Ksiazenicki, V., Formoso, C., Barth, K., (2024). Propuesta de un modelo de planificación y control para proyectos de infraestructura, lineales y subterráneos. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción* (IX ELAGEC2024).

PROPUESTA DE UN MODELO DE PLANIFICACIÓN Y CONTROL PARA PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA, LINEALES Y SUBTERRANEOS

Verónica Ksiazenicki [1] – vksiazenicki@stilerpm.com.uy

Carlos T. Formoso [2] – formoso@ufrgs.br

Karina B. Barth [3] – kbertotto@gmail.com

[1] *Stiler S.A., Montevideo, Uruguay.*

[2] *Núcleo Orientado para a Inovação da Construção (NORIE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil, orcid.org/0000-0002-4772-3746.*

[3] *Núcleo Orientado para a Inovação da Construção (NORIE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil, orcid.org/0000-0001-9612-6246.*

RESUMEN

Last Planner System (LPS) y Location Based Planning and Control (LBPC) se han utilizado con éxito en muchos proyectos. Estudios previos han discutido el papel por separado de cada uno de ellos, pero el uso integrado de los dos modelos no es explicado a fondo en la literatura. Además, la mayoría de las implementaciones de esos modelos reportadas en la literatura refieren a proyectos de arquitectura. Pocos casos están relacionados con proyectos de infraestructura, los cuales tienen diferentes tipos de complejidad en relación con los proyectos de arquitectura. El objetivo del trabajo es desarrollar un modelo de planificación y control para proyectos de infraestructura lineal que combina elementos de LPS y LBPC. Este artículo presenta una versión preliminar del mismo y su implementación en tres estudios de casos realizados en una empresa constructora de Uruguay. El desarrollo del modelo considera características específicas de complejidad en proyectos de infraestructura lineal: alta incertidumbre y procesos lineales independientes distribuidos en grandes áreas. Principales contribuciones de este modelo: una herramienta de planificación y control basada en flujos, la definición de criterios para diseñar sistemas basados en localización, el énfasis en el control del trabajo en progreso y el uso de gestión visual.

PALABRAS CLAVE

Planificación y control de la producción; Last Planner; control basado en localización; gestión visual; trabajo en progreso.

INTRODUCCIÓN

Se han logrado importantes avances en la planificación y el control de la producción en la construcción mediante la adaptación e implementación de conceptos y principios básicos de la filosofía de producción Lean (Ballard & Tommelein, 2020; Brady et al., 2018; Seppanen et al., 2015). Los cambios en la planificación y el control de la producción han jugado un papel clave en la génesis del movimiento *Lean Construction*, debido al fuerte impacto del *Last Planner System*® (LPS), desarrollado por Ballard y Howell (1998). Además de LPS, otro desarrollo importante es la adopción de sistemas de planificación y control basados en la localización (LBPC), que pueden considerarse como un conjunto de técnicas de planificación y control que hace una conexión explícita de las actividades de construcción con los lugares de trabajo, como la línea de balance (Olivieri et al., 2019), la gestión basada en localización (Seppanen et al., 2010) y la planificación takt-time (Frandson et al., 2013). LBPC busca alcanzar simultáneamente un flujo continuo de productos y un uso ininterrumpido de mano de obra (Olivieri et al, 2019). Mediante el uso de herramientas visuales, se puede comunicar fácilmente planes y indicadores, y los problemas relacionados con la cantidad de trabajo en progreso (WIP), el tamaño del lote y la falta de sincronización entre los equipos se hacen explícitos (Nut et al., 2020). LPS y LBPC se han utilizado con éxito en muchos proyectos en varios países del mundo, ya sea por separado o juntos, y a veces combinados con el Método de Ruta Crítica (CPM) (Olivieri et al., 2019).

Existen claras complementariedades entre LPS y LBPC. Por un lado, LPS es un enfoque de planificación y control que se centra principalmente en el nivel de planificación a medio y corto plazo, que es capaz de hacer frente a la complejidad de los proyectos de construcción (Ballard 2009). Esta complejidad depende de dos factores: (i) la complejidad estructural, que depende del número de elementos y (ii) del número de interdependencias, y de la incertidumbre de medios y métodos (Williams (1999). Por otro lado, LBPC se utiliza principalmente para la planificación a largo plazo o la programación de fases y se centra principalmente en la perspectiva técnica de la planificación y el control (Seppanen et al., 2015).

Se pueden señalar dos lagunas principales de investigación en la literatura. En primer lugar, a pesar del creciente número de empresas que han adoptado conjuntamente LPS y LBPC (Olivieri et al., 2019; Seppanen et al., 2010; Kalsaas et al., 2014; Seppanen et al., 2015; Nutt et al., 2020), la complementariedad entre LPS y LBPC aún debe explicarse más a fondo mediante el uso de algunos conceptos básicos de *Lean Production*. Existe la necesidad de investigar la transición de la planificación del largo plazo basada en localización, para el sistema *Last Planner*, que demanda flexibilidad en la definición de paquetes de trabajo.

En segundo lugar, la mayoría de las implementaciones de LPS y LBPC reportadas en la literatura se han relacionado con proyectos de construcción residencial, industrial y comercial. Solo unos pocos estudios han reportado la implementación de esos enfoques de planificación y control en proyectos de infraestructura (Olivieri et al., 2019; Kassab et al., 2020, Formoso et al., 2022).

El objetivo del trabajo es desarrollar un modelo de planificación y control para proyectos de infraestructura lineal que combina elementos de LPS y LBPC. Desarrollo del modelo

considera la necesidad de producir un proyecto de sistema de producción (PSP), que es una planificación hecha antes del inicio de la obra, la cual integra diferentes categorías de decisión – normalmente se produce una primera versión de un plan basado en localización (Barth et al., 2020).

Este artículo presenta una versión preliminar de un modelo de planificación y control para proyectos de infraestructura lineal que combina elementos de LPS y LBPC. Ese modelo ha sido desarrollado en una empresa constructora en Uruguay, que ha llevado a cabo varios proyectos de infraestructura lineal. Los resultados presentados en este artículo están basados en estudios realizados para tres proyectos diferentes, una obra de saneamiento, llamado Redes Manga, un segundo estudio para una obra tendido de cable de fibra óptica (FTTH) y por último un estudio de una obra de saneamiento (Mataperros, de menor porte que la primera). A partir del caso de Red Manga se obtuvieron algunas ideas iniciales para el desarrollo del modelo, que luego fueron utilizadas en la obra de fibra óptica y Mataperros.

MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación fue *Design Science Research* (DSR). Se trata de una forma de producir conocimiento científico que puede utilizarse para resolver clases de problemas mediante el desarrollo de conceptos de solución, denominados artefactos (Holmström et al., 2009). El artefacto ideado en este trabajo de investigación es un modelo de planificación y control que combina elementos LPS y LBPC para gestionar obras lineales de infraestructura.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y DE LOS PROYECTOS

Stiler es una empresa Uruguaya, con más de 60 años de trayectoria en el mercado uruguayo. Luego de algunos años de implementación de LPS, en 2021, la compañía decidió extender el programa de implementación Lean, incluyendo el diseño del sistema de producción (PSP) y combinando LPS con LBPC. Se está cursando el cuarto año de implementación y los proyectos que se presentan pertenecen al primero, segundo y tercer año de trabajo.

