

## **BUFFERS DE PROGRAMACIÓN: UNA ESTRATEGIA COMPLEMENTARIA PARA REDUCIR LA VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN**

## **SCHEDULE BUFFERS: A COMPLEMENTARY STRATEGY TO REDUCE THE VARIABILITY IN THE PROCESSES OF CONSTRUCTION**

Por / By **Vicente González, Luis Fernando Alarcón,**

### **Resumen**

*Los programas de construcción son fundamentales para el éxito de los proyectos de construcción ya que definen la secuencia, ritmo y duración de sus procesos productivos. Sin embargo, las técnicas de programación actual no han abordado eficientemente la naturaleza variable de estos procesos, lo que se traduce en interferencias, retrasos y mayores costos para un proyecto. Aunque existen técnicas basadas en Lean Production, como el Último Planificador, que reducen la variabilidad a niveles razonables, en muchos proyectos no se aplican estas técnicas o bien existe variabilidad que aún no se controla. En este trabajo se plantea el uso de Buffers de Programación como estrategia complementaria para proteger de la variabilidad a los procesos de producción en los proyectos de construcción, para la cual no han sido tomadas las suficientes acciones. En esta línea se propone una Metodología para la Administración de Buffers de Programación en Proyectos Repetitivos y se exponen sus aspectos conceptuales principales. Este artículo aborda: la temática de la variabilidad en construcción, las principales técnicas de control y programación de proyectos, las más relevantes investigaciones sobre Buffers en construcción, y los elementos conceptuales de la Metodología para la Administración de Buffers propuesta. La revisión de la literatura demuestra que los Buffers son una buena alternativa para reducir la variabilidad en los procesos de producción en construcción, sin embargo, no existen modelos analíticos que dimensionen tamaños de Buffers óptimos, ni metodologías que los administren adecuadamente. El uso de tamaños de Buffers óptimos facilitará el desarrollo de programas de construcción de mayor capacidad predictiva, así como también, una adecuada administración de éstos mejorará el flujo de producción en terreno en los proyectos. Este trabajo es apoyado por el Centro de Excelencia de Gestión de Producción, GEPUC, de la Pontificia Universidad Católica de Chile.*

**Palabras claves:** *Variabilidad, Programas de Construcción, Lean Production, Lean Construction Buffers.*

### **Abstract**

*Construction schedules are critical to the success of construction projects, as they define the sequence, rhythm and duration of productive processes. However, the traditional construction schedules have not adequately coped with the variable nature of these processes that are reflected in interferences, delays and higher costs to attain a project efficiently. Even though there exist techniques based on Lean Production, such as, for instance, Last Planner which reduces the variability to reasonable levels, many projects either do not apply these techniques or there exist variability that is not controlled as yet. This investigation aims at using Schedule Buffers as a complementary strategy to protect from the production processes variability in the construction projects and also describes the main aspects of a Methodology of Management of Schedule Buffers in Repetitive Projects. This article addresses a number of issues: the problem of variability in construction, the main control techniques and construction schedules, the major investigations on Buffers in construction, and the conceptual aspects of a Methodology of Management of Schedule Buffers in Repetitive Projects. Existing literature show that there do exist any analytic models that permit determining optimum sizes of Buffers, nor methodologies to manage them appropriately. There is no conceptual structure that integrates the diverse types of Buffers that can be used in construction, so as to compare and evaluate their use (either jointly or separately). The use of optimum-sized Buffers will facilitate the development of a construction schedule with a greater predictive capacity, as well as, an appropriate management of them will improve the production flow in site in the projects. This work is the preliminary development of a doctoral investigation supported by the Centro de Excelencia en Gestión de Producción, GEPUC, of the Pontificia Universidad Católica de Chile.*



**Keywords:** *Variability, Schedule of Construction, Lean Production, Buffers.*

## 1. INTRODUCCIÓN.

Los programas de construcción en un proyecto son claves para su éxito, pues determinan la secuencia de los procesos de producción o actividades del proyecto, definen su ritmo o tasas de producción, y además determinan la duración completa del proyecto. Por lo tanto, estos perfilan el trabajo que se debe desarrollar y sirven de base para las estimaciones de recursos en un proyecto.

En general, los programas de construcción están basados en los supuestos de las redes CPM/PERT, técnicas que muestran un carácter estático para representar adecuadamente la naturaleza dinámica de los procesos de producción en construcción. El dinamismo presente en estos procesos genera una gran variabilidad que se traduce en interferencias, atrasos y mayores costos para un proyecto. Esto se debe a que los programas de construcción no se adaptan adecuadamente a los constantes cambios de estos procesos. Esta característica, es sin duda, la mayor debilidad de las técnicas tradicionales de programación de proyectos, haciendo que la programación a la larga pierda confiabilidad.

No obstante, modernas técnicas de gestión de proyectos basados en el paradigma de *Lean Production*, han dado origen a sistemas de control de producción como el Último Planificador que reduce la variabilidad del flujo de producción a niveles razonables (GEPUC, 2003; Ballard y Howell; 1998; Bernardes, 2001). Esto implica que hay variabilidad en el flujo de producción que no es reducida o "controlada" adecuadamente impactando negativamente el desempeño de un proyecto. Por otro lado, en la mayoría de los proyectos no se usan técnicas para reducir la variabilidad de sus procesos, lo que hace todavía más necesario una solución distinta.

Esta investigación plantea el uso de *Buffers* como estrategia complementaria para atacar y reducir la variabilidad de los procesos de producción en construcción. Los *Buffers* independizan a los procesos de su medio ambiente y de los procesos de que dependen (Koskela, 2000), permitiendo amortiguar el impacto negativo de la variabilidad sobre una cadena de procesos de producción. Por ejemplo, los inventarios de materiales en un proyecto de construcción representan *Buffers* pues permiten amortiguar las fluctuaciones en la entrega de materiales desde un proveedor externo. Esto asegura el trabajo para las unidades productivas del proyecto y evita su inactividad por falta de materiales. En el contexto de proyectos repetitivos se analizan los *Buffers* de WIP (Inventarios de Trabajo en Proceso). Estos *Buffers* pueden ser entendidos como avance físico entre actividades sucesivas de un proyecto repetitivo, y permiten perfilar el trabajo de las actividades de un proyecto ajustándose a las variaciones en las tasas de producción de actividades río arriba en la cadena de producción.

En este trabajo también se destacan los principales aspectos de una Metodología para la Administración de *Buffers* de Programación, que permita dimensionar y administrar dichos *Buffers* en el contexto del desarrollo de Proyectos Repetitivos. Este artículo discute las indagaciones preliminares de una investigación de más largo aliento (González, 2003).

En resumen, se analiza el impacto de la variabilidad en construcción, las principales técnicas de control y programación de planificación, las más relevantes investigaciones sobre *Buffers* y su rol en construcción, y los contenidos preliminares de una Metodología para la Administración de *Buffers* de Programación en Proyectos Repetitivos.

## 2. VARIABILIDAD EN CONSTRUCCIÓN.

A continuación se aborda el tema de variabilidad en los procesos de producción en construcción. Se analiza su presencia en dichos procesos y se evalúa su impacto.

