

**PROPUESTA PARA EL SISTEMA PULL EN PROYECTOS DE UNA EMPRESA
VALLECAUCANA DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN**

MARIA ISABEL LOZADA GARCIA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
VALLE DEL CAUCA
SANTIAGO DE CALI
2019**

**PROPUESTA PARA EL SISTEMA PULL EN PROYECTOS DE UNA EMPRESA
VALLECAUCANA DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN**

MARIA ISABEL LOZADA GARCIA

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniera Industrial

**Director
Oscar Rubiano Ovalle
Doctor en Ingeniería Industrial**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
VALLE DEL CAUCA
SANTIAGO DE CALI
2019**

AGRADECIMIENTOS

A Dios que es el motor de mi vida.

A mis padres por su paciencia, apoyo incondicional e inspiración para realizar este trabajo.

A mi esposo por estar en cada momento con su apoyo, paciencia, consejos y su constante aliento a no rendirme.

A mi profesor Oscar Rubiano por su guía constante y creer en mí.

A la empresa SAINC ingenieros constructores S.A, especialmente a la ingeniera Marcela de Angulo, por proporcionarme todas las herramientas necesarias.

A mis primos Juan Felipe, Maria Victoria, Daniel y Laura, y a mis mejores amigos Juan Sebastián Molano y Maria del Mar Hurtado por siempre alentarme a no desfallecer.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 GENERAL.....	12
2.2 ESPECÍFICOS.....	12
3. MARCO TEORICO	13
3.1 PENSAMIENTO LEAN	13
3.2 LEAN EN LA CONSTRUCCIÓN	16
3.3 LAST PLANNER® (LPS)	17
3.4 LINEA DE BALANCE.....	22
3.5 KANBAN EN CONSTRUCCIÓN.....	25
3.6 MODELADO BIM.....	27
3.7 PLANIFICACIÓN TRADICIONAL VS PULL.....	34
4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN LA EMPRESA CASO DE ESTUDIO	36
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	¡Error! Marcador no definido.
5. PROPUESTA DE UN SISTEMA PULL EN CONSTRUCCIÓN.....	37
5.1 VALOR.....	37
5.2 CADENA DE VALOR.....	38
5.3 FLUJO DE VALOR	47
5.4 PULL.....	56
5.4.1 LAST PLANNER	57
5.4.2 KANBAN	58
5.4.3 LINEA DE BALANCE	60
5.4.4 VALOR SOSTENIBLE.....	67
6. VALIDAR EL SISTEMA	71

6.1	SIMULACIÓN PULL CONSTRUCTION.....	71
6.1.1	PRIMERA ETAPA	72
6.1.2	SEGUNDA ETAPA.....	74
7.	CONCLUSIONES	78
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Conceptos y herramientas	15
Tabla 2. Comparación modelo tradicional vs pull.....	35
Tabla 3. SIPOC – Descripción del proceso.....	39
Tabla 4. SIPOC – Ejecución de obra	43
Tabla 5. Beneficios BIM	49
Tabla 6. Análisis de Valor Agregado.....	53
Tabla 7. Comparación estado actual vs estado futuro	56
Tabla 8. Nomenclatura para los cálculos de la LDB	63
Tabla 9. Criterios y fórmulas LDB	64
Tabla 10. Cálculos para la LDB	64
Tabla 11. Reasignación de recursos actividad D	64
Tabla 12. Resultados simulación	75

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Principios lean	14
Figura 2. Planificación tradicional	18
Figura 3. Mejor Planeación	18
Figura 4. Planificación LPS	19
Figura 5. Evolución del PAC	21
Figura 6. Sistema de Último Planeador LPS.....	22
Figura 7. Ejemplo LDB	24
Figura 8. Tablero Kanban básico	26
Figura 9. Tablero Kanban Kanbanize	26
Figura 10. VSM Estado actual	45
Figura 11. Diamante BIM	48
Figura 12. Modelo tradicional vs BIM.....	49
Figura 13. VSM futuro	54
Figura 14. Tablero Kanban físico	59
Figura 15. LDB actualizado de un proyecto de vivienda	61
Figura 16. LDB programación inicial acabados obra estudiada	66
Figura 17. Triangulo pull construction	68
Figura 18. Planeación primera ronda.....	73
Figura 19. Planificación segunda ronda.....	76
Figura 20. Uso de Kanban en la segunda ronda.....	76
Figura 21. Construcción finalizada.....	77