El primer estudio de caso, en el proyecto Red Manga, que tenía tres tipos principales de trabajos de construcción: (i) 45 km de sistema de alcantarillado (incluidas tuberías subterráneas, conexión a casas existentes y cajas de inspección), (ii) 7 km de drenaje pluvial, y (iii) estaciones de bombeo y obras viales. Este proyecto se realizó en una gran área urbana (40 hectáreas) en las afueras de la ciudad de Montevideo, Uruguay.

El segundo proyecto que presenta este artículo es el caso de instalación de fibra óptica (FTTH), que consiste en la instalación de 160km de cable de fibra óptica, 50km de tendido subterráneo de caños, 40.000 columnas, entre otras actividades. El alcance total del proyecto es gradualmente informado por el cliente, i.e. hay una lógica de proveedor de servicio (*service provider logic*).

El tercer proyecto es la obra Mataperros, consiste en un sistema de drenaje de 600 metros lineales, conformado por canales de hormigón prefabricados. Hay también otras actividades secundarias, como reparación de pavimentos, recolocación de servicios subterráneos existentes, etc.

Estos proyectos han sido elegidos por la empresa para realizar estudios piloto de implementación de los modelos LPS y LBPC. Del punto de vista de la investigación, los mismos presentan el ventaja de tener diferencias en la naturaleza de la complejidad.

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Redes Manga

Los resultados iniciales de la implementación del modelo en este proyecto han sido reportados en la conferencia IGLC 2022 (Formoso et al., 2022). En este artículo son presentados avances en el desarrollo y perfeccionamiento del modelo. Este estudio se dividió en tres fases principales: (i) evaluación de la situación existente; (ii) refinamiento del sistema e implementación de mejoras; y (iii) evaluación de los resultados de la aplicación.

Fase 1: El enfoque de la Fase 1 fue evaluar el modelo de planificación y control existente adoptado en la empresa, particularmente los aspectos organizativos, y analizar los datos de control de la producción existentes. Se llevaron a cabo entrevistas y reuniones con altos directivos, ingenieros, supervisores de obra y subcontratistas. Se visitó el proyecto Red Manga, se analizaron los planos y bases de datos existentes. Los autores también realizaron observación directa en obras de construcción y entrevistaron a gerentes de proyectos y producción.

Fase 2: las principales actividades desarrolladas en la Fase 2 fueron: (i) desarrollo de un curso de capacitación de 40 horas sobre Lean Construction para los equipos del proyecto piloto; (ii) refinamiento del modelo de planificación y control, combinando LPS y LBPC, y implementación de algunas mejoras en el proyecto Red Manga;

Fase 3: consistió en: (i) producción de manuales que contienen el conjunto de prácticas para ser adoptadas en la empresa; (ii) evaluación de resultados de la implementación parcial del modelo de planificación y control propuesto.

A partir de la reflexión sobre los resultados alcanzados en el proyecto Red Manga, se produjeron algunas ideas iniciales hacia el desarrollo del modelo de planificación y control basado en flujos, desarrollado para proyectos de infraestructura lineal. La Tabla 1 presenta las fuentes de evidencia utilizadas en el estudio 1 y también acciones del programa de implementación Lean llevado a cabo por la compañía en 2021.

Tabla 1. Etapas del estudio Red Manga

Fase/Año	Alcance del análisis y participantes	Mecanismos de evaluación/Fuentes de pruebas
Fase 1 Evaluación Marzo 2021	Toda la empresa	• Visita a proyecto: evaluación de los sistemas actuales de planificación y control mediante un protocolo de evaluación • Observación participante en 1 sesión semanal de planificación • 1 entrevista con el equipo del proyecto: incluyendo altos directivos e ingenieros • 1 entrevista con un miembro de la junta directiva • 1 entrevista con el gerente de operaciones • Análisis del sistema de planificación y control de la empresa actual
Fase 2: Implementación Abril - Octubre 2021	Equipo gerencial de Redes Manga	• Observación participante en 1 reunión de planificación
Fase 3 Resultados Noviembre 2021		• Observación participante en 2 sesiones semanales de planificación (1,5h cada una) • 2 visitas in situ • 8 talleres Lean (5h) con la participación de equipos de proyectos piloto

Fibra Óptica (FTTH)

El segundo estudio de caso, en el proyecto FTTH, ha sido realizado en el año 2022, cuando se decidió ampliar el programa de capacitación Lean en la empresa, así como también implementar un modelo de control de producción basado en flujo en proyectos lineales. El principal resultado del estudio de caso ha sido la consolidación de la versión inicial del modelo de PCP a ser propuesto.

Esta implementación se llevó a cabo en tres fases: (i) comprensión de las características del proyecto y definición inicial del modelo; (ii) implementación de las herramientas de PCP definidas en fase inicial y desarrollo de sistema de localización para control de WIP; y (iii) evaluación de los resultados de la aplicación.

Fase 1: el enfoque de la Fase 1 fue comprender las características del proyecto FTTH. Esto fue mediante una entrevista con el gerente de proyecto y el jefe de obra, seguido de una visita a la obra para comprender mejor las características. Se definió que elementos del sistema desarrollado para Redes Manga podía ser adaptado en este proyecto y se definieron los controles principales: LPS basado en flujo y control de desvío de ritmo para tareas principales.

Fase 2: las principales actividades desarrolladas en la Fase 2 fueron: (i) desarrollo de una herramienta para el para control de LPS basado en flujo, imitando el desarrollado en redes manga; (ii) desarrollo de planillas de control de desvío de ritmo para obras de infraestructura; (iii) implementación de LPS y control de desvío de ritmo, recibiendo apoyo y seguimiento por parte del departamento de control de gestión de la empresa; y (iv) desarrollo de sistema de localización y matriz para control de trabajo en progreso.

Esta herramienta fue desarrollada desde el punto de vista teórico en redes manga y utilizada en FTTH, siendo clave para el control de la producción en obra.

Fase 3: consistió en: (i) segunda versión de manuales que contienen el conjunto de prácticas a ser ampliamente adoptadas en la empresa para PCP; (ii) consolidación del modelo de PCP para obras lineales e infraestructura; y (iii) evaluación del sistema de localización y control de WIP desarrollado en Redes Manga. En FTTH fue la primera vez que se utilizó esto sistema de localización, que es una herramienta clave y fundamental para el desarrollo del modelo.

La Tabla 2 presenta están presentadas las fuentes de evidencia utilizadas en el estudio 2.