### 2.1. Variabilidad en proyectos de construcción.

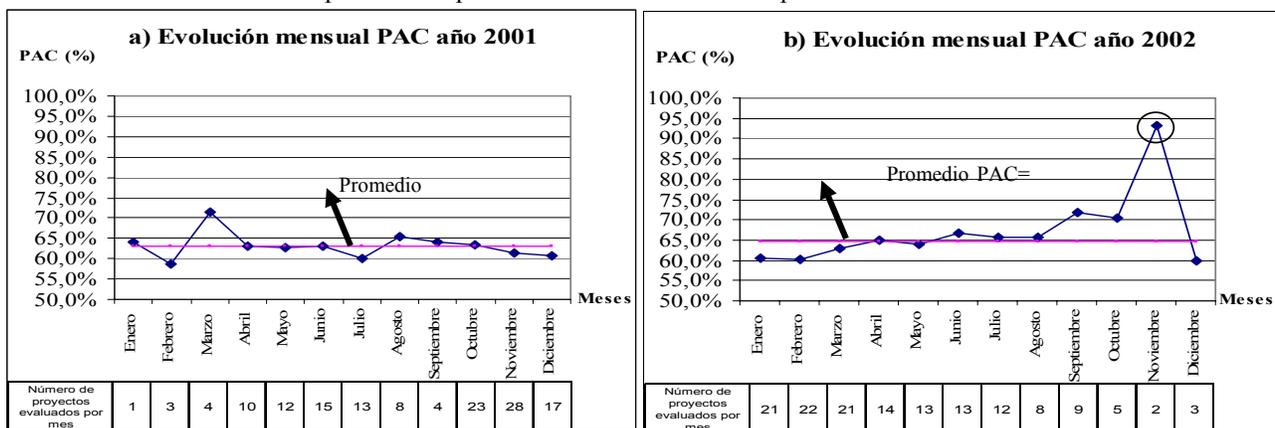
Baccarini (1996) define como complejidad a muchos elementos distintos interrelacionados y se operacionaliza en términos de diferenciación e interdependencia. La complejidad de un proyecto genera incertidumbre en dos formas: (a) estructural (número de elementos e interdependencia de elementos) y (b) en metas y métodos (Williams, 1999). La complejidad e incertidumbre de un proyecto de construcción produce variabilidad en los flujos de producción (Horman, 2000).

Variabilidad es la calidad de no-uniformidad de una clase de entidades. Está muy relacionada con la aleatoriedad de un fenómeno. La desviación estándar y la varianza son medidas de variabilidad en una muestra o proceso (Hopp y Spearman, 1996). Deming sostiene que existen dos tipos de variabilidad en el flujo de producción: variación de causa común, que afecta permanentemente al proceso y con frecuencia puede ser modificada por la gerencia; y la variación de causa especial, más fácil de eliminar y que se presenta en forma imprevista (Walton, 1985). Koskela (2000), también afirma que hay dos tipos de variabilidad en los flujos de producción: variabilidad en los tiempos de proceso y variabilidad en el flujo. La variabilidad en los tiempos de proceso se refiere al tiempo requerido para procesar una tarea en una estación



de trabajo. Este tipo de variabilidad consiste de variabilidad natural (fluctuación debido a diferencias entre operadores, máquinas y material), detenciones aleatorias, preparaciones, disponibilidad de operadores y trabajo rehecho (debido a calidad inaceptable). Por otro lado, la variabilidad en el flujo significa variabilidad en la llegada de trabajos a una estación de trabajo.

GEPUC ha realizado investigaciones en más de 73 proyectos de más de 14 empresas chilenas (proyectos de edificación en altura, edificación en extensión, montaje industrial pesado y liviano) donde se aprecia el efecto de la variabilidad en los procesos de producción (Alarcón et al, 2002; Alarcón y Calderón, 2003; GEPUC, 2003). En estos proyectos se ha implementado el Último Planificador (Ballard, 2000) que es una técnica de planificación y control de producción. Esta técnica utiliza el PAC (porcentaje de actividades completadas) definido como el número de actividades completadas dividido por el número de actividades planificadas en un horizonte de tiempo, generalmente una semana. Las variaciones en los flujos de producción de los proyectos estudiados fueron medidas a través del PAC, tal como se aprecia en la Figura 1. Es relevante comentar que el PAC refleja el nivel de cumplimiento efectivo de las actividades que son comprometidas en los planes semanales de un proyecto. En este sentido, el PAC es un buen indicador de las variaciones que dichos planes experimentan en un período de tiempo, mostrando de manera explícita la variabilidad en los flujos de producción. Por otro lado, el PAC no debe ser confundido con un indicador de avance físico de un proyecto, debido a que el patrón de comparación del PAC es sobre planes semanales, y el de avance físico es sobre el alcance total del proyecto (Programa Maestro). En resumen, el PAC mide el grado de confiabilidad de los planes semanales y además permite observar la variabilidad de los procesos de producción basados en dichos planes.



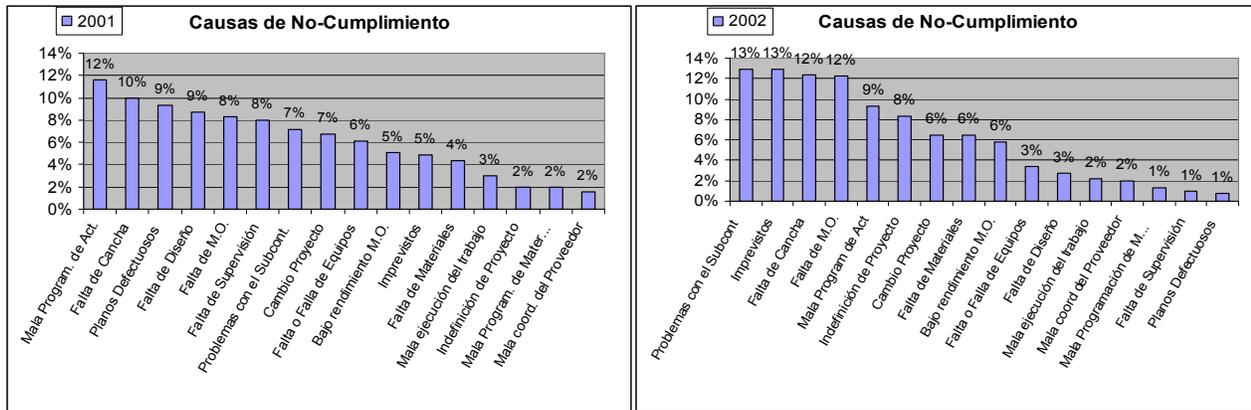
**Figura 1. Variabilidad global en procesos de producción en proyectos de construcción:**

- a) PAC promedio = 63.2% de una muestra de 51 proyectos analizados en el año 2001 y
- b) PAC promedio = 64.8% de una muestra de 45 proyectos analizados en el año 2002 (GEPUC, 2003).

Los gráficos de la Figura 1 corresponden a la evolución del PAC mensual y condensan los resultados de los proyectos indicados entre los años 2001 y 2002. La variabilidad que se produce en los procesos de producción es clara y esto se observa a través del valor del PAC promedio que en el año 2001 fue igual a 63.2% y en el año 2002 fue igual a 64.8% (el PAC promedio del mes de Noviembre indicado en un círculo en la Figura 1 se excluyó del promedio porque se sale de la tendencia de PAC del año y representaba a solo dos proyectos, pudiendo sesgar la tendencia anual). Estos valores indican que solo un poco más de la mitad de las asignaciones planificadas en cada año se cumplieron. Esta evidencia empírica muestra la existencia de alta variabilidad en los procesos de producción en construcción e indica que una fracción de la variabilidad está siendo controlada a través de la aplicación del Último Planificador, dado los valores de PAC mostrados en la Figura 1.

Adicionalmente, en los proyectos de la Figura 1 se analizaron las causas de no-cumplimiento (CNC) de los programas de construcción. Las CNC muestran las razones por las cuales los planes semanales no se cumplen, es decir, indican las razones de las variaciones de dichos planes. En la Figura 2 se observan los registros de CNC sobre estos proyectos y se aprecia su evolución entre los años 2001 y 2002. Por ejemplo, CNC como Mala programación de actividades o Planos defectuosos disminuyen su posición como CNC, indicando que su efecto disminuye sobre los proyectos reduciendo la variabilidad; a su vez, CNC como Falta de mano de obra o Problemas con Subcontratos aumentan su posición, indicando que su efecto permanece o se incrementa en los proyectos, traduciéndose en variabilidad que permanece constante o se incrementa. Esto evidenciaría que hay variabilidad que se reduce efectivamente, pero también indica que hay variabilidad que permanece en un proyecto y que es difícil reducir, planteando la necesidad de algún medio de protección o reducción para esta variabilidad para la cual no se han tomado suficientes acciones.