INTRODUCCIÓN

En un entorno competitivo como el que se vive actualmente, el consumidor ha evolucionado, ahora es más selecto y no quiere comprar un producto al precio y calidad que decidan los productores, ahora los mercados son más disputados y se necesitan estrategias para ahorrar costos, por lo que es necesario agregar un valor diferenciado al cliente, para poder competir con la gran variedad de empresarios dispuestos a satisfacer la misma necesidad a precios más bajos (Becerra & Patricia, 2010). Es por esto que las empresas que quieren sobrevivir a la estrecha competencia del medio, deben perfeccionar su estrategia de enfocarse en el cliente. Es aquí donde juega su papel el modelo de excelencia de Toyota, mejor conocido como Lean, que busca la eliminación de desperdicios, por medio de la aplicación de cinco principios fundamentales (Cuatrecasas, 2010).

La industria de la construcción no es ajena a estas tendencias del mercado, incluso cuando el cliente es el Estado, se postulan gran cantidad de empresas similares, y sólo ganará el contrato la que presente el mejor plan a seguir, se adapte al presupuesto y además entregue un cronograma dentro de los plazos (Bogren, 2018). La aplicación de la filosofía Lean, es una estrategia que contribuye a tener procesos libres de desperdicio, los cuales se identifican en las actividades que agregan costos pero no valor desde el punto de vista de los clientes. Esto es un imperativo, que cada vez toma mayor importancia, dada la creciente competencia en el sector. Para generar propuestas ganadoras, también es importante que estos procesos de construcción, sean flexibles para que se adapten a los tiempos estipulados en una obra.

Su aplicación al sector de la construcción, toma la forma de Lean construction, adoptada en forma creciente desde el año 1992 por un buen número de organizaciones en el mundo, enfoque que según sus practicantes, maximiza el valor y minimiza pérdidas en construcción, por medio de herramientas que llevan a incrementar la productividad (Lean Construction Enterprise, 2016).

En Colombia, CAMACOL ha impulsado la implementación de la filosofía Lean Construction entre sus afiliados, a través de capacitaciones específicas desde el año 2007, por lo que al 2015 se reconoció a 18 empresas, líderes en el país en la

implementación de este modelo en sus proyectos constructivos (CAMACOL, 2015).

Por otro lado, el sistema pull es el estado ideal a llegar en el proceso de implementación de Lean Construction en una organización (Womack & Jones, Lean Thinking, 2005), por lo que este proyecto se desarrolla con el objetivo de proponer un sistema pull en proyectos de una empresa vallecaucana del sector de la construcción. Botero & Álvarez (2004), han implementado esta metodología en constructoras colombianas, concluyendo que al aplicar este enfoque se llega a grandes beneficios para la productividad del país, así como para las organizaciones que lo aplican, lo que es mayor confiabilidad en el sistema de planificación, garantizando flexibilidad y mejorando su rentabilidad por medio de la disminución de costos, así como un posible aumento en el nivel de satisfacción de los clientes y una mejor imagen institucional.

Para el diseño de la propuesta del sistema pull es necesario darle un enfoque de proyectos, debido a la naturaleza y forma de las constructoras, por lo que se propone el uso de algunas herramientas Lean Construction como Last Planner®, Línea de Balance y Kanban, definidos en un sistema Pull Construction.

En este documento, se plantea la problemática de los desperdicios que obstaculizan el flujo en proyectos de construcción, estudiando el caso de una obra de la empresa caso de estudio; a partir de esto se propone un sistema pull construction que responda a la situación problema, y este sistema propuesto es comprobado por medio de una simulación realizada a un grupo de la empresa, con fuertes arraigos a los métodos tradicionales de programación en construcción.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La industria de la construcción es uno de los sectores con mayor crecimiento en los últimos años en cuanto a la contribución al PIB y la generación de empleo en el país, para el 2017 la tasa de crecimiento esperada es del 4,2% (DINERO, 2017). El sector de la construcción se caracteriza por sus desperdicios, y en Colombia se ha convertido en algo común que las empresas de esta naturaleza presenten retrasos, en Marzo del 2016, 83 obras se encontraban atrasadas o con irregularidades y la inversión de 1,3 billones de pesos estaba en peligro (Observatorio de Transparencia y Anticorrupción, 2016). Estas demoras obedecen a causas como: atrasos del cliente, cambios en las condiciones de campo, condiciones atmosféricas adversas, pérdida de productividad, fallas en la cotización de materiales y equipos, errores en las fichas técnicas, entre otros (Burgos Marín & Vela Ávila, 2015).