Tabla 2. Etapas del estudio FTTH

Fase/Año	Participantes	Fuentes de evidencia
Fase 1 Evaluación y definición de sistema de PCP Marzo 2022	Equipo de dirección de control de obra, control de gestión y equipo de consultores	• Reunión con Gerente de Proyecto y Jefe de Obra para entender aspectos del proyecto y definir características iniciales de la implementación • Visita a obra para comprender secuencias a actividades principales • Definición de herramientas para implementar PCP • Apoyo y seguimiento por parte del departamento de control de gestión de la empresa para la implementación del sistema de PCP
Fase 2: Implementación Abril - Octubre 2022	Equipo de dirección de control de obra, control de gestión y equipo de consultores	• Desarrollo de planillas digitales para seguimiento de LPS, utilizando el LPS basado en flujo. Implementación de control de PCP (LPS y control desvío de ritmo) • Desarrollo de sistema de localización para control de WIP • Seguimiento de oficina de control de gestión en reuniones de planificación
Fase 3 Resultados Noviembre 2022		• Consolidación de sistema de control de producción y planificación para proyectos lineales y de infraestructura.

Mataperros

El desarrollo del tercer caso de estudio, el proyecto Mataperros, ha sido realizado en el año 2023. Empezó en la fase de planificación pre-obra, desarrollando para este proyecto un Sistema de Proyecto de Producción (PSP). Esto estudio tiene dos fases: (i) Comprensión de características de proyecto y desarrollo del PSP; (ii) Evaluación de análisis y cierre de PSP para inicio de obra. En la Tabla 3 están presentadas las fuentes de evidencia utilizadas en el estudio 3.

Fase 1: el enfoque de la Fase 1 fue comprender las características del proyecto. Esto fue mediante una entrevista con el Jefe de obra seguido de algunas reuniones para seguimiento de desarrollo y apoyo en el mismo. Se identificó que esta obra tiene una actividad principal (montaje de los canales de drenaje), siendo esta la tarea que define ritmos y necesidades principales. Se determinaron principales características del PSP, definiendo lotes de producción en base a la densidad de los trabajos del mismo.

Fase 2: de esta fase se obtuvo un PSP completo para comenzar la obra donde se tenía especial énfasis en el análisis de la actividad principal: ensamble de canales para desagüe. En esta etapa se definió que los prefabricados se harían en obra por lo tanto fue una decisión reflejada en el PSP, y se evaluaron cantidad de moldes a fabricar en función del balance que se debía tener entre producción de prefabricado y colocación, buscando no tener exceso de stock ni falta de ritmo para montar.

Tabla 3. Etapas del estudio Mataperros

Fase/Año	Participantes	Fuentes de evidencia
Fase 1 Evaluación proyecto y definición de características principales de PSP Febrero- Maro 2023	Equipo de dirección de control de obra, control de gestión y equipo de consultores	• Reunión con Jefe de Obra para entender aspectos del proyecto y plantear pasos para elaborar PSP • Apoyo y seguimiento por parte del departamento de control de gestión de la empresa para desarrollo primario de PSP
Fase 2: Implementación Abril - Mayo 2023	Equipo de dirección de control de obra, control de gestión y equipo de consultores	• Análisis de las decisiones interconectadas tomadas en el PSP • Determinación de ritmo de actividades principales • Plan maestro de obra basado en localización

Con base en el análisis cruzado de los tres estudios empíricos, se está desarrollando un modelo de planificación y control para obras de infraestructura lineales y también haciendo una reflexión sobre las contribuciones teóricas de la investigación.

RESULTADOS

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en los tres proyectos a partir de implementar los elementos básicos del modelo de planificación y control de la producción que se está desarrollando. Como los tres proyectos fueron ejecutados en años diferentes, de 2021 a 2023, este desfasaje permitió avanzar en el desarrollo del modelo en la medida que se iba realizando la implementación en las obras. A partir de este largo proceso de aprendizaje se avanzó en el desarrollo de modelo de PCP para obras de infraestructura lineal. A seguir, presenta una breve descripción de las características de los proyectos de infraestructura lineal del punto de vista de la complejidad, para luego presentar los resultados obtenidos en cada una de las obras.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA LINEAL

La definición del modelo de planificación y control para proyectos de infraestructura lineal se basó fuertemente en el tipo de complejidad del proyecto enfrentado en esos proyectos, tanto en términos de complejidad estructural como de incertidumbre. Estos son:

i. Los proyectos se extienden a grandes zonas urbanas o rurales

ii. Hay cierto grado de repetición, ya que los procesos son lineales y tienen secuencias similares de operaciones, pero los parámetros suelen variar (profundidad de tubería, diámetro, etc.)
iii. Existe un alto grado de incertidumbre, principalmente relacionado con la falta de conocimiento sobre las condiciones subterráneas, así como las inclemencias del tiempo.
iv. Alta dependencia de permisos y habilitaciones de trabajo del cliente u organismos.
v. El número de procesos diferentes es bajo y el trabajo de diferentes cuadrillas puede desacoplarse, siempre que no se compartan recursos entre ellas. Aunque la incertidumbre es alta, la propagación de la variabilidad puede limitarse dividiendo el trabajo de las cuadrillas en diferentes zonas y teniendo recursos dedicados para cada una; y
vi. La reducción del WIP es obligatoria para algunas tareas (sistemas de alcantarillado, drenaje de aguas pluviales) ya que los agujeros en el suelo no pueden dejarse abiertos durante mucho tiempo debido a problemas de seguridad y posibilidad de lluvia.

Todas estas características se encuentran en diferente medida en los tres proyectos de este artículo. En el proyecto de FTTH, hubo una incertidumbre adicional relacionada con el alcance del trabajo definido en el contrato. En este tipo de contratos, la empresa desempeña el papel de proveedor de servicios durante varios meses: los pedidos son realizados por el cliente con poca antelación (entre dos y cuatro semanas) y la empresa necesita planificar las tareas en un horizonte relativamente corto, exigiendo flexibilidad para gestionar la capacidad a medida que llegan nuevos pedidos.

RESULTADOS EN OBRA REDES MANGA

Descripción de sistema de planificación existente

Antes del comienzo del Programa de Implementación Lean, el proyecto Red Manga había adoptado una versión de LPS ideada para proyectos de infraestructura lineal. El elemento principal de este sistema de planificación fue una reunión semanal, en la que se produjeron tanto un plan a corto plazo de una semana como un plan de mediano plazo de tres semanas de anticipación. Esos planes se prepararon en tableros móviles en los que se utilizaron notas adhesivas para planificar paquetes de trabajo, como se muestra en la Figura 1. Sólo los procesos más importantes fueron incluidos en el plan. Cada línea representa una cuadrilla, y cada columna define un día laborable. Este dispositivo visual permite claramente a los participantes de la reunión de planificación ver los planes como un conjunto de flujos de trabajo paralelos, de modo que se hace un esfuerzo para mantener a los equipos trabajando ininterrumpidamente en los mismos procesos y ubicaciones. Este enfoque basado en el flujo para la planificación y el control de la producción contrasta con el enfoque tradicional basado en actividades adoptado en LPS. Esta reunión es altamente colaborativa, y contó con la participación del gerente de obra, el ingeniero de planificación, el capataz y los supervisores de los equipos principales.