**Figura 2. Causas de no-cumplimiento globales de los procesos de producción en proyectos de construcción: a) 51 proyectos medidos en el año 2001 y b) 45 proyectos medidos en el año 2002 (GEPUC, 2003).**

## 2.2. Impactos de la variabilidad en proyectos de construcción.

En general, la variabilidad afecta las tasas de producción y puede bajar la productividad general de un proyecto (Alarcón y Ashley, 1999). Cuando la variabilidad se incrementa, se traduce en tasas de producción más bajas y pérdidas de capacidad. Con la variabilidad, los trabajos en progreso también se hacen más cuantiosos (Tommelein et al, 1998). Inclusive, la teoría de colas reconoce que el incremento de la variabilidad en un sistema incrementa los tiempos de espera (Hopp y Spearman, 1996). Fundamentalmente la variabilidad en los proyectos de construcción se traduce en plazos más largos y costos más altos. La tabla 1 muestra los impactos de la variabilidad en proyectos de construcción según varias investigaciones.

Se observa de la tabla 1 que la variabilidad produce ineficiencias graves en un proyecto de construcción, incurriendo en plazos más largos y costos más altos e implicando la reducción de otros indicadores relevantes. Según Thomas et al (2002) la variabilidad puede inducir fluctuaciones y condiciones inesperadas, haciendo los objetivos de un proyecto inestables y oscureciendo los medios para lograrlo. Ballard y Howell (1998) indican que la variabilidad no agrega valor al proyecto y a menudo resulta en que los proyectos no reúnen los requerimientos de calidad. Tommelein (1997) agrega que la incertidumbre en un proyecto es el mayor culpable de pérdidas (actividades que no agregan valor).

En particular, la investigación de Ballard (1993) plantea un medio de protección contra la variabilidad a través del uso de contingencias o *Buffers*.

**Tabla 1. Impacto de la variabilidad en proyectos de construcción.**

INVESTIGACION	EFECTOS DE LA VARIABILIDAD
Alarcón y Ashley (1999)	Ilustran el efecto de la variabilidad en los procesos de producción en construcción a través de la simulación de un proyecto sencillo de cinco actividades, que emula el juego de los dados. Muestran como el impacto de la variabilidad retrasa al proyecto en un 25% respecto a la duración original donde no hay incertidumbre y no existe variabilidad en las tasas de producción.
Campero y Alarcón (1999)	Thompson y Perry utilizando datos de proyectos del Banco Mundial encontraron que de 1627 proyectos revisados, el 88% terminó con atrasos. Shi et al (2001) define una serie de relaciones causa-efecto genéricas para retrasos en proyectos de construcción. Estas relaciones coinciden con lo mostrado en la figura 2 donde se registran CNC de investigaciones del GEPUC. Las CNC son un claro ejemplo de variabilidad en los procesos de construcción y según lo planteado por Shi et al (2001), se traducen en atrasos en los proyectos. Esto justificaría lo hallado por Thompson y Perry, y mostraría el grave impacto de la variabilidad sobre los proyectos.
Ballard (1993)	Mostró que cuando la asignación de recursos externos en un proyecto es errática y variable (diseños y especificaciones de ingeniería), alrededor del 30% promedio de las entregas estuvieron fuera de plazo, y se produjeron retrasos hasta de 56 días en la entrega de diseños y especificaciones. Aunque este caso terminó en el plazo (se consideraron <i>Buffers</i> ), revela que este comportamiento variable en el abastecimiento de diseños y especificaciones puede impactar en forma negativa a un proyecto que no considere contingencias o <i>Buffers</i> en sus programas (proyectos con programas de planificación altamente comprimidos).
Ballard y Howell (1994)	Hallaron en un importante proyecto industrial de tuberías que grupos de trabajo con PAC inferior al 50% (alta variabilidad), terminaron sus trabajos con un 15% sobre el presupuesto.
Bernardes (2000)	Halló en su investigación una correlación negativa de 0,69 entre el PAC y los coeficientes de variación de dichos PAC. Esto implica que a valores de PAC bajos, el ambiente de trabajo se vuelve muy inestable en un proyecto, es decir, aumenta la variabilidad. De los datos recopilados se aprecia que casi un 27% de los proyectos cumplen con menos de la mitad de las asignaciones semanales (valores de PAC menores al 50%), presentando alta variabilidad.
Thomas et al (2002)	Thomas et al (2002) recogió datos de variabilidad de la productividad de mano de obra en el proceso de colocación de encofrados de 15 proyectos (medido a través del coeficiente de variación) y datos de pérdida de desempeño de mano de obra (medido a través del PWI o Índice de Pérdida de Proyecto, que compara la cantidad actual de trabajo instalado y las horas-hombre utilizadas, con el 10% de días de mejor cantidad de trabajo instalada y horas-hombre usadas en un proyecto para un período determinado, Thomas (2000)). Se observa de los datos recogidos que para una diferencia de un 97% entre los coeficientes de variación de productividad de mano de obra entre proyectos se observó un incremento del PWI de un 95%, implicando una reducción del desempeño de la mano de obra al incrementarse la variabilidad.



### 3. TRATAMIENTO ACTUAL DE LA VARIABILIDAD EN LA PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN.

Actualmente existen diversas técnicas de programación y de apoyo a la planificación para proyectos de construcción (repetitivos y no-repetitivos). Estos en mayor o menor grado permiten enfrentar la variabilidad en sus procesos de producción. A continuación se describen estas técnicas y se discute su efectividad frente a la variabilidad.

#### 3.1. Técnicas tradicionales de programación de proyectos de construcción.

Frecuentemente para la programación de proyectos de construcción se utiliza la técnica de red CPM. Esta técnica utiliza duraciones únicas (más probable) en cada actividad para calcular la duración total de los programas que genera, siendo por lo tanto, de carácter eminentemente determinístico. Esto limita la capacidad de los programas para representar la variabilidad de los procesos de producción involucrados.

La técnica de red PERT es una variación de la técnica CPM. Esta introduce incertidumbre a las duraciones de las actividades de los programas que genera (duración pesimista, optimista y más probable), sin embargo, aunque los procedimientos de cálculo se repitan numerosas veces considerando los mismos datos de entrada, se produce siempre el mismo resultado para la duración esperada. Por tanto, es una técnica estática para representar la variabilidad de un proceso. Además presenta otra falencia, subestima la duración total del proyecto por el "sesgo de unión de eventos" (Lu, 2002; Lu y AbouRizk, 2000; Barraza et al, 2000). Este fenómeno es causado por ignorar las rutas de un programa cercanas a la criticidad en el cálculo del tiempo total de un proyecto.

En particular, la programación de proyectos repetitivos a través de técnicas como la programación rítmica, utiliza Cartas Gantt y tasas de producción predeterminada para eliminar los tiempos muertos en un proyecto. Fundamentalmente aplican los supuestos de las técnicas CPM/PERT, presentando sus mismas carencias.