El problema de las obras en Colombia no solamente ha estado vinculado a la falta de recursos financieros para el desarrollo de estas, sino también a la carencia de creación de planes de construcción flexibles y la enorme cantidad de recursos que se pierden debido a las ineficiencias, también a factores específicos que no son considerados dentro de la planeación pero que resultan ser influyentes en el desarrollo de un proyecto (Rodríguez, La gestión de la obra desde la perspectiva del último planificador, 2011). Es por esto que se ve la necesidad de cuestionarse si la manera en que se estructura el plan inicial de las obras en el país, es adecuado a las exigencias actuales del mercado de clientes y de competidores, o deben aplicarse otras estrategias que permitan que este plan se adapte a todos los cambios y problemas que aparecen durante la ejecución de un proyecto.

Una de las obras vallecaucanas destacadas a nivel nacional por sus retrasos es la doble calzada entre Buga y Buenaventura, que se contrató en el 2006 y debió entregarse en el 2012, pero a mediados del 2011, los gremios le dijeron al Gobierno Nacional que ni para el 2020 estaría lista. Esto sin contar que la obra completa se presupuestó inicialmente por aproximadamente 1,17 billones de pesos, y a la fecha el costo final del proyecto se estima en 2 billones de pesos (EL TIEMPO, 2017), estos sobrecostos afectan el presupuesto nacional destinado a otras áreas. Las empresas constructoras se han visto afectadas ante distintas situaciones que retrasan sus obras, y terminan reduciendo sus utilidades y causando incumplimientos a sus clientes. Es por todo esto que se empieza a ver

la necesidad de implementar una metodología en la planeación de proyectos de construcción que sea flexible, ayude a disminuir los desperdicios y aumentar la competitividad en las empresas de esta naturaleza.

En la empresa caso estudio, las principales demoras se presentan por cambios de diseño, problemas con la comunidad, lluvia en la etapa de excavación y cimentación, accidentes, falta de coordinación con los contratistas, entre otros, todas estas demoras representan días adicionales en la ejecución, y los costos fijos de una obra para esta empresa, fluctúan entre 6 y 13 millones de pesos por día, además de esto, los retrasos normalmente no los asume el cliente y por cada día de retraso, se cobra una multa por incumplimiento de términos, que equivale a un porcentaje sobre el contrato inicial, esto es, en el caso de la obra con costos fijos de 13 millones diarios, la multa sería de 1,6 millones por cada día de retraso, por lo que esta empresa ve constantemente disminución en sus utilidades.

El problema se define en los siguientes términos:

¿Cómo concebir un sistema de producción de construcción, que permita visualizar ganancia de flujo entre los eslabones de la cadena, para el caso de una empresa vallecaucana que utiliza la planeación tradicional?

Esta pregunta se sistematiza en la siguientes sub-preguntas:

¿Cómo es el sistema productivo actual?

¿Qué tan fluidas son las operaciones en la cadena de producción?

¿Cómo podría concebirse el sistema visualizando un mejor flujo?

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Diseñar una propuesta para el sistema pull en proyectos de construcción vertical en una empresa vallecaucana del sector de la construcción, para visualizar ganancia de flujo entre los eslabones de la cadena de producción.

2.2 ESPECÍFICOS

- Describir el sistema productivo mediante herramientas de caracterización y mapeo de alto nivel, a fin de conocerlo.
- Proponer el sistema pull mediante la incorporación de los factores determinantes definidos en un mapa futuro, con el fin de visualizar la ganancia de flujo.
- Validar el sistema pull mediante una simulación e indicadores de desempeño, para comprobar que el sistema diseñado es exitoso.

3. MARCO TEORICO

3.1 PENSAMIENTO LEAN

Después de la segunda guerra mundial tras el gran éxito americano de empresas como Ford y General Motors, Eiji Toyoda y Taiichi Ohno visitaron por tres meses la planta Rouge de Ford en Detroit con el fin de conocer el funcionamiento de esta, para luego concluir que el sistema de producción en masa sería muy difícil de copiar y mejorar para llevar a Japón (Padilla, 2010). Durante su visita también conocieron el sistema de reposición que aplicaban los supermercados, así motivados por el sistema que vieron, decidieron adaptar el sistema de producción en masa al sistema de los supermercados, que asemejaba el comportamiento de su país, lo adoptaron como una filosofía, y se llamó “Toyota Production System”, al que más tarde se le conoció como “Pensamiento Lean” (Womack, Jones, & Roos, La máquina que cambió el mundo, 1995).

