2.

De la Ilustración 2 observamos el ciclo del recurso Planta de Concreto, el mismo que pasa de un estado pasivo (cola ColPla) a un estado activo (Combi Cargar). En el caso del ciclo del recurso Mixer el mismo que tiene una interrelación en su comportamiento con el recurso Espacio en la actividad Descargar; es importante anotar el hecho de que la Cola ColEsp utilice el recurso Espacio en caso de ser empleado este en número de 1 como un regulador de las colas previas a las actividades Batir y Descargar, y si adicionamos al modelo el hecho de que se debe priorizar la actividad Descargar frente a la actividad Batir, tenemos que la actividad Batir solo se daría si no existe un recurso en Descargar, lo cual resulta congruente con la realidad, un incremento en el número de unidades Espacio implicaría la posibilidad de Descargas simultaneas de concreto. En el ciclo del recurso Concreto, vale anotar que si bien el ciclo de actividades seguidas por el recurso concreto son las mismas, el recurso no es

reingresado al sistema si no mas bien almacenado en la Cola ColCon4 que se constituye en una suerte de contador del concreto total procesado; en este ciclo existe una interrelación con los recursos Equipo Vibratorio, Cuadrilla de Acabados y Cuadrilla de Juntas, que en realidad emplean un formato similar (esclavo), y son empleados con un carácter de recopilación estadístico, pues en realidad todas estas actividades podrían ser agrupadas en una sola en el entendido de que el recurso Mano de Obra pueda ser generalizado.

3.2 Alcances de la Simulación

Dentro de los alcances de considerar en procesos de simulación tenemos el comportamiento aleatorio de las duraciones de las tareas de trabajo, el comportamiento dinámico del sistema en función del tiempo y la sensibilidad del sistema en su comportamiento a las características de los recursos, además de la inclusión de condiciones muy complejas de paralización, interrupción, iniciación, etc.

Las duraciones de las tareas de trabajo afectan la productividad del sistema, el mismo que es una consecuencia de los tiempos productivos y desocupados. Las duraciones tal cual se dan en la construcción dependen de una amplia gama de aspectos, tales como los equipos empleados, la modernidad, la magnitud del trabajo, la destreza, el espíritu de trabajo, etc. Estas duraciones por lo tanto pueden ser consideradas como determinísticas sin embargo lo real es que corresponden a un comportamiento probabilístico.

Para realizar el ajuste de muestreos de campo a distribuciones de probabilidad teórica se sigue la siguiente secuencia: hipotetizar la familia de distribución a la que pertenece la muestra (Normal, Gama, etc), estimar los parámetros de la distribución y finalmente realizar una prueba de bondad de ajuste que garantice que la distribución elegida es la correcta. Bajo un trabajo de esta naturaleza presentamos las distribuciones de probabilidad ajustadas para las tareas de trabajo de interés, en el cuadro siguiente.

Tarea de Trabajo	Distribución elegida	Unidad	Observación
Cargar	Normal[1.0084,0.0141]	Min/m3	Para MG y MP, en función de la capacidad del mixer
Transportar	Gamma[7.5,0.8981]	Minutos	Para MG y MP
Batir MG	Gamma[60,0.0351]	Minutos	Para MG
Batir MP	Normal[5.35,3.5851]	Minutos	Para MP
Descargar MG	Gamma[8.30,0.9241]	Minutos	Para MG
Descargar MP	Normal[7.8468,2.3270]	Minutos	Para MP
Retornar	Beta[2.28,25.22,2.101,13.283]	Minutos	Para MG y MP
Vibrar	Gamma[15,0.05]	Min/m3	En función de la cantidad de concreto
Acabar	Gamma[45,0.06]	Min/m3	En función de la cantidad de concreto
Juntas	Gamma[50,0.08]	Min/m3	En función de la cantidad de concreto

Las tareas de trabajo que están en min/m3 han sido procesadas en estas unidades, pues son tareas en las que su duración depende de la cantidad de concreto que puedan procesar. La Ilustración 3 nos muestra una distribución de probabilidad ajustada donde observamos el importante nivel de acercamiento entre lo observado en campo y la distribución teórica.