Otras técnicas de programación repetitiva que abordan la variabilidad, pero no de un modo óptimo, son las Líneas de Balance (LOB) y los Gráficos de Velocidad (GV). Estos en general superan las limitaciones de la programación rítmica y el enfoque CPM/PERT al programar proyectos repetitivos (Huang y Halpin, 2000; Arditi et al, 2001). Las LOB y los GV básicamente registran el progreso acumulado de los procesos de producción y su evolución en el tiempo. Estas técnicas consideran espacios de tiempo equivalentes a avance físico entre actividades (*Buffers* de WIP), protegiendo a las actividades río abajo en la cadena de producción de la variabilidad de las actividades río arriba. Sin embargo, esta "protección" es subestimada al no considerar efectivamente los efectos que tiene la variabilidad sobre los procesos de producción. Otra carencia que presentan las LOB y los GV es que suponen un progreso lineal de las tasas de producción al programar las actividades (cuestión que en la realidad no sucede). Arditi et al (2001) ha profundizado en la aplicación de las LOB introduciendo aspectos tales como curvas de aprendizaje, patrones de uniformidad de las actividades de un proyecto (actividades lineales y no lineales), y restricciones de espacio-tiempo en la programación de actividades repetitivas, aumentando sus potencialidades en la programación de proyectos repetitivos y contribuyendo a la reducción de la variabilidad.

#### 3.2. Simulación de programas de construcción.

Otro enfoque pero de carácter probabilístico es la simulación. Esta permite describir de un modo más preciso los procesos de producción en construcción, al considerar aleatoriedad y cambio constante en sus resultados (variabilidad), a diferencia de métodos más estáticos. Uno de sus principales exponentes en la programación de proyectos es la simulación de MonteCarlo que permite construir distribuciones de probabilidad de las duraciones de un proyecto de un modo más preciso que la técnica PERT, porque considera las rutas del programa cercanas a la criticidad (evita el sesgo de unión de eventos).

Un punto conflictivo es la determinación de la ruta crítica, que calculada de un modo tradicional (considerando las holguras totales de cada actividad) se vuelve un procedimiento engorroso frente a proyectos complejos. Halpin y Riggs (1992) presentan un enfoque de simulación PERT usando CYCLONE, que es un software de simulación de procesos de construcción desarrollado por Halpin y Woodhead (1976), donde a través de estadísticas de tiempos de espera determinan la criticidad de una actividad (tiempo de espera igual a cero implica que una actividad es crítica). Con esto luego de varias corridas de simulación se determina el índice de criticidad de una actividad (que es la razón entre el número de corridas que



una actividad es crítica y el número de corridas totales de la simulación), simplificando los cálculos al determinar la ruta crítica de un proyecto. Este enfoque es ampliado y mejorado por el modelo de simulación discreta simplificado CPM/PERT de Lu y AbouRizk (2000).

La simulación supera largamente a las técnicas de programación estáticas al representar más apropiadamente la naturaleza dinámica de los procesos de construcción. Sin embargo, puede presentar los siguientes problemas de índole práctico: primero, la carencia de personal especializado a nivel operacional en los proyectos para manipular técnicas de simulación; segundo, técnicas simples como la simulación de MonteCarlo permiten construir y simular programas de construcción de un modo simple, no obstante, los modelos se vuelven engorrosos al calcular la ruta crítica y es posible que no aborden todas las incertidumbres características de los procesos de construcción; y tercero, si se utiliza un enfoque discreto o continuo en la simulación, la construcción de modelos de simulación que representen adecuadamente la naturaleza dinámica de los procesos de producción requieren un esfuerzo mayor que actualmente es propio del ámbito académico, considerando el altamente competitivo y exigente ambiente de la industria de la construcción. Se debe tener presente también, que incluso la técnica PERT es poco usada actualmente en los proyectos (PMI, 2000).

### 3.3. El Último Planificador

El Último Planificador es una técnica de planificación y control de producción para proyectos de construcción desarrollada por Ballard (2000). Esta técnica utiliza Inventarios de Trabajos Ejecutables (ITE), que permiten tener preparadas actividades para ser ejecutadas en el futuro (cuatro a seis semanas). Esto otorga mayor confiabilidad a los flujos de producción y "reduce" su variabilidad. El indicador de confiabilidad y de variabilidad de los flujos de producción es el PAC (comentado en la sección 2.1). Ballard y Howell (1994) hallaron en un importante proyecto industrial de tuberías que grupos de trabajo con PAC sobre el 50% tuvieron una productividad 30 puntos más alta que aquellos con PAC bajo el 50%. Es decir, el primer grupo acabó sus trabajos un 15% bajo el presupuesto, mientras que el segundo grupo acabó con un 15% sobre el presupuesto (Tabla 1).

En los proyectos investigados por el GEPUC entre los años 2001 y 2002 donde se implementó el Último Planificador, se obtuvieron mejoras en el desempeño de varios proyectos indicadas en la tabla 2 (GEPUC, 2003). Los mejoramientos más destacados de la tabla 2 son la reducción en la variabilidad, en la desviación de plazos (atrasos) y en la desviación de costos (sobrecostos), y aumentos en la producción y productividad de los proyectos. Estos mejoramientos se lograron fundamentalmente con solo un 1.6% de incremento del PAC global entre los años 2001 y 2002 (ver Figura 1), indicando que aún existen grandes oportunidades para mejorar.

**Tabla 2. Mejoramientos en proyectos de construcción período 2001-2002 (GEPUC, 2003).**

Clase de Proyecto	Indicador	Unidad	Mejoramiento
Montaje Industrial Pesado	Estructura de acero montada por Hora-Hombre	Ton/HH	+48,7%
	Factor de Costo: HH Gastadas/HH Vendidas	HH/HH	+45,0%
Edificación en Extensión	Desviación de Plazo	(P. Estimado-P.Real)/P.Estimado	+21,4%
	Albañilería	m2/HH	+7,0%
	Desempeño Planificación: PAC	%	+12,5%
Edificación en Altura	Desviación de Plazo	(P. Estimado-P.Real)/P.Estimado	+11,0%
	Velocidad de Avance	m2/semana	+19,0%
Montaje Industrial Liviano	Desviación de Costo	(C. Estimado-C.Real)/C.Real	+22,0%
	Productividad de Hormigonado	m3 Hormigón/HH	+34,5%
	Nivel de Trabajo: Trabajo Productivo	%	+12,0%

Aunque el Último Planificador estabiliza los procesos de producción en construcción, reduce su variabilidad y aumenta su confiabilidad, esta es una técnica de control de producción, por lo tanto, carece de capacidad predictiva para diseñar programas de construcción. Por otro lado, a pesar de su aplicación en los procesos de producción en construcción se aprecia que existe variabilidad que no es abordada efectivamente por los usuarios del Último Planificador según los datos mostrados por investigaciones del GEPUC (indicados en la sección 2.1).

### 3.4. Buffers en Construcción.

Otro modo de lidiar contra la variabilidad en un proyecto de construcción es a través de *Buffers*, que como se comentó anteriormente, permiten independizar a los procesos. Esto reduce el impacto de la variabilidad entre procesos en



una cadena de producción. Al independizar los procesos y permitirles amortiguar el impacto negativo de la variabilidad, se mejora el desempeño general de la cadena de producción. Para propósitos de esta investigación se hace la siguiente clasificación de *Buffers*:

- i) Contingencias: cantidades en tiempo o costo, que permiten manipular y dirigir futuros imprevistos (Horman, 2000). Esta es una práctica usual en los proyectos de construcción, que se aplica tanto a programas como a presupuestos.
- ii) Inventarios: son stocks de elementos en exceso, stocks de seguridad, WIP, e inventarios de bienes terminados (Horman, 2000). Las LOB y GV hacen uso en forma implícita de *Buffers* de WIP entre procesos (comentado en la sección 3.1).
- iii) Tiempo (incluyendo el flujo de trabajo): entendidos como colas, lotes, deliberadas pausas de producción, flujos reguladores y holguras en el programa (Horman, 2000).
- iv) Capacidad Operacional: entendido como utilización flexible de mano de obra, de plantas y equipos, de modo que se ajusten a la demanda actual (Horman, 2000). En el ambiente de la construcción un *Buffer* de este tipo implica, por ejemplo, poseer mano de obra que se ajuste a los requerimientos variables de producción (cantidad flexible de mano de obra).
- v) Planes: representados fundamentalmente por los ITE del Último Planificador (Ballard y Howell, 1995).