El pensamiento lean tiene como fundamento la eliminación de todo tipo de barreras que se opongan al flujo, por lo que es principal diferenciar las actividades que agregan valor, después tomar estas actividades y aquellas que no lo agregan pero que son fundamentales para obtener el producto final y ordenarlas en una cadena de valor, en esta el producto debe pasar por todas las actividades y tener las especificaciones del cliente para así satisfacer la demanda, esto es “Flujo” (Womack & Jones, Lean Thinking, 2005). La estrategia es eliminar o minimizar los desperdicios, y así producir el máximo valor para el cliente. Una empresa que trabaja con el pensamiento lean, busca sistemáticamente conocer aquello que el cliente reconoce como valor agregado y está dispuesto a pagar por ello, paralelamente va eliminando aquellas operaciones que no generan valor (Wheat, Mils, & Carnell, 2003).

Lean describe 5 principios que giran alrededor del cliente, se enseñan en la Figura1.

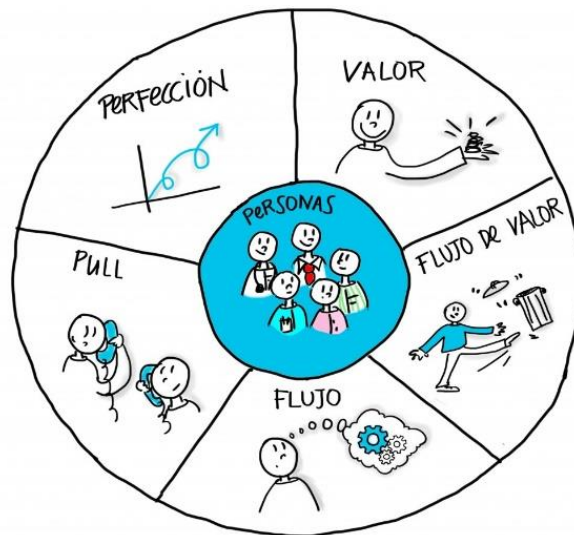


Figura 1. Principios lean
Fuente: (Osenseis, 2016)

En la especificación del valor, que es el punto de partida del pensamiento lean, se debe tener en cuenta que quien define el valor es el cliente, por lo que en esta etapa se debe conocer al cliente para tener claro cuáles son sus necesidades y expectativas, asimismo quien genera valor es el fabricante, por lo que este necesita recibir esta información para conocer que está dispuesto a pagar el cliente, y así definir el flujo de valor o cadena de valor, que consiste en el conjunto de acciones necesarias para llegar al producto final que para el cliente es valioso, por lo que elimina las actividades que no agregan valor y minimiza las que son necesarias pero no agregan valor, facilitando así que se garantice el flujo de las actividades que generan valor, además lean se enfoca en el cliente, es por esto que utiliza el sistema pull, donde es el cliente quien jala todas las actividades que llevan al producto valioso (Herrandiz Espuny, 2009). Finalmente, lean propone la perfección como último principio, pero este realmente no se logra, por lo que se vuelve un proceso cíclico de mejora continua.

La producción en masa está basada en un sistema push o de “empuje” que significa que el producto es empujado a lo largo de las diferentes actividades del proceso, teniendo que recurrir a pronósticos y grandes inventarios, el proceso de producción Lean posee un sistema pull o de “jalar” dónde espera a que sea el cliente el que demande el producto para empezar a fabricarlo, tiene una gran complejidad en reducir el tiempo de espera en la entrega del producto para el consumidor final, es por esto que el sistema pull, desarrolla herramientas para el cumplimiento de esta meta como lo es el sistema justo a tiempo o JIT por sus

siglas en inglés, este se basa en entregar los productos en un tiempo determinado para reducir al máximo los stocks (Toleano de Diego, Mañes Sierra, & García, 2009).