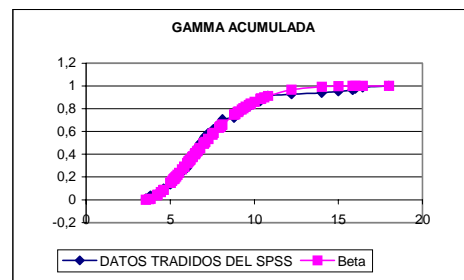
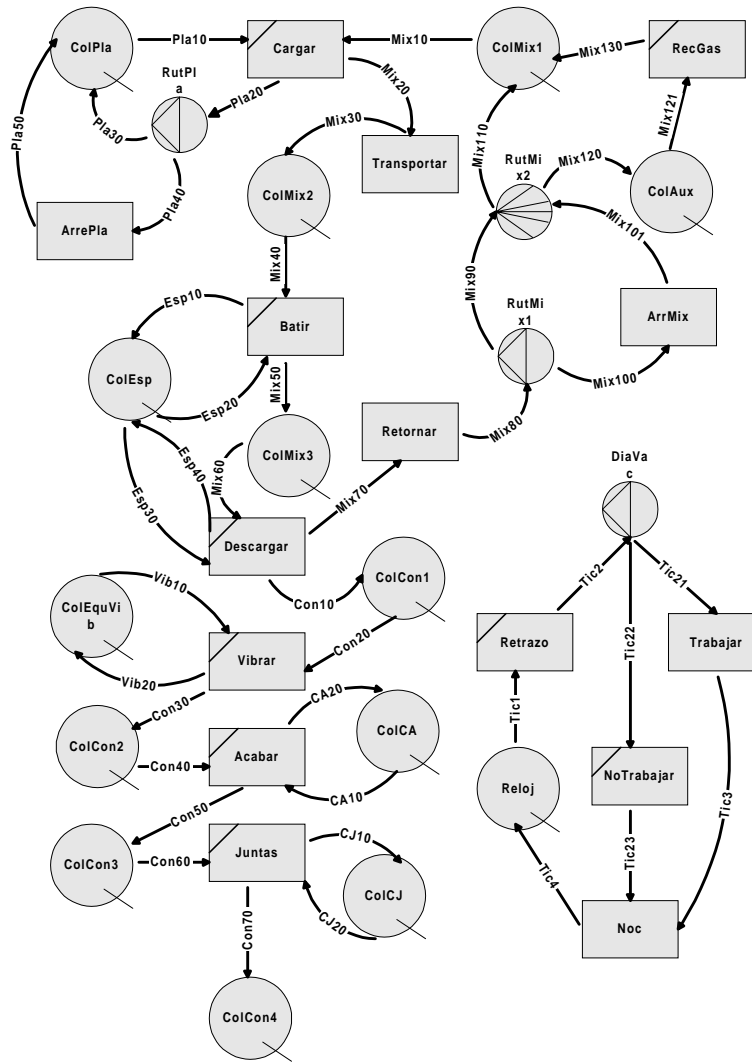


Ilustración 3 Distribución acumulada ajustada-Tarea Descargar con Mixer Grande (min)

El comportamiento dinámico del sistema en función del movimiento de las unidades o recursos (concreto, mixers, planta, etc.) nos permite observar la interacción entre los recursos, predecir la disponibilidad de los recursos, los cuellos de botella, la productividad, evaluar desbalances; simulando el movimiento de los recursos.

Ilustración 2 Modelo del vaciado de losas de concreto



4. RESULTADOS

4.1 Validación

Previo a cualquier cambio sobre las variables relevantes, necesitamos primero demostrar que el modelo tiene un comportamiento cercano a la realidad. En el entender de que el ciclo seguido por los mixers es el de mayor relevancia y detalle procedemos a estudiar este comportamiento; tenemos muestras de las duraciones de campo de cada una de las tareas, así mismo tenemos muestras de los tiempos que toma le toma aun mixer (MG) desde que sale hasta que reingresa a una tarea de trabajo en particular; estas mismas duraciones pueden ser generadas y registradas en un proceso de simulación. Una vez que tenemos las muestras de campo y de gabinete procedemos a realizar la prueba de la media de las muestras que nos permite establecer si ambas muestras (de campo y gabinete) pertenecen a la misma población, esto es realizado para cada una de las tareas de trabajo del ciclo del mixer, de lo cual obtenemos los resultados satisfactorios siguientes.