El análisis de restricciones se limitó al horizonte de un mes de planificación anticipada. Se utilizaron tarjetas de colores (naranja o azul), es decir, kanbans, para representar restricciones de diferente naturaleza en el plan visual, lo que permite una rápida identificación de la naturaleza de las restricciones existentes. Las restricciones de largo plazo se gestionaron por separado, principalmente sobre la base del plan a largo plazo.

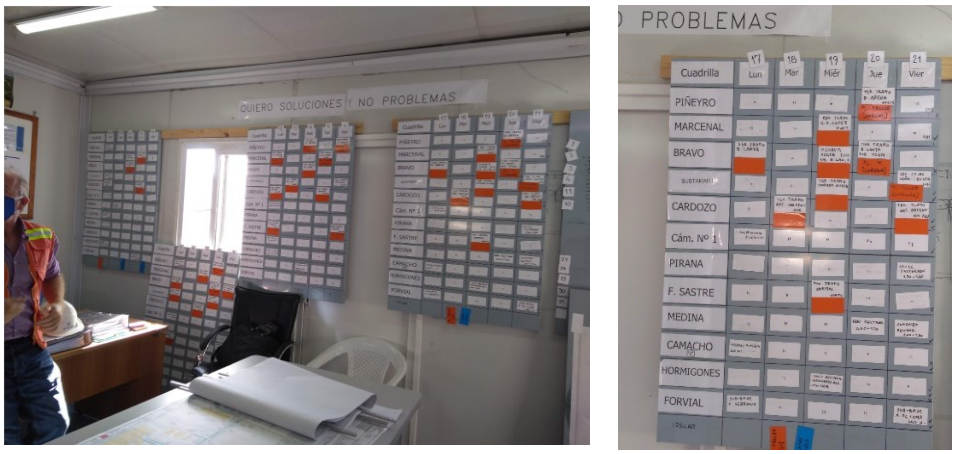

Figura 1. Tableros móviles para planificación intermedia y semanal en Red Manga.

Oportunidades de mejora para Redes Manga

En la Fase 2 se identificaron varias oportunidades de mejora, principalmente relacionadas con el uso explícito de LBPC y su integración a LPS, en el sistema de planificación existente. Estos fueron:

i. Establecer dos niveles para el análisis y la eliminación de restricciones. El existente se mantuvo para las restricciones que necesitaban menos de un mes para su eliminación, y se propuso un instrumento de control de restricciones para los artículos de largo plazo;
ii. Introducir herramientas visuales para controlar el ritmo. Este es un control clave relacionado con la planificación del *takt time* (Frandson et al., 2013), que permite evaluar el progreso del proyecto por el ritmo de cada proceso lineal;
iii. Concebir un sistema basado en la ubicación que tuviera cuatro niveles jerárquicos en lugar de sólo dos. Los criterios para definir las zonas de trabajo fueron: (a) Nivel 1: etapas del proyecto definidas por el contrato, es decir, grandes lotes que representan entregables demandados por el cliente; (b) Nivel 2: lotes relacionados con la existencia de características topográficas de la zona (c) Nivel 3: lotes orientados al flujo, es decir, definir una zona que debe entregarse conjuntamente por motivos de eficiencia; y (d) Nivel 4: lotes mínimos de planes a corto plazo. En la tabla 4 se resume la descripción de cada tipo de zona de trabajo;

Tabla 4. Estructura jerárquica del sistema basado en la ubicación

Nivel	Unidad Base	Importe	Tipos	Variables consideradas
Nivel 1	ONU-L1	Total de 5 UB-L1	Contratar pequeños proyectos	Condiciones de contratación
Nivel 2	UB-L2	Total de 12 UB-L2	Mapeo físico	Topografía, cuencas
Nivel 3	UB-L3	Total de 38 UB-L3	Lote completado	Flujo de trabajo, secciones
Nivel 4	Sección	40-60 tramos por UB-L3. Total 1150 secciones	Lote de trabajo	Sección de tubería

iv. Para cada nivel jerárquico, se creó una matriz para controlar el estado de producción, como la propuesta por Sacks et al. (2009);
v. Crear control de *check-in* y *check-out* en cada zona de trabajo, basado en el lote mínimo definido en el plan a corto plazo;
vi. Sobre la base del control del WIP, se pueden producir dos curvas de progreso del proyecto, una que considera todas las tareas completadas y otra que solo considera los lotes completados.

La Figura 2 presenta zonas de trabajo para los cuatro niveles jerárquicos antes mencionados. Estas zonas fueron determinadas según los criterios antes descriptos.

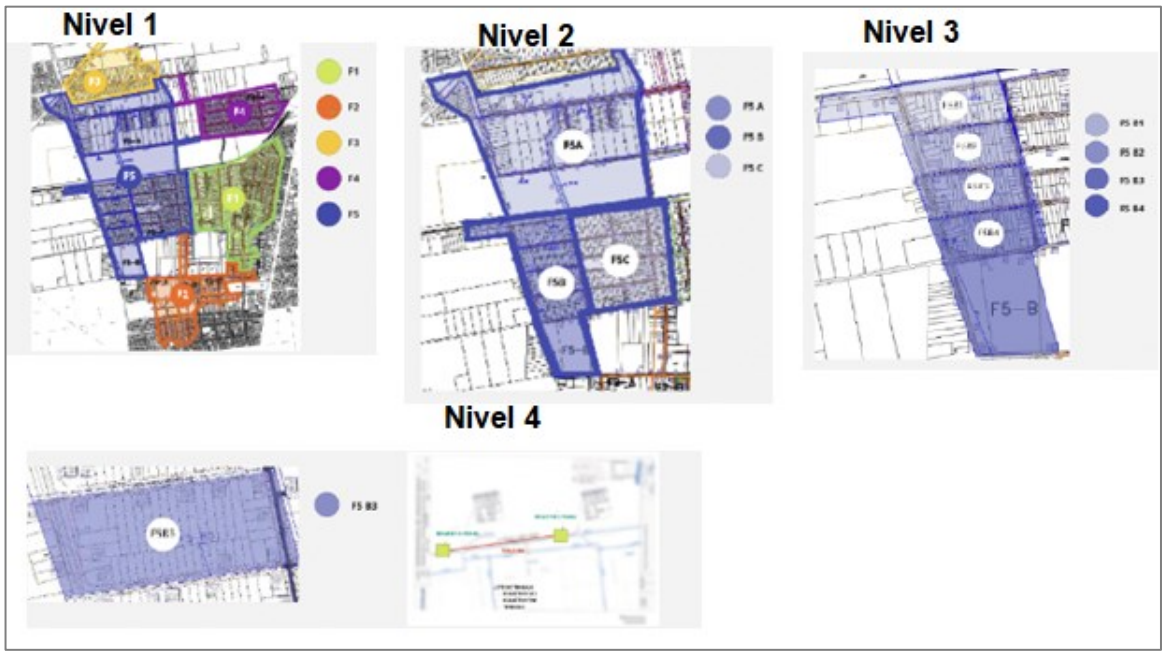

Figura 2. Estructura jerárquica de los niveles de control basados en la ubicación.