Cada principio de lean, tiene sus técnicas y herramientas para aplicarlo. En la Tabla 1 se presentan algunas:

PRINCIPIOS Y CONCEPTOS	HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS
Valor - Definido por el cliente	La voz del cliente Los 7 desperdicios
Flujo o Cadena de Valor - Cadena de valor - Identificar y minimizar desperdicios	SIPOC Value Stream Mapping
Flujo - 0 defectos - Flexibilidad - Orden y limpieza - Estandarización	5S TPM Takt-time (TT) Gestión visual Jidoka poka-yoke
Pull - Actividades jaladas por el cliente - Reduce tamaño de lotes	Kanban Supermercados FIFO Heijunka Just in time (JIT)
Perfección - Mejora continua - Repetir los procesos sin errores	TQM PHVA Kaizen 6 Sigma

Tabla 1. Conceptos y herramientas

Fuente: elaboración propia

3.2 LEAN EN LA CONSTRUCCIÓN

Tradicionalmente la industria de la construcción entiende el proceso como la entrada de materias primas que se transforman en productos, respondiendo al conocido modelo de conversión, sin embargo, según Lira (1996), este modelo posee errores importantes como que no diferencia las actividades que agregan valor de las que no, no considera la interdependencia entre subprocesos a la hora de reducir costos, no tiene en cuenta la variabilidad en los resultados pues asume que el proceso es lineal, y no tiene importancia por el la sostenibilidad en el tiempo del producto final. Es por esto que en la actualidad la industria de la construcción se enfrenta a muchos problemas tales como defectos en el producto final, aumento de costes reales versus costes planificados, aumento del plazo de entrega del producto al cliente etc. (Burgos Marín & Vela Ávila, 2015), el mismo tipo de problemas a los que se enfrentaba Toyota en manufactura cuando Ohno creó la teoría del Lean Thinking para Toyota.

La filosofía Lean es tan completa que se puede aplicar a los distintos tipos de industria, principalmente se aplicó en la industria automotriz, pero lean no es privativo de la industria del automóvil, no es únicamente para empresas de gran tamaño, y no es exclusivo del sector Industrial (Womack, Jones, & Roos, La máquina que cambió el mundo, 1995). En este proyecto se abordan lineamientos de lean aplicado a la construction para moldear la propuesta, ya que el sistema pull es el estado ideal a llegar en el proceso de implementación de Lean (Womack & Jones, Lean Thinking, 2005).

Lean construction tiene como meta la adecuación del producto a las necesidades del cliente de forma completa, consumiendo el mínimo de los recursos disponibles, teniendo una visión dual de las conversiones y los flujos, teniendo en cuenta las actividades que agregan valor y las que no. El modelo se ocupa de la alineación y la búsqueda holística de mejoras simultáneas y continuas en todas las etapas del proyecto, considerando diseño, construcción, activación, mantenimiento, recuperación y reciclaje (Abdelhamid, 2008), conduciendo los procesos del proyecto a gestionarse a un costo optimo y un valor máximo de acuerdo a la perspectiva del cliente, llevando al mínimo los desperdicios en una obra de construcción, donde principalmente son tiempo, inventario y reprocesos.

Botero y Villa (2004), realizaron un estudio a un grupo de constructoras de la ciudad de Medellín, que dos años atrás habían sido parte de un programa de mejoramiento en gestión de la construcción, basado en los principios de Lean construction, al evaluar la efectividad del sistema, encontraron una mejora significativa en la eficiencia de la mano de obra, una evolución del porcentaje de asignaciones completadas, la disminución gradual de los tiempos no contributivos y el incremento de los productivos de acuerdo con el desarrollo de la obra, demostrando así que la metodología, favorece el mejoramiento de la productividad.

3.3 LAST PLANNER® (LPS)

Desarrollado por los profesores Ballard y Howell pertenecientes al Lean Construction Institute, Last Planner® (LPS) o el sistema de último planificador es la principal herramienta de la filosofía Lean Construction, esta se enfoca directamente en la etapa de ejecución en la obra mejorando la variabilidad y los flujos de trabajo, además tiene como finalidad incrementar el desempeño en la obra y por ende generar confianza sobre la planificación, para esto el sistema aplica acciones sobre los diferentes niveles de la planificación (Rodríguez, La gestión de la obra desde la perspectiva del último planificador, 2011).

En la planificación tradicional, una de las principales razones porque se retrasan las obras de construcción es que en la planificación no contemplan las variables que pueden afectar el proyecto, algunas son flujo de material, capacidad del proveedor, disponibilidad de mano de obra, flujos de caja (Burgos Marín & Vela Ávila, 2015).

Según Rodríguez et al (2011), la planificación tradicional contempla tres partes, inicialmente se determina lo que “debería” hacer para completar un proyecto, a partir de esto se decide lo que “se hará”, y tras un periodo de tiempo debido a restricciones se identifica que no todo “puede” hacerse, presentándose retrasos repetidamente, esto se da porque las empresas deciden lo que “se hará” sin un conocimiento previo de lo que “puede” hacerse.