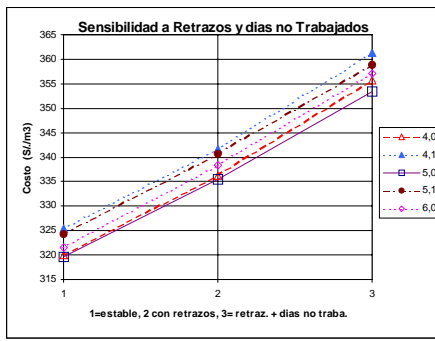
Tabla 1 Prueba de la media de las muestras

	Dur. Tareas de Trabajo -Campo					Dur. Tareas de Trabajo - Gabinete				
	Cargar	Trans.	Batir	Desc.	Retor.	Cargar	Trans.	Batir	Desc.	Retor.
P=PROMEDIO	6.003	5.92	2.16	7.51	4.76	6.0021	6.69	2.52	7.83	5.54
Varr=VARIANZA	0.00543	3.59	0.08	8.20	2.25	0.00353	7.83	2.58	8.22	4.67
N= Muestra	58.00	58.00	58.00	52.00	52.00	148.00	148.00	148.00	148.00	148.00
VAR/N	0.00	0.22	0.00	1.29	0.10	0.0000001	0.41	0.05	0.46	0.15
P1-P2						-0.00135	0.77	0.36	0.32	0.78
S=VARI/N1+VARI/N2						0.0000006	0.64	0.05	1.75	0.25
Raiz(S)						0.00	0.80	0.21	1.32	0.50
(P1-P2)/Raiz(S)						-1.75740	0.97	1.70	0.24	1.58
Valor de Tabla						1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
Comprobacion						OK	OK	OK	OK	OK

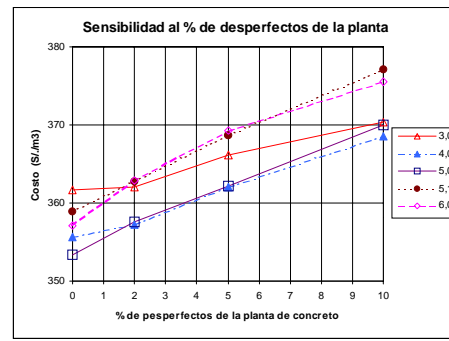
4.2 Analisis de Sensibilidad

Como ya adelantamos lo que básicamente nos interesa es optimizar la interacción de la planta de concreto con los mixers, ya que estos recursos definen el ritmo de producción del sistema e implican los costos mas importantes. Al realizar un proceso de simulación no pretendemos arribar a resultados con precisión matemática mas bien nos interesa establecer parámetros de comportamiento; desde este punto de vista es que creemos se deben interpretar los resultados que se logren. Adicionalmente se hace necesario destacar que tan solo una simulación no es suficiente para arribar a un resultado confiable, de allí la necesidad de realizar innumerables simulaciones hasta alcanzar niveles de confianza requeridos, en nuestro caso cada uno de los resultados que se presentan a continuación corresponden a un nivel de confianza del 95%. La manera de medir cuan optima es una configuración de mixers con la que se vaya a trabajar, recae finalmente en el costo por m3 de concreto producido que vaya a alcanzarse, es así que cuanto menor sea la relación \$/.m3 mejor será la configuración de mixers empleados. Los costos considerados son los que se muestran en la tabla 2.