Algunas de las oportunidades de mejora identificadas en el estudio de caso han dado lugar a cambios en el sistema de planificación y control del proyecto (por ejemplo, gráfico para el control del ritmo, acumulación de tareas preparadas), mientras que otras solo se implementarán en proyectos futuros (por ejemplo, la matriz de estado de producción, el control de *check-in* y *check-out*, el análisis sistemático de restricciones a largo plazo). La figura 3 una métrica propuesta por Barth (2023) basada en la ubicación que se ha desarrollado para proyectos futuros, denominada progreso del proyecto considerando solo lotes completos.

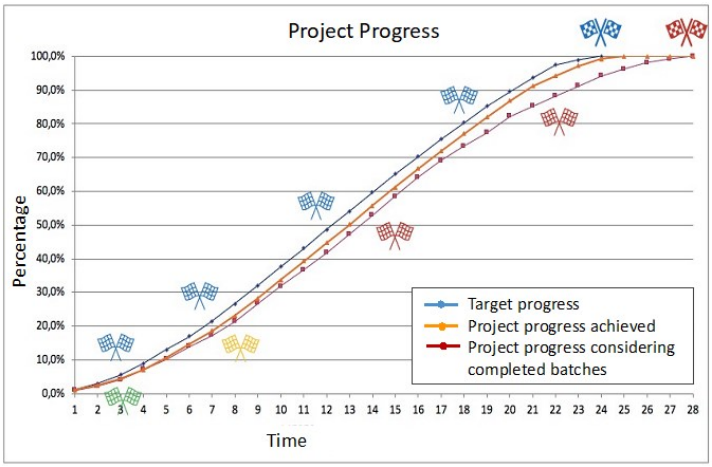

Figura 3. Ejemplo de gráfico para el control del progreso del proyecto para lotes completos (Barth, 2023).

RESULTADOS EN OBRA FTTH

Este proyecto tiene las características de complejidad antes descripta, con la particularidad que las principales actividades (colocación de caño tri-tubo (TT), montaje de columnas y tendido de cable) tenían una interdependencia moderada entre ellas. Para poder ejecutar la actividad de tendido de cable, las otras dos tareas debían estar ejecutadas, pero hay cierta independencia pues normalmente se tenía un lapso de tiempo amplio entre una tarea y la otra.

En base a las características del proyecto se implementó el modelo de LPS basado en flujo desarrollado por la obra de Redes Manga, aunque se hicieron algunos ajustes y consideraciones:

- Se utilizó una planilla en MS Excel desarrollada por la empresa donde podía verse el plan intermedio por cuadrilla para un periodo de 4 semanas (figura 4) obteniendo un plan semanal a partir de las tareas comprometidas (figura 5). Se monitoreó evolución de PPC total y por cuadrilla.

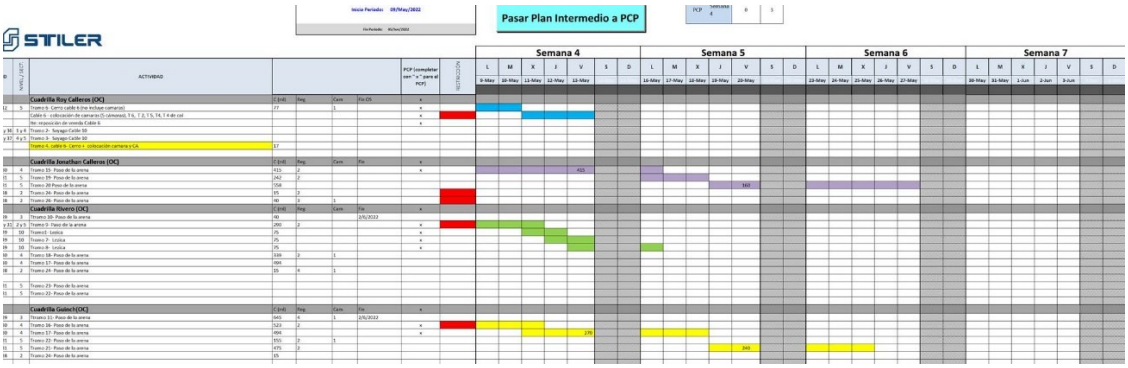

Figura 4. Plan intermedio de 4 semanas (MS Excel).

- Por el tipo de contrato e incertidumbre en cuanto a las prioridades altamente variables del cliente, la planificación intermedia muchas veces no alcanzaba las 4 semanas, pero si se listaban en la planilla todas las tareas solicitadas por el cliente (sin fecha de

ejecución) para poder ordenarlas e identificar restricciones a gestionar para su ejecución.

Figura 5. Plan semanal (MS Excel).

Se tuvo especial énfasis en el control de ritmo de las actividades principales. Se pueden ver en la figura 6

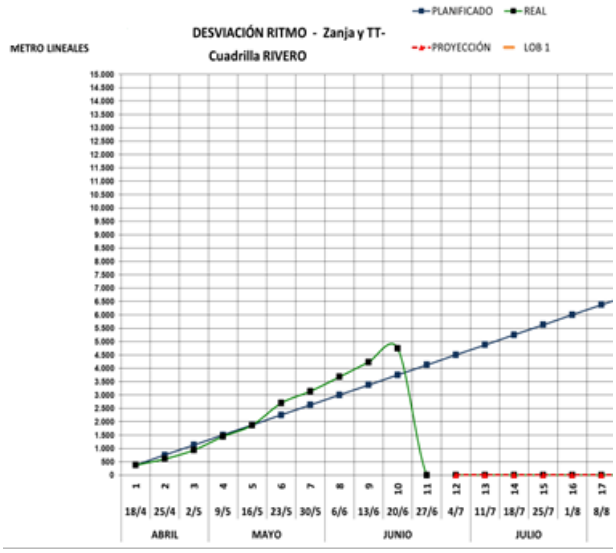

Figura 6. Control de desvío de ritmo de actividades principales.

A partir del desarrollo teórico de un sistema basado en la ubicación con distintos niveles jerárquicos de redes manga, se desarrolló e implementó un sistema de localización para control de trabajo en progreso y mejora de la planificación. Se definieron tres niveles jerárquicos, siendo el primer nivel el lote de contrato, definido por el cliente llamado “cable”. Es la zona urbana donde se debe trabajar y se puede ver representado en la figura 7. El segundo nivel jerárquico es una división de la primera zona, también definido por el cliente, siendo el lote mínimo a cablear y entregar al cliente. Por último, tenemos el tercer nivel, donde se definen los tramos de trabajo (aproximadamente 500m) que son para gestionar permisos con los entes públicos. El control del trabajo en progreso es mandatorio para este proyecto pues para poder cablear una zona, siendo el tendido de cable la actividad principal de este proyecto, se deben tener todos los tramos terminados.