Las figuras presentadas a continuación representan la situación de los proyectos de construcción, en la Figura 2 se presenta la relación de estos tres factores con la planificación tradicional, y en la Figura 3 una situación con una mejor planeación

debido a la toma de medidas de control para que haya un mejor cumplimiento del plan inicial, sin embargo sigue habiendo una brecha entre estos tres elementos:



Figura 2. Planificación tradicional
Fuente: (Lean Construction Enterprise, 2016)



Figura 3. Mejor Planeación
Fuente: (Lean Construction Enterprise, 2016)

En la planeación tradicional, la construcción se considera un proceso de conversión en el que las materias primas se vuelven productos o salidas. No se considera diferencias entre los subprocesos de conversión por lo que se asume que todos agregan valor y que el costo del proceso se reduce si se disminuyen los costos de todos los subprocesos, pero al asumir esto, se ignora la interdependencia de dichos subprocesos al creer que el sistema es lineal y secuencial, por lo que no se tiene en cuenta la variabilidad de los resultados.

En la planificación con el uso de LPS los gestores y ejecutores de actividades deben hacer un análisis de restricciones sobre lo que se “puede” hacer para proceder a acordar lo que “se hará” y así definir las actividades de la semana, evitando que se presenten retrasos por restricciones no identificadas y/o gestionadas, siendo así notorio el aumento de la productividad (Ballard, 2000), en la Figura 4 se representa la planeación mediante la implementación de LPS, utilizando este sistema, es posible que los plazos y recursos de los proyectos se ejecuten tal como se estableció en el plan inicial, en este caso lo que se “debe” hacer “se puede” y “se hará”.



Figura 4. Planificación LPS
Fuente: (Lean Construction Enterprise, 2016)

La implementación de LPS es sencilla, pero es muy importante que haya un estricto cumplimiento, la planificación con LPS contempla tres tiempos clave de planificación, el plan inicial, la planificación intermedia y el plan semanal, son estos tiempos de planeación lo que llevan a una situación como la de la Figura 4, siendo principal el análisis de las restricciones que puedan oponerse al flujo, el proceso de desarrollo de los planes debe hacerse en conjunto con todos los planeadores (Alarcon & Pellicer, 2009).

El plan inicial o plan maestro es el que cubre todas las actividades de construcción del proyecto, esta planeación se realiza en conjunto con todos los planeadores, de acuerdo a Mayes (2013) es ideal que se realice en un salón con una pared grande y una cartelera blanca que la cubra, el primer paso para ejecutar este plan es determinar el final de la obra, a partir de esto se debe precisar las actividades que jala el final de la obra, un ejemplo puede ser que la tarea que jala el final de la estructura es la cubierta de techo, esta actividad jalaría el detallado del acero y la inspección del detallado del acero, a su vez estas dos actividades jalarían otras actividades previas para su realización y se continua así hasta llegar al inicio de la obra, a esto se le llama calendario pull.

Mayes también recomienda que al realizar esta programación los últimos planeadores de cada especialidad (concreto, acero, hidrosanitario, acabados, etc.), se encuentren presentes, cada uno debería tener post-it de un color asignado y en el momento que una tarea de su especialidad sea "jalada" debe anotar su tarea en el post-it, con su duración y/o material requerido, y las tareas previas que necesite, similar a una tarjeta Kanban, este calendario debe poder guardarse para su verificación posterior en las siguientes etapas de la planificación.

A partir del plan maestro se realizan el plan intermedio y el plan semanal. El plan intermedio se realiza en un tiempo establecido, pueden ser 3 meses, 6 semanas o

el tiempo que se considere adecuado de acuerdo al tamaño del proyecto, esta planeación consiste en el análisis de restricciones, Mayes (2013) describe esto como el Look Ahead y lo realiza a 6 semanas (porque es el tiempo que el autor considera adecuado para solucionar la mayoría de situaciones que se puedan presentar), explica que al finalizar el calendario pull se debe revisar semanalmente la planeación, proyectándose a 6 semanas, para analizar que hace falta para que la actividad que se debe realizar en esa semana se pueda realizar.