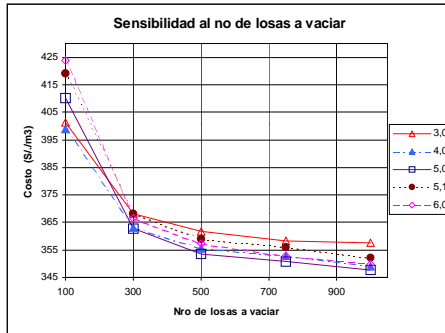
Bajo la aplicación de esta estructura de costos, para 500 losas a ser vaciadas, con retrasos y días no trabajados tenemos los siguientes resultados:



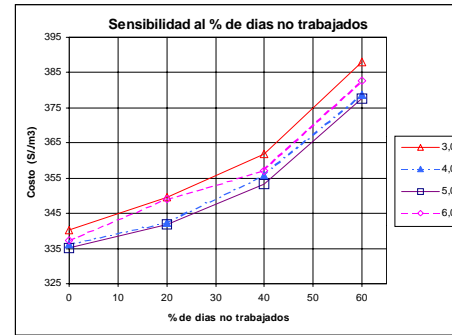
Este gráfico muestra tres condiciones de simulación: (1) sin retrasos, un proceso continuo, (2) se consideran retrasos al inicio de cada jornada (entre 2.5 y 7 hrs) y (3) además de los retrasos consideramos días que no se trabajan (en 40%).



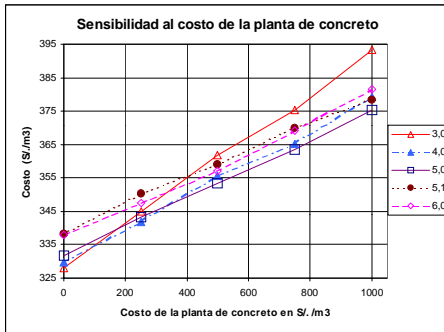
Aquí consideramos un porcentaje de desperfectos en la planta de concreto de entre 0 a 10% de las veces que carga a un mixer.



Aquí tenemos los costos obtenidos de tener que vaciar entre 100 a 1000 losas de concreto, cada losa es de 6.25 m³.



En este gráfico observamos la sensibilidad en los costos del sistema al porcentaje de días que no se trabajen, los mismos que varían entre 0 y 60% de los días. Podemos observar que bajo las diferentes condiciones analizadas la configuración 05 MG y 0 MP se constituye en la opción más óptima, seguida de la configuración 04MG y 0 MP.



Con respecto al costo horario de la planta (de S/.0 a S/.1000) tenemos el gráfico previo.

5. CONCLUSIONES

- Los procesos constructivos de naturaleza cíclica y de magnitud importante son los más indicados para realizar estudios de simulación y su consiguiente análisis, optimización, etc; por las implicancias de ahorro acumulado de recursos.
- La simulación nos permite optimizar los tiempos empleados en las tareas de trabajo a través de modificaciones en la lógica que determina la interrelación de los recursos y mediante la cuantificación balanceada de los recursos relevantes empleados; fundamentalmente mano de obra y maquinaria.
- La simulación es una herramienta de apoyo muy importante en la toma de decisiones dentro del contexto de administración de obra e incluso previa a esta; sin embargo un conocimiento cabal de la realidad de obra sigue siendo fundamental para llegar a resultados favorables.
- En proceso de simulación si bien lo primero en ser optimizado son los tiempos de trabajo, estos tienen una relación directa con las consideraciones de costos, pues son estos los que finalmente condicionan u orientan las decisiones a tomar; por supuesto dentro de un marco tecnológico que garantice niveles de calidad técnica.
- Los resultados obtenidos de un proceso de simulación no deben ser empleados como valores definitivos y de precisión decimal; la idea más bien es definir marcos o parámetros de comportamiento, bajo cierta configuración sujeta a análisis.

Tabla 2 Estructura de costos considerada.

Costos Fijos	S/.	Costos Variables	S/.
Costo de materiales por m³	155	Costo horario del consumo de combustible	60
Costo hora cuadrilla de acabados	17,5	Costo horario de combustible del MG- activo	25
Costo hora Cuadrilla de paleros	20	Costo horario de combustible del MG- pasivo	12,5
Costo horario de la planta de concreto	500	Costo horario de combustible del MP- activo	18
Costo horario del equipo vibratorio	35	Costo horario de combustible del MP- pasivo	9
Costo horario del mixer grande	145	Costo de movilización de la planta	14000
Costo horario del mixer pequeño	75	Costo de movilización del MG	2450
		Costo de movilización del MP	1050
		gastos por día por dirección técnica	140
		gastos por día por mantenimiento de oficina.	200