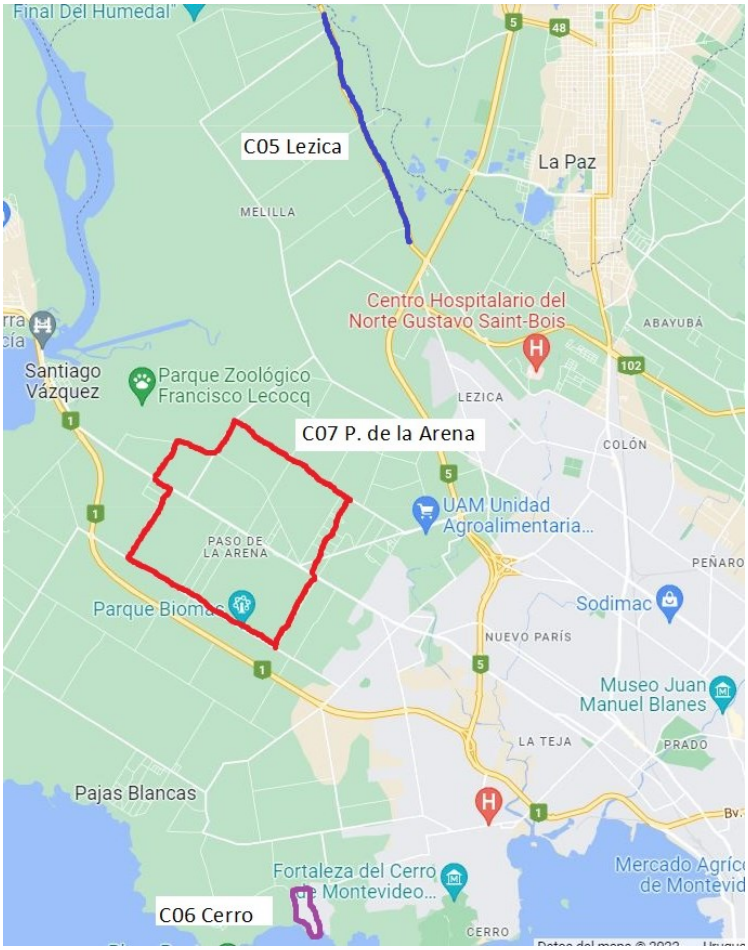

Figura 7. 1°nivel jerárquico.

La figura 8 presenta un ejemplo de matriz para control del status de la producción, donde se monitorea el trabajo en progreso, considerando los niveles jerárquicos de localización 2 y 3.

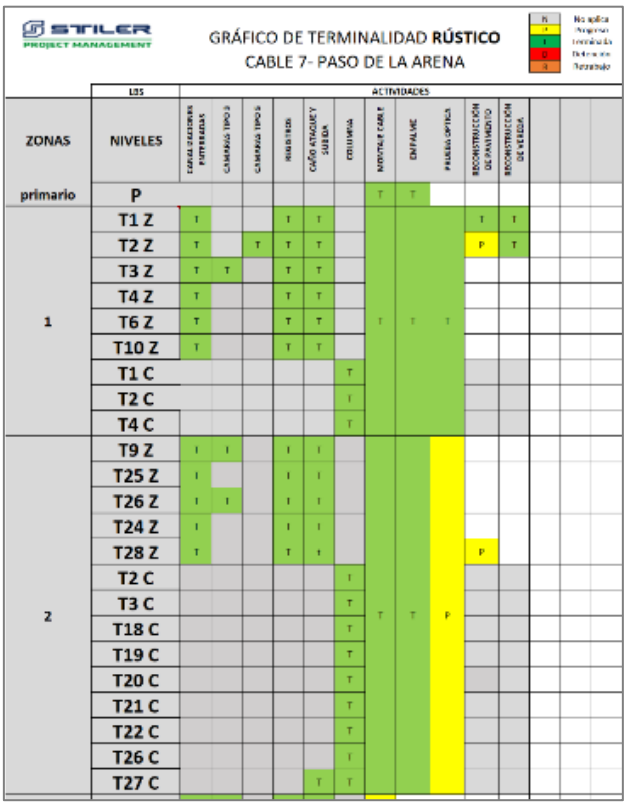

Figura 8. Matriz de status con el 2° y 3° nivel jerárquico.

RESULTADOS EN OBRA MATAPERROS

Este proyecto también tiene las características de complejidad antes descriptas, con la particularidad que la actividad principal, montaje de canales de hormigón no tiene independencia de cuadrillas como tenía Manga. Es una obra más pequeña, donde el sentido en que se debe ejecutar la tarea de saneamiento no se puede alterar. Para poder avanzar con el desarrollo del proyecto los lotes deben ir quedando terminados, por ende, se determinó que el control de WIP no tiene sentido pues no hay forma de dejar las actividades sin terminar y el sentido de ejecución es único.

El trabajo desarrollado para esta etapa fue con foco de obtener en la fase previa al inicio de obra un PSP completo y algunos de los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Se definió que los canales serían prefabricados (el proyecto original marcaba in situ), reduciendo de este modo la duración de la obra y el gasto con recursos, principalmente mano de obra. Se trabajó en la ingeniería tanto de la pieza terminada como del molde para su elaboración. En la figura 9 podemos ver el diseño del molde y su despiece.

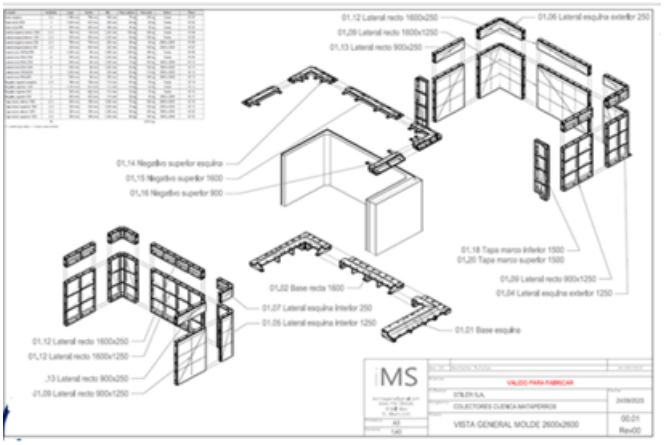

Figura 9. Ingeniería especifica para diseño de moles.

- Se definieron zonas de trabajos basándose en las características de cada área (zona parque, zona plaza y zona urbana). Cada zona tiene ritmos de montajes diferentes, en función de la profundidad de colocación de canal, y también por la existencia de instalaciones de alcantarillado y otras. Se definieron lotes de diferente tamaño de manera de mantener el ritmo de colocación de 2 semanas por lote (concepto de densidad de trabajo aplicado). La figura 10 representa estas diferentes zonas.