Este análisis sirve para identificar posibles retrasos y anticiparse a ellos, así se podría gestionar las condiciones que eviten que se desarrolle la actividad. Por ejemplo si en 6 semanas se va a hacer el enchape en mármol de determinados pisos, se debe analizar que falta para poder realizar esta tarea, en este caso asumimos que es necesario que el piso esté nivelado, entonces el siguiente paso es verificar que el nivelado de pisos no tenga algún retraso, y de ser así empezar a gestionar esto para que en 6 semanas se pueda iniciar el enchape sin ningún problema, la siguiente semana se repite este proceso y así semanalmente hasta la conclusión de la obra.

El plan semanal consiste en determinar las actividades que se realizarán durante la semana, se desarrolla a partir del cronograma pull, lo más importante de este nivel de planeación es que debe estar disponible para todos los trabajadores, para que todos tengan presente lo que deben hacer cada día, Mayes (2013) recomienda que se ponga en un tablero y al finalizar cada día cada planeador ponga una raya "/" sobre la actividad de este día para dejar claro que la completó, tras esto, el supervisor debe poner otra raya "\", completando una equis "X", dando a entender que se realizó la tarea del día a satisfacción.

Sobre la planificación semanal se realiza el cálculo del Porcentaje de Asignaciones Completadas o PAC, este indicador mide el desempeño de la planificación y hace seguimiento al proyecto, además ayuda a tomar decisiones, es decir, si una actividad está al 100% de cumplimiento y otra está al 25%, se puede transferir recursos a la otra actividad para terminarla a tiempo. (Soini, Leskela, & Seppanen, 2004). El PAC le da la confiabilidad al plan estando directamente relacionado a la productividad, la investigación de las causas de los fallos de cumplimiento dan aprendizaje sobre cómo evitarlos a futuro. El PAC se calcula así:

$$PAC = \frac{\text{Número de actividades cumplidas}}{\text{Número de actividades programadas}} \times 100$$

Fuente: (Lean Construction Enterprise, 2016)

En un estudio realizado por Botero y Álvarez (2005) para comprobar el efecto de la implementación de Last Planner® en empresas constructoras de la ciudad de Medellín, se determinó que es una herramienta de gran utilidad para mejorar la confiabilidad sobre la planeación, y después de realizar mediciones por un año, se comprobó que el sistema mejoró el indicador PAC en las empresas caso estudio, pasando de un 65% a un 85% de cumplimiento al finalizar la semana 25 como se muestra en la Figura 5.

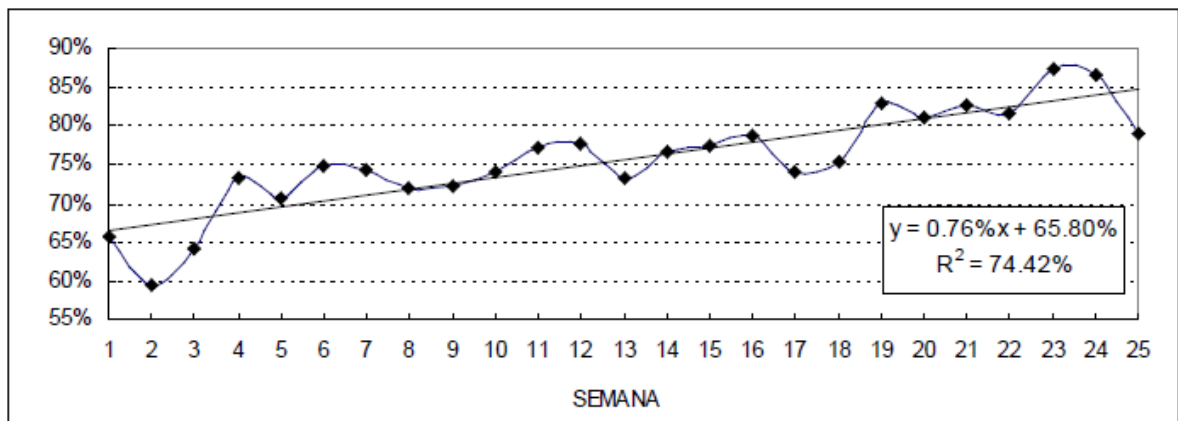


Figura 5. Evolución del PAC

Fuente: (Botero & Álvarez, 2005)

Se concluye entonces que la construcción requiere planificación por diferentes personas de diversos cargos y distintos niveles jerárquicos. La Figura 6 describe el ciclo de la planificación LPS.