Las investigaciones relacionadas con la aplicación de *Buffers* en construcción se resumen en la tabla 3. Estas investigaciones coinciden en que la variabilidad debe ser administrada y minimizada. En este sentido varias de estas investigaciones indican que con el uso de *Buffers* en los proyectos se minimiza el impacto de la variabilidad, permitiendo reducciones importantes en plazos, costos y en las pérdidas de un proyecto.

**Tabla 3. Resumen de investigaciones relacionadas con Buffers en proyectos de construcción.**

INVESTIGACION	PROYECTO/ PROCESO/Nº(1)	TECNICA DE INVESTIGACION	TIPO DE BUFFER	TAMAÑO DE BUFFERS	OBSERVACIONES
Alarcón y Ashley (1999)	Proceso simple de cinco actividades/1	Modelo de Simulación de proceso	Inventario de WIP	Pequeños a Grandes	Obtención de modelo de costo mínimo para dimensionar tamaños de <i>Buffers</i> en función de variabilidad. Con <i>Buffers</i> pequeños a grandes entre procesos, el incremento en costos de proyecto se redujo de un 17% a un 5%, respectivamente. Igualmente el incremento en plazos se redujo de un 20% a un 4% respectivamente, de un incremento original igual a un 25% (tabla1)
Al-Sudairi et al (2000)	Fabricación e instalación de acero estructural/3	Modelo de Simulación de proceso	Inventario de Materiales	Medianos	Reducción de tiempo de ciclo con <i>Buffers</i> medianos entre los procesos igual a 35%.
Al-Sudairi et al (1999)	Fabricación e instalación de acero estructural/1	Modelo de Simulación de proceso	Inventario de Materiales	Medianos	Reducción de retrasos en tiempo de ciclo con <i>Buffers</i> medianos entre los procesos igual a 50%.
Howell et al (1993)	Plantea el uso de Buffers de Inventario de materiales para aliviar dependencias y tiempos ociosos cuando subciclos de procesos interactúan unos con otros				
Goldratt (1997)	_____	_____	Contingencia	Variable, de acuerdo a tamaño de proyecto	Desarrollo de Concepto de Cadena Crítica (CC) para administración de proyectos sustentada en la Teoría de Restricciones. Esta consiste en Nivelar las Cargas de recursos en un programa de proyecto y colocar un Buffer al final del proyecto igual a la suma de la diferencia entre el 95% y 50% probable de duración de cada actividad. Experimentos de Herroelen y Leus (2000) demostraron que este supuesto sobreestima la duración de un proyecto.
Horman (2000)	Proyectos Comerciales/6	Simulación de Montecarlo	Capacidad	Bordeando el 100%	Con la capacidad de mano de obra al límite, obtuvo reducciones de plazos igual a 44% y de costos igual a 10%. Esta investigación es un importante aporte en la comprensión de los Buffers de capacidad en la construcción, no obstante, carece de una metodología estructurada para diseñar y administrar la capacidad flexible de mano de obra en terreno. Por otro lado, la técnica de simulación usada (Montecarlo) no rescata todas las complejidades e incertidumbres del ambiente de los proyectos de construcción.
Sakamoto et al (2002)	Fabricación e instalación de acero de refuerzo en proyectos comerciales/3	Medición de productividad de mano de obra	Inventario de WIP	4.5% a 7.5% de avance físico entre procesos (óptimo)	En esta investigación se utiliza el Índice de Pérdida de Proyecto, PWI, (definido en la tabla 1) para medir la pérdida de desempeño de mano de obra. En una muestra de tres proyectos, se utilizaron tamaños de <i>Buffers</i> de 8,7%, 2,8% y 1,9 % entre procesos. Los PWI obtenidos fueron respectivamente 1,161; 1,339 y 2,585. El proyecto con mayor tamaño de <i>Buffer</i> (8,7%) redujo en un 13% y 55% el PWI, respectivamente.
Tommelein et al (1998)	Proceso simple de cinco actividades/1	Modelo de Simulación de proceso	Inventario de WIP		Permite observar la utilidad de los <i>Buffers</i> investigados y como estos tienden a crecer al aumentar la variabilidad.
Tommelein (1998)	Proyecto de Instalación de Tuberías/1	Modelo de Simulación de proceso	Inventario de Materiales	Pequeños	Se propone el uso de <i>Buffers</i> pequeños y programas de preconstrucción flexibles para un progreso de trabajo efectivo.
Tommelein y Weissenberger (1999)	Fabricación e instalación de acero estructural/2	Mapeo de la Cadena de Valor	Inventario de Materiales	Pequeños	<i>Buffers</i> deben ser pequeños para ver el alcance para el que son necesarios. También deben ser dimensionados y ubicados estratégicamente en los procesos para asegurar el flujo, y asegurar costo-efectividad a un mínimo impacto en el tiempo de ciclo.
Tommelein y Yi Li (1999)	Abastecimiento Hormigón premezclado	Mapeo de la Cadena de Valor	Se reconoce la utilidad de <i>Buffers</i> de información, materiales y tiempo ubicados estratégicamente en el flujo de producción para reunir requerimientos específicos del sistema (naturaleza del trabajo) y la demanda de producción.		

(1) N°: Corresponde al número de procesos o proyectos investigados.



Otro aspecto que se observa en la tabla 3 muestra como los procesos de producción en construcción se vuelven frágiles con la ausencia de *Buffers*. Si bien es cierto, la utilización de *Buffers* implica pérdidas o desperdicio según el modelo de *Lean Production*, no utilizarlos en los procesos de producción en construcción se hace inadecuado. Esto se debe a que aunque se apliquen técnicas de control de producción y se establezcan los procesos, aún existe variabilidad que permanece (según se observó en las secciones 2.1 y 3.3). De hecho Sakamoto (2002) reconoce que aunque la planificación sea la mejor, no toda la variabilidad es eliminada. Thomas et al (2002) también concluye que la variabilidad causada por flujos de producción no confiables debe ser reducida a niveles confiables y la variabilidad restante del sistema debe ser administrada usando una adecuada gestión de mano de obra (*Buffers* de Capacidad). Por lo tanto, la utilización de *Buffers* en construcción se hace imprescindible como estrategia complementaria para controlar y reducir la variabilidad de sus procesos de producción. Como ejemplo, hay que tener presente que incluso en el ambiente bajo control de la manufactura existe variabilidad (Hopp y Spearman, 1996).

Ciertamente las investigaciones anteriores han contribuido de un modo importante al avance en la comprensión de los *Buffers* en construcción. Sin embargo, no se han desarrollado metodologías o modelos analíticos de aplicación general y práctica, que permitan determinar con precisión tamaños de Buffer óptimos (excepto el intento realizado por Alarcón y Ashley (1999)). Tampoco se aprecian criterios precisos de administración y localización de *Buffers*, basados en exámenes analíticos profundos de la naturaleza de los procesos de producción en construcción. Solo se pueden observar recomendaciones y estrategias "generales" de dimensionamiento, administración y ubicación de *Buffers* aplicables a un programa de planificación y a las operaciones de un proyecto de construcción.