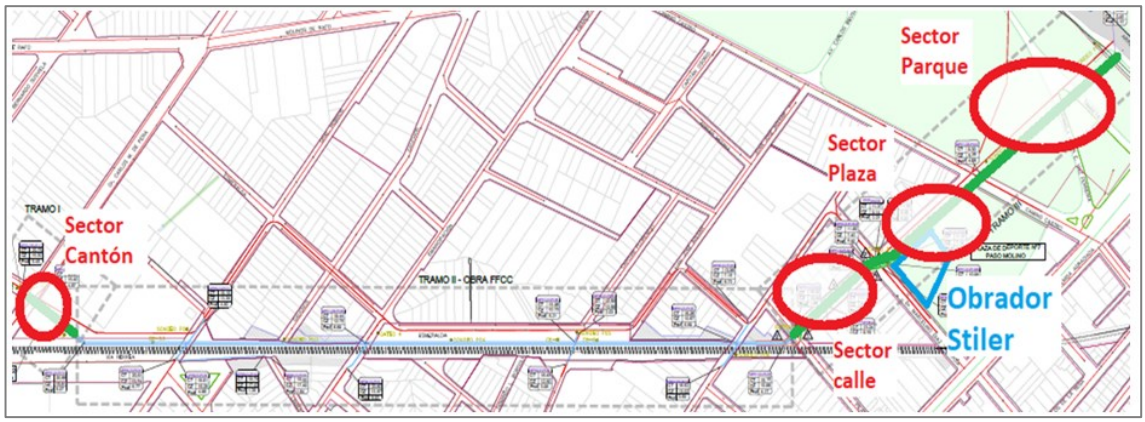

Figura 10. Zonas de trabajo basadas en las características geográficas

- En función de los ritmos de montaje se definió la necesidad de prefabricación, haciendo un balance entre ambos ritmos para no tener exceso de stock, pero tampoco tener riesgo de parada de montaje. Este análisis podemos verlo en la figura 11.
- Como parte del PSP se obtuvo un estudio de layout donde se pueden identificar zonas de prefabricado, de acopio, obradores, flujos de equipos y materiales que podemos verlo representado en la figura 12.
- Uno de los resultados más importantes del PSP es la obtención de un plan basado en localización (línea de balance) como plan maestro de obra representado en la figura 13.

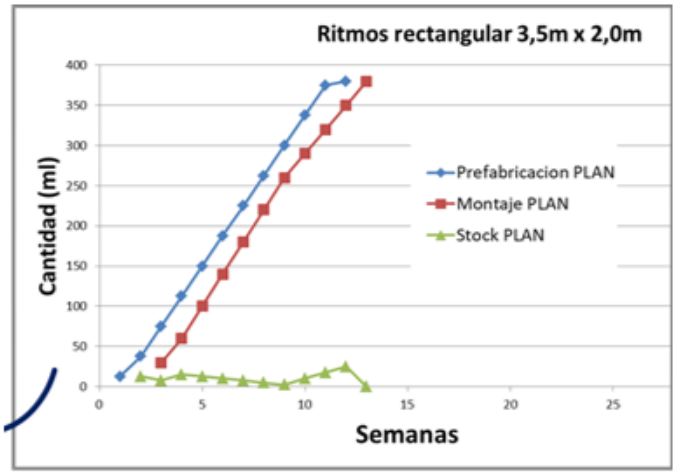

Figura 11. Balance entre ritmo de prefabricado y montaje.

Figura 12. Layout de obra definido en la etapa de PSP representado sobre una imagen del predio de obra

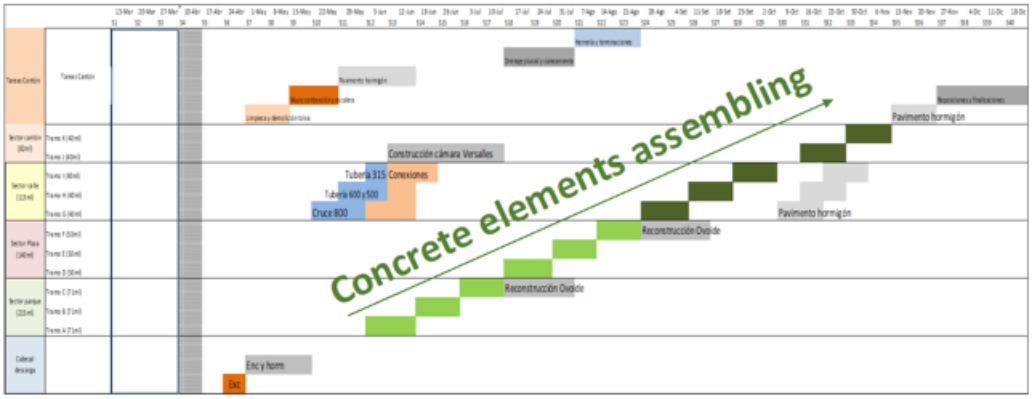

Figura 13. Plan maestro de obra basado en localización: línea de balance.

DISCUSIÓN

Como resultados parciales de la investigación, se puede apuntar que el modelo de planificación y control basado en flujos propuesto para proyectos de infraestructura subterránea lineal tiene algunas innovaciones:

- Hay una buena integración de LPS y LBPC. Por un lado, LPS juega un papel clave en el manejo de la incertidumbre y la complejidad estructural mediante el establecimiento de niveles de planificación jerárquicos, el uso de la toma de decisiones colaborativa y la creación de una acumulación de actividades preparadas. Esto puede entenderse como un modelo híbrido de planificación y control (*pull-push*), ya que existe claramente un mecanismo para tirar de la producción mediante la activación del trabajo basado en el estado del sistema, como sugiere Hopp & Spearman (2004). Por otro lado, LBPC trata explícitamente varios conceptos que juegan un papel clave en la filosofía Lean, como el tamaño del lote, el tiempo de ciclo, la sincronización y el control del trabajo en progreso;
- Sobre la base de la herramienta de control del estado de producción y en otros dispositivos de control visual, se puede monitorear el estado del sistema, y esta información se puede utilizar en reuniones de planificación colaborativa de LPS;
- De manera similar a LPS, LBPC también está organizado jerárquicamente para hacer frente a la alta incertidumbre involucrada en la secuencia de lotes. Además, el modelo propuesto enfatiza fuertemente el control basado en la ubicación, mediante el uso de varias métricas basadas en la ubicación, como desvío de ritmo, la variación del tiempo de ciclo, el progreso del proyecto considerando lotes completos y el trabajo en progreso innecesario;
- Los criterios para dividir el proyecto en zonas de trabajo pueden variar según el tipo de proyectos de infraestructura y contrato. El contrato, control de trabajo en progreso y reducción de las distancias entre las frentes de trabajo han sido criterios muy importantes para Red Manga y FTTH. Por otro lado, la densidad de trabajo ha sido el criterio principal para la definición de las zonas en Mataperros;
- La división de las restricciones en categorías también parece ser un mecanismo importante para que la planificación anticipada sea más eficaz. Algunas de las restricciones deben ser tratadas claramente por los gerentes de obra, por ejemplo, mediante el uso de tarjetas kanban, mientras que otras requieren mejoras en la integración con otros sectores de la organización o miembros externos de la cadena de suministro. Este tipo de enfoque para el nivel de planificación a mediano plazo ya ha sido sugerido por Brady et al. (2019).
- La gestión visual juega un papel clave en la implementación del modelo, como mecanismo para lidiar con el tipo de complejidad que existe en los proyectos de infraestructura subterránea lineal. Es muy importante visualizar flujos de trabajo que son más largos que el horizonte de planificación a corto plazo, las restricciones operativas que deben eliminarse dentro de la ventana de 4 semanas, la desviación en el ritmo de los procesos lineales y las zonas que deben priorizarse en términos de completar lotes en diferentes niveles jerárquicos;
- El uso de tecnologías digitales explorado en la obra de FTTH tuvo buenos resultados desde el punto de vista de la facilidad de almacenado de información, permitió participar de forma virtual en varias reuniones y luego poder enviar fácilmente a todos

los involucrados los compromisos. Los indicadores se lograban llevar de manera automática facilitando de este modo los análisis para procesos de mejora.