Figura 6. Sistema de Último Planeador LPS

Fuente: (Rodríguez, La gestión de la obra desde la perspectiva del último planificador, 2011)

3.4 LINEA DE BALANCE

El método de programación más utilizado a nivel mundial en la industria de la construcción ha sido el Método de la Ruta Crítica (CPM), este es utilizado para planear y administrar los proyectos (Oberlender, 1993), sin embargo, este método presenta inconvenientes al ser aplicado en proyectos de fabricación continua de unidades iguales, tales como edificios, viviendas o carretera, en los que se requiere cierto tiempo para terminar cada unidad (Arcila, 2012). Por otra parte, existen evidencias bibliográficas que indican que el método de Línea de Balance (LDB) es la técnica de programación adecuada para este tipo de proyectos, tal como lo demuestran casos de éxito en empresas constructoras (Botero Botero & Acevedo, 2011), además de la facilidad con que se visualiza el flujo y la incorporación del concepto de mejora, ya que el programador puede visualizar fácilmente posibles soluciones que permitan mejorar la programación inicial de un proyecto.

Este método fue desarrollado por un grupo de trabajo encabezado por George E. Fouch en la década de 1940, que tenía el objetivo de monitorear la producción en Goodyear Tire & Rubber Company, más adelante fue utilizado por la Marina de los Estados Unidos para programar una gigantesca movilización en el conflicto bélico

durante la segunda guerra mundial, a partir esto ha sido implementado en distintas industrias, teniendo un sinnúmero de aplicaciones en la industria de la construcción (Arditi, Tokdemir, & Suh, 2001).

A pesar de que el sistema LDB inicialmente haya sido aplicado a proyectos con una gran escala de repetición y un pequeño número de actividades, en todo proyecto, independientemente de su complejidad, las actividades principales son siempre las mismas, por ejemplo, los pisos de un edificio son actividades repetitivas y esta se puede fraccionar en varios sectores con iguales volúmenes de trabajo, es por esto que incluso los clientes finlandeses exigen que se haga uso de programación utilizando el sistema de LDB tanto en proyectos complejos como en la construcción de edificios residenciales. (Soini, Leskela, & Seppanen, 2004). LDB, es un sistema de planificación lineal que permite planear las actividades para que estas se ejecuten de forma continua, incluso cuando el trabajo de una misma actividad se esté ejecutando en diferentes sitios (Salem, Asce, Solomon, Minkarah, & Genaidy, 2006).

Según lo menciona Arcila (2012), al graficar una LDB se puede consolidar un grupo de actividades similares en una sola línea, representando un gran número de actividades comunes en un documento mucho más sencillo y pequeño a la vez que un diagrama de barras (resultante de CPM, PDM o PERT), que muestra la duración de una actividad particular.

Además, la LDB determina el “ritmo” de trabajo en que se deben realizar las actividades que conforman el proyecto para terminarlo de manera exitosa de acuerdo a lo programado, además se aprecia fácilmente la relación de un grupo de actividades con respecto al grupo subsecuente y el impacto que pueda generar un grupo atrasado sobre el grupo posterior, diferenciando LDB de otros métodos que no muestran relaciones directas entre actividades individuales, sino la relación de resultados entre las diferentes operaciones (Orihuela & Esteves, 2003).

Botero & Acevedo (2011) realizaron un estudio donde implementan de manera conjunta la simulación de operaciones y líneas de balance como herramientas de programación, toman las actividades asociadas a la etapa de estructura, armado y fundición de muros y losa, en un edificio, como escenario actual está el programa como se ejecuta por parte de los constructores, y con la ayuda de las líneas de balance se generan dos escenarios alternativos con el fin de comparar los tiempos y los costos a la terminación del proyecto, finalmente los resultados de ambos escenarios exponen ventajas como disminución de plazos y flexibilidad de

recursos, y se concluye que la simulación de escenarios alimentada a partir del análisis de las líneas de balance permite la comparación y la toma de decisiones con menor incertidumbre que la proporcionada a través de la programación realizada por parte de los constructores.

Para realizar esta programación gráficamente, se pondrá en el eje X el tiempo, y en el eje Y, las divisiones del proyecto en partes físicas, el siguiente paso es trazar una línea que represente una actividad, esta abarcará en el eje X toda su duración, y en el eje Y las partes físicas en que se realiza la actividad (Revitor - Mundo BIM, 2017), por ejemplo tomando el caso de un edificio de 4 pisos que se desarrolla en 16 semanas, en el eje X irán todas las semanas de duración del proyecto