#### **4. DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA LA ADMINISTRACION DE BUFFERS DE PROGRAMACION EN PROYECTOS REPETITIVOS.**

En orden a responder a las falencias que presentan las técnicas actuales de programación de proyectos y complementar los avances realizados en torno al manejo de la variabilidad en los procesos de producción en construcción, se plantea el desarrollo de una Metodología para la Administración de *Buffers* de Programación aplicable a proyectos repetitivos (González, 2003). Esta metodología persigue fundamentalmente proteger de la variabilidad a los procesos de producción de un proyecto repetitivo, para la cual no han sido ejecutadas todas las acciones posibles. En este sentido, la metodología propuesta se ajusta a la filosofía de utilizar los *Buffers* como estrategia complementaria para controlar la variabilidad en la construcción.

Esta metodología tiene como referencial teórico al modelo de producción para la construcción, *Lean Construction*. Está basado en los principios de *Lean Production*, que es un resumen de los recientes avances en gestión de producción en la manufactura que emulan el sistema de producción Toyota.

Koskela (1993, 2000) pudo abstraer la teoría de producción de *Lean Production* a la construcción conceptualizando once principios básicos, que son la base del modelo de *Lean Construction*. Esta metodología aborda básicamente cuatro de estos principios: el incremento de las actividades que agregan valor (actividades de conversión o transformación), la reducción de las actividades que no agregan valor (actividades de flujo como: transporte, esperas, tiempos muertos, etc., estas actividades incurren en costos en un proyecto pero no agregan valor, se definen también como pérdidas), reducir la variabilidad de los procesos y reducir los tiempos de ciclo.

A continuación se discuten los elementos conceptuales principales que compondrían la Metodología para la Administración de *Buffers* de Programación en Proyectos Repetitivos.

##### **4.1. Aspectos generales de la metodología.**

El propósito de orientar la metodología sobre proyectos de construcción repetitivos estriba fundamentalmente en dos consideraciones: primero, que los proyectos repetitivos son significativos en la industria de la construcción, y segundo, estos proyectos poseen procesos de producción cuyos patrones son cíclicos, facilitando la descripción y modelación de su dinámica.



El desarrollo de la metodología se concentra en dos aspectos:

- i) Modelación analítica de *Buffers* de WIP: se plantea modelar analíticamente *Buffers* de WIP (la justificación para utilizar este tipo de *Buffers* se discute en la sección 4.2). Con esto se persigue sistematizar de un modo práctico el uso de dichos *Buffers* en los programas de construcción, aumentando la capacidad predictiva de estos.
- ii) Administración de *Buffers* de WIP: se persigue establecer estrategias de administración a un nivel operacional de los *Buffers* modelados analíticamente.

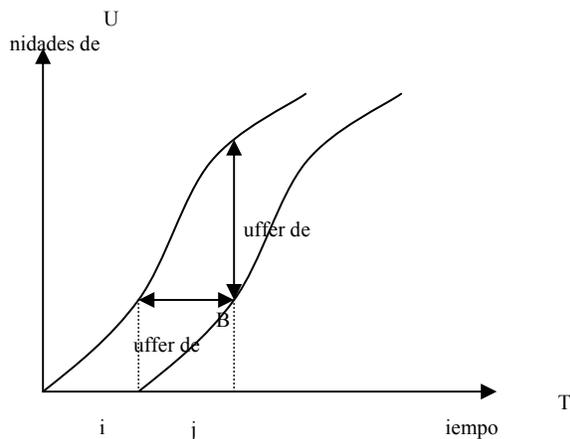
Cada uno de estos aspectos se discute en las siguientes secciones.

#### **4.2. Modelo de buffer de programación preliminar.**

Parte de la metodología se concentrará en el desarrollo de un modelo analítico de dimensionamiento y localización de *Buffers* de WIP, aplicado a proyectos repetitivos. Se han seleccionado los *Buffers* de WIP por las siguientes razones:

- i) La correspondencia de *Buffers* de WIP a Buffer de Tiempo puede ser hallada fácilmente (ver Figura 3). Esto tiene el propósito de utilizar los *Buffers* de WIP en la programación de proyectos repetitivos. En este sentido, son útiles los supuestos de las LOB y GV vistos en la sección 3.1 y 3.4.
- ii) La modelación analítica de *Buffers* de WIP es más favorable en proyectos repetitivos comparados con otros tipos de *Buffers* de más compleja modelación, debido al carácter cíclico de dichos proyectos.
- iii) Un caso documentado por González (2002) consistente en un proyecto de edificación en altura donde se implementó *Buffers* de WIP muestra los impactos del uso de estos *Buffers*. Se utilizaron *Buffers* de tamaño fijo y variable en la etapa de terminaciones, etapa en la complejidad de un proyecto crece. Se usaron paquetes de trabajo independientes en el frente de trabajo, para evitar la posibilidad de congestión de trabajos. Si bien la implementación de estos *Buffers* no tuvo una metodología estructurada que la sustentara, el proyecto redujo su plazo contractual en un 5.5% (de 12 meses a 11 meses y 10 días), aumentó su productividad (en algunos casos se triplicó) y se absorbieron retrasos en el abastecimiento. En este caso fue clave la administración de los *Buffers* al nivel operacional en el proyecto.
- iv) En los datos hallados por el GEPUC (2003) y que se observan en la Figura 2, se aprecia que una CNC relevante es la Falta de cancha. La cancha representa el avance físico que una actividad necesita para perfilar su trabajo de una actividad inmediatamente anterior, en otras palabras, representa a un *Buffer* de WIP. La incidencia de esta CNC en el año 2001 fue de un 10% y en el año 2002 fue de un 12%. Estas cifras revelan el alto impacto de esta CNC e indicaría que existe un inadecuado manejo de este aspecto en los proyectos.
- v) El uso de *Buffers* de WIP es más favorable que otros tipos de *Buffers*, debido fundamentalmente a que estos *Buffers* están bajo la acción y control directo de la administración de un proyecto. Por el contrario, *Buffers* como los Inventarios de Materiales presentan cierta rigidez para su manipulación pues dependen de las políticas financieras, de abastecimiento, de almacenamiento y de utilización de materiales de un proyecto (en algunos casos, los proyectos trabajan con inventarios de materiales ajustados). Otro ejemplo, son los *Buffers* de Capacidad que presentan restricciones para ser manipulados flexiblemente en un proyecto. Estos *Buffers* implican mantener mano de obra variable y esto va en contra de la cultura actual de los proyectos donde se contrata grupos de trabajo de número constante. Esto se dificulta aún más en tareas altamente especializadas. Serpell et al (1995) encontró evidencia que una fuente de pérdidas frecuente en construcción era la sobredotación de personal, lo que generaba pérdidas de tiempo productivo. En contraste, los hallazgos del GEPUC (2003) en torno a las CNC indican que la Falta de mano de obra tiene un alto impacto en la variabilidad de los flujos de producción (según la Figura 2 incidencia es de un 8% en el año 2001 y de 12% en el año 2002). Las diferencias que ambas investigaciones muestran (en un caso se presenta exceso de mano de obra y en otro caso escasez de mano de obra) indicarían la dificultad que presenta la administración de *Buffers* de Capacidad en Construcción.