CONCLUSIONES

Esto artículo presenta los resultados iniciales de una investigación que tiene como objetivo desarrollar un modelo de planificación y control para proyectos de infraestructura lineal que combina elementos de LPS y LBPC. Este modelo involucra tanto el proyecto del sistema de producción (PSP), que es realizado antes del inicio de la obra, como también el proceso de planificación de la producción durante la obra, en los niveles de corto, mediano y largo plazo.

Varias contribuciones para la planificación y control de esto tipo de obra han emergido de la implementación de elementos del modelo en tres tipos de obra: (i) la mejor comprehensión de la complementariedad entre LPS y LBPC; (ii) mecanismos para lidiar con la complejidad, como el control del status de la producción, la división jerarquizada de los lotes de producción, y el uso del concepto de producción *pull*; (iii) los criterios para dividir el proyecto en zonas de trabajo, que pueden variar según el tipo de proyectos de infraestructura y contrato; y el rol de la gestión visual en esto tipo de proyecto.

Como limitaciones de la investigación, puédese apuntar la necesidad de hacer un análisis de datos más completo de los datos de los tres proyectos, para hacer una evaluación de la utilidad y aplicabilidad del modelo propuesto.

REFERENCIAS

Arogyaswamy, B., & Simmons, R.P. (1991). Thriving on Interdependence: The key to JIT implementation. *Production and Inventory Management Journal*; Alexandria. Vol. 32(3).

Ballard, H. G. (2000). *The last planner system of production control*. [Doctoral dissertation, Univ. of Birmingham]. eTheses Repository. https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4789/1/Ballard00PhD.pdf

Ballard, H.G., & Howell, G.A. (1998) Shielding production: essential step in production control. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(1), 11–7. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:1(11)

Ballard, G. & Tommelein, I.D. (2020). *Current Process Benchmark for the Last Planner® System of Project Planning and Control*. University of California, Berkeley Project Production Systems Laboratory (P2SL). http://p2sl.berkeley.edu/wp-content/uploads/2021/03/Ballard_Tommelein-2021-LPS-Benchmark-2020-2.pdf

Barth, K.B., Sterzi, M. P., Formoso, C. T., Alliende, J. I., Bertin, D., & Del Río, J. (2020) Implementation of Production System Design in House Building Projects: A Lean Journey in Chile. In *Proc. 28th Ann. Conf. Int. Group for Lean Constr*. University of California, Berkeley. p. 397-408. https://doi.org/10.24928/2020/0124

Brady, D.A., Tzortzopoulos, P., Rooke, J., Formoso, C.T., & Tezel, A. (2018). Improving transparency in construction management: a visual planning and control model, *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 25 No. 10, 1277-1297. https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2017-0122

Dave, B., Boddy, S., & Koskela, L. (2013), Challenges and Opportunities in Implementing Lean and BIM on a Infrastructure Project. In *Proc. 21th Ann. Conf. Int. Group for Lean Constr*., pp. 741-750.

Formoso, C., Flores, P., Barth, K., Suarez, M., Magalhães, I., Ksiazenicki, V. & Acquarone, A. (2022). Developing a flow-based planning and control approach for linear infrastructure projects. In *Proc. 30th Ann. Conf. Int. Group for Lean Constr*., pp. 1186-1197. doi.org/10.24928/2022/0236

Frandson, A., Berghede, K. & Tommelein, I. D. (2013). Takt time planning for construction of exterior cladding. In *Proc. 21th Ann. Conf. Int. Group for Lean Constr*., pp. 527-536. https://www.iglc.net/papers/details/902

Hopp, W.J., & Spearman, M.L. 2004. To Pull or Not to Pull: What Is the Question? *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(2): 133–148. doi.org/10.1287/msom.1030.0028

Kalsaas, B. T., Grindheim, I. & Læknes, N. (2014). Integrated Planning vs. Last Planner System. In *Proc. 22th Ann. Conf. Int. Group for Lean Constr*., pp. 639-650.

Kassab, O. A., Young, B. K., & Lædre, O. (2020). Implementation of Last Planner® System in an Infrastructure Project. In *Proc. 28th Ann. Conf. Int. Group for Lean Constr*., pp. 517-528. https://doi.org/10.24928/2020/0089

Mattila, K.G. & Abraham, D.M. (1998). Linear scheduling: past research efforts and future directions, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 5(3), 294-303. doi.org/10.1108/eb021083

Nutt, H., Berghede, K., Odah, S., & Ballard, G. (2020). LPS® Process Benchmark 2020: Location Based Planning Report. *Lean Construction Journal,* 100-118 https://leanconstruction.org/wp-content/uploads/2022/08/LCJ_20_007.pdf

Olivieri, H., Seppänen, O., Alves, T., Scala, N., Schiavone, V., Liu, M., & Granja, A. (2019). Survey Comparing Critical Path Method, Last Planner System, and Location-Based Techniques. *Journal of Construction Engineering and Management,* 145(12), 1-12. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001644

Sacks, R. and Treckmann, M., & and Rozenfeld, O. (2009). Visualization of workflow to support lean construction. *Journal of Construction Eng. and Management*, 135(12), 1307-1315. doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000102

Seppänen, O., Ballard, G., & Pesonen, S. (2010). The Combination of Last Planner System and Location-Based Management System. *Lean Construction Journal*, 43-54. www.leanconstructionjournal.org

Seppänen, O., Modrich, R., & Ballard, G. (2015). Integration of Last Planner System and Location-Based Management System. In *Proc. 23th Ann. Conf. Int. Group for Lean Constr*., pp. 123-132.

Viana, D.D., Formoso, C.T., Isatto, E.L. (2017) Understanding the theory behind the Last Planner System using the Language-Action Perspective: two case studies. *Production Planning & Control*, 28(3), 177-189. doi.org/10.1080/09537287.2016.1233360

Williams, T. M. (1999). The need for new paradigms for complex projects. *Int. J. Project Manag*, 17(5), 269–273. doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00047-7

Yabuki, N. (2010). Toward adoption of virtual construction in the infrastructure domain. *The 5th ACIT Meeting (Asia Construction IT Round Table Meeting)*, SMS10-160.