**Figura 3.** Relación entre Buffer de WIP y Buffer de

Para modelar analíticamente los Buffers propuestos de un modo óptimo se requiere representar y modelar adecuadamente la dinámica de los procesos de producción en construcción (por ejemplo, a través de un enfoque de simulación de procesos). Por lo tanto, se debe conocer la naturaleza de estos procesos en profundidad y las variables que influyen en la variabilidad. A continuación se destacan los aspectos preliminares de mayor interés, para esto se utilizará el enfoque dado por Koskela (2000) para la variabilidad en los procesos de producción:

- a) Variabilidad en los flujos. Según Serpell et al (1995) los flujos son las entradas de un proceso de producción en construcción y pueden separarse en dos tipos, recursos (mano de obra, materiales y equipos de construcción) e información. Estos flujos contemplan a todas las actividades
- b) ya que la necesidad es definida y los elementos llegan al lugar de procesamiento. En este sentido se utilizará la investigación de Ballard (2000) para modelar preliminarmente la variabilidad sobre los flujos de un proceso de producción como se define a continuación:

Confiabilidad de los procesos: Ballard (2000) a través del PAC entrega un buen indicador de la variabilidad y confiabilidad de los flujos de producción en construcción. Con el PAC se puede modelar estocásticamente el efecto de distintos tipos de incertidumbres difíciles de modelar de otro modo. Por ejemplo, se puede modelar la variabilidad en el flujo de recursos y su impacto en el desempeño (productividad) de un proceso. También se puede modelar un flujo de producción más realista considerando el aumento de confiabilidad de los procesos de producción con el uso del Último Planificador. Para esto se utilizarán datos de PAC recopilados de varias investigaciones (Ballard, 2000; Bernardes, 2001; GEPUC, 2003; entre otros). Otro enfoque a considerar para la confiabilidad de los flujos de producción es el entregado por Peña Mora y Li (2001), al desarrollar criterios de traslape temporal entre actividades en proyectos Fast Track.

b) Variabilidad en los procesos. Según Serpell et al (1995) los procesos transforman los flujos en productos terminados y semi-terminados. Se considerará para modelar preliminarmente la variabilidad de los procesos de producción los siguientes aspectos:

Productividad de los procesos: corresponde a la productividad de mano de obra, equipos y maquinaria o una combinación de estos. Esta variable puede modelarse estocásticamente para representar la variabilidad de las duraciones en los procesos de producción.

Restricciones técnicas iniciales: corresponde al Buffer de WIP mínimo necesario que requiere una actividad para perfilar su trabajo sin congestión con otros procesos. Corresponde también a los recursos de mano de obra y/o equipos con que se debe contar. Arditi et al (2001) reconoce estas restricciones como dependencias de espacio-tiempo entre procesos. Yang (2002) también da cuenta de las restricciones de Buffers de WIP mínimo que requiere una actividad para realizar continuamente su trabajo, esto genera tiempos ociosos entre actividades cuando no está disponible.

Curva de aprendizaje: Pena Mora y Li (2001) analizan el efecto del aprendizaje sobre procesos de producción consecutivos para evaluar las estrategias de traslape entre actividades. Dependiendo de las características y dificultades técnicas de las actividades se derivan diversas curvas de aprendizaje, que impactan el desempeño de las actividades e influyen en posibles interferencias. Arditi et al (2001) también considera el efecto de las curvas de aprendizaje entre procesos de producción.



Una vez conocidos los elementos que entrarían en juego en la variabilidad de un proceso de producción en general, se podría analizar el impacto de tamaños variables de *Buffers* de WIP sobre el desempeño de un proyecto. En función de esto se determinaría una expresión o modelo analítico de dimensionamiento del tamaño óptimo de estos *Buffers*.

En cuanto a los indicadores de desempeño contra los cuales se medirá la eficiencia y eficacia del tamaño óptimo de *Buffers* en la modelación son tiempo, costo y otros indicadores relevantes como productividad y pérdidas en un proyecto.

#### **4.3. Administración y Control de Buffers de WIP.**

El propósito de esta parte de la metodología es administrar adecuadamente los *Buffers* de WIP dimensionados según el modelo analítico de *Buffers*, para lograr un adecuado y consistente uso de ellos a un nivel operacional en los proyectos. Los principales aspectos que deberían ser abordados y que están sustentados en lo hallado por González (2002) son:

i) Distribuir adecuadamente los paquetes de trabajo en el frente de trabajo de modo que no se produzca congestión y se ejecuten según la secuencia lógica programada. Se debe tener presente la retroalimentación que se produce desde el nivel operacional donde se pueden producir cambios de secuencia de actividades, de duración u otro cambio que redunde en un re-estimación del tamaño de los *Buffers*.

ii) Determinar claramente las restricciones de recursos y prerequisites de las actividades dispuestas en el frente de trabajo.

iii) Definir claramente las responsabilidades de los subcontratos y obtener compromisos confiables de estos. Esto tiene el propósito de mantener un tamaño adecuado para los *Buffers* dimensionados entre actividades y asegurar la fluidez de los procesos de producción, particularmente en proyectos en que se subcontrata gran parte del trabajo.

iv) Asegurar una fuerte supervisión en el frente de trabajo, de modo que los trabajos se realicen según lo planeado.

v) Un aspecto fundamental es la aplicación de los principios del Último Planificador y la realización de reuniones semanales. Los puntos anteriores son más fácilmente alcanzables si se desarrollan en el entorno del Último Planificador.



## 5. CONCLUSIONES

Se muestra evidencia empírica sobre la variabilidad en los procesos de producción en proyectos de construcción que actualmente no está siendo controlada adecuadamente. Se propone el uso de *Buffers* como estrategia complementaria para reducir el impacto de esta variabilidad sobre el desempeño de los proyectos.

Otro aspecto interesante de esta investigación es que no existen métodos o modelos analíticos que permitan administrar y dimensionar tamaños de *Buffers* óptimos para ser utilizados en los procesos de producción en construcción. Solo se aprecian recomendaciones y planteamientos de tipo general sin demasiada aplicación práctica.

En respuesta a lo anterior, en este trabajo se plantean los aspectos conceptuales para el desarrollo preliminar de una Metodología de Administración de Buffers de Programación para Proyectos Repetitivos. En esta se intentará modelar *Buffers* de WIP para aplicarlos en programas de planificación, y así reducir la variabilidad de los procesos y aumentar la capacidad predictiva de estos programas. También se plantean criterios de administración de dichos *Buffers* dentro de la metodología. Los avances en esta investigación se espera que estén disponibles en futuras publicaciones.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo para realizar esta investigación a la Pontificia Universidad Católica de Chile, al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Proyecto Fondef DOI 1004), a las empresas constructoras miembros del GEPUC, al equipo GEPUC y en particular a los ingenieros Rodrigo Calderón, Sven Diethelm y Oscar Rojo por su contribución en este trabajo.

## 7. REFERENCIAS

- ALARCÓN, L.F. y CALDERON, R. (2003).** *Implementing Lean Production Strategies in Construction Companies.* Proceedings Construction Research Congress, Winds of Change: Integration and Innovation of Construction, ASCE, March 19-21, Honolulu, Hawaii.
- ALARCON, L.F., DIETHELM, S. y ROJO, O. (2002).** *Collaborative Implementation of Lean Planning Systems in Chilean Construction Companies.* Paper presented to tenth Annual Conference of International Group on Lean Construction, Aug. 2002, Gramado, Brazil.
- ALARCÓN, L.F. y ASHLEY, D. B. (1999).** *Playing Games: Evaluating the Impact of Lean Production Strategies on Project Cost and Schedule.* Paper presented to seventh Annual Conference of International Group on Lean Construction, University of Berkeley, California, U.S.A., 26-28 July.
- AL-SUDAIRI, A., DIEKMANN, J. E., SONGER, A. D. y BROWN, H. M. (2000).** *Interplay of Project Complexity and Lean Production Methods.* Paper presented to eighth Annual Conference of International Group on Lean Construction, Brighton, U.K.
- AL-SUDAIRI, A., DIEKMANN, J. E., SONGER, A. D. y BROWN, H. M. (1999).** *Simulation of Construction Processes: Traditional Practices versus Lean Principles.* Paper presented to seventh Annual Conference of International Group on Lean Construction, University of Berkeley, California, U.S.A., 26-28 July.
- ARDITI, D., TOKDEMIR, O., B. y SUH, K. (2001).** *Scheduling System for Repetitive Unit Construction using Line-of-Balance Technology* Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 8, N° 2, pp. 90-103.
- BACCARINI, D. (1996).** *The Concept of Project Complexity-a review.* International Journal of Project Management, Vol. 14, N°4, pp. 201-204.
- BALLARD, G. (2000).** *The Last Planner System of Production Control.* Ph D Dissertation, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The University of Birmingham, Birmingham, U.K.
- BALLARD, G. and HOWELL G. (1998).** *Shielding Production: Essential Step in Production.* Control. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol. 124, N° 1, pp.11-17.
- BALLARD, G. y HOWELL G. (1995).** *Toward Construction JIT.* Alarcón, L. F. (ed), Lean Construction, A.A. Balkema, The Netherlands, 497 pp.
- BALLARD, G. y HOWELL, G. (1994).** *Implementing lean construction: Stabilizing Work Flow.* Alarcón, L. F. (ed), Lean Construction, A.A. Balkema, The Netherlands, 497 pp.



- BALLARD, G. (1993).** *Lean Construction and EPC Performance Improvement*. Alarcón, L. F. (ed), Lean Construction, A.A. Balkema, The Netherlands, 497 pp.
- BARRAZA, G. A., BACK, W. E., y MATA, F. (2000).** *Probabilistic Monitoring of Project Performance Using SS Curves*. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 126, N° 2, pp. 142-148.
- CAMPERO, M. y ALARCON, L. F. (1999).** *Administración de Proyectos Civiles*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, 322 pgs.
- GOLDRATT, E.M., (1997).** *Critical Chain*. North River Press, Great Barrington, Massachusetts, 246 pp.
- GONZALEZ, V. (2003).** *Metodología para la Administración de Contingencias de Programación en Proyectos Repetitivos*. Proyecto de Tesis Doctoral presentado el 30 de Abril de 2003, Departamento de Ingeniería y gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- GONZALEZ, V. (2002).** *Informe de Avance Propuesta de Investigación: Modelo Lean de Planificación de proyectos y Control de Producción*. Documento de investigación del 13 de Diciembre de 2002, Departamento de Ingeniería y gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- CENTRO DE EXCELENCIA EN GESTION DE PRODUCCION, GEPUC, (2003).** *Resultados y Avances: Cambio Organizacional y Cultural*. Plenario GEPUC presentado en la Cámara Chilena de la Construcción el 28 de Marzo de 2003, Departamento de Ingeniería y gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- HALPIN, D.W. y RIGGS, L. (1992).** *Planning and Analysis of Construction Operations*. Wiley, New York.
- HALPIN, D.W. y WOODHEAD, R. W. (1976).** *Design of Construction and Process Operations*. Wiley, New York, 539 p.p.
- HERROELEN, W. y LEUS, R. (2000).** On Merits and Pitfalls of Critical Chain Scheduling. Proceedings of the 1° PMI Research Conference 2000, Paris, France. Newton Square, PA: PMI, 283-295.
- HOPP, W. J. y SPEARMAN, M. L. (1996).** *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*. Irwin/McGraw-Hill, Boston, 668 pgs.
- HORMAN, M. J. (2000).** *Process Dynamics: Buffer Management in Building Project Operations*. Ph D Dissertation, Faculty of Architecture, Building and Planning, The University of Melbourne, Melbourne, Australia.
- HOWELL, G., LAUFER, A. y BALLARD, G. (1993).** *Interaction between subcycles: one key to improved methods*. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 119, N° 2, pp. 323-335.
- HUANG, R. y HALPIN, D.W. (2000).** *Graphically based LP Modelling for Linear Scheduling Analysis: The POLO System*. Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 7, N° 1, pp. 41-51.
- KOSKELA, L. (2000).** *An Exploration Towards a Production Theory and its Application to Construction*. Ph D Dissertation, VTT Building Technology, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- KOSKELA, L. (1993).** *Lean Production in Construction*, . F. (ed), Lean Construction, A.A. Balkema, The Netherlands, 497 pp.
- LU, M. (2002).** Enhancing Project Evaluation and Review Technique Simulation through Artificial Neural Network-based Input Modeling. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 128, N° 5, pp. 438-445.
- LU, M. y ABOURIZK, S. M. (2000).** Simplified CPM/PERT Simulation Model. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 126, N° 3, pp. 219-226.
- PENA MORA, F. y LI, M. (2001).** *Dynamic Planning and Control Methodology for Desing/Build Fast Track Construction Projects*. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 127, N° 1, pp. 1-17.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). (2000).** A Guide to the Project Management Body of Knowledge. Newton Square, P.A., P.M.I., 216 pp.
- SAKAMOTO, M., HORMAN, M. J. y THOMAS, H. R. (2002).** *A Study of the Relationship between Buffers and Performance in Construction*. Paper presented to tenth Annual Conference of International Group on Lean Construction, Gramado, Brazil, August.
- SERPELL, A., VENTURI, A. y CONTRERAS, J. (1995).** *Characterization of Waste in Building Construction Projects*. Alarcón, L. F. (ed), Lean Construction, A.A. Balkema, The Netherlands, 497 pp.
- SHI, J. J., CHEUNG, S. O. y ARDITI, D. (2001).** Construction Delay Computation Method. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 127, N° 1, pp. 60-65.
- THOMAS, H. R., HORMAN, M. J., LEMES DE SOUZA, U. E., y ZAVRSKI, I. (2002).** *Reducing Variability to Improve Performance as a Lean Construction Principle*. J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 128, N° 2, pp. 144-154.
- THOMAS, H. R. (2000).** Principles of Construction Labor Productivity Measurement and Processing. Rep. N° 2K14, Pennsylvania Transportation Institute, University Park, Pa.



- TOMMELEIN, I. D. y YI LI, A. E. (1999).** *Just in Time Concrete Delivery: Mapping Alternatives for Vertical Supply Chain Integration.* Paper presented to seventh Annual Conference of International Group on Lean Construction, University of Berkeley, California, U.S.A., 26-28 July.
- TOMMELEIN, I. D. y WEISSENBERGER, M.(1999).** *More Just in Time: Location of Buffers in Structural Steel Supply and Construction Process.* Paper presented to seventh Annual Conference of International Group on Lean Construction, University of Berkeley, California, U.S.A., 26-28 July.
- TOMMELEIN, I. D., RILEY, D. y HOWELL, G. (1998).** *Parade Game: Impact of Work Flow Variability on Succeeding Trade Performance.* Paper presented to sixth Annual Conference of International Group on Lean Construction, Guaruja, Brazil, 13 – 15 August.
- TOMMELEIN, I. D. (1998).** *Pull-Driven Scheduling for Pipe-Spool Installation: Simulation of Lean Construction Technique.* J. Const. Engr. Mgmt., ASCE, Vol 124, N° 4, pp. 279-288.
- WALTON, M. (1985).** *Cómo Administrar con el Método Deming.* Editorial Norma, Colombia, 291 pgs.
- WILLIAMS, T. M. (1999).** *The Need for New Paradigms for Complex Projects.* International Journal of Project Management, Vol. 17, N°5, pp. 269-273.
- YANG, I. (2002).** *Stochastic Analysis on Project Duration Under The Requirement of Continuous Resource Utilization.* Paper presented to tenth Annual Conference of International Group on Lean Construction, Gramado, Brazil, August.



---

**Vicente González**

Ingeniero Constructor

Estudiante de Doctorado

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción

Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Profesor, Escuela de Ingeniería en Construcción

Universidad de Valparaíso

Valparaíso, Chile.

Constructor Engineer

Ph.D. Student

Department of Construction Engineering and Management

Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Lecturer, School of Engineering in Construction

Universidad de Valparaíso

Valparaíso, Chile.

vagonzag@puc.cl

---

**Luis F. Alarcón**

Profesor Titular,

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,

Director, Programa de Excelencia en Gestión de Producción

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Professor,

Department of Construction Engineering and Management

Pontificia Universidad Católica de Chile

Director, Production Management Program

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

lalarcon@ing.puc.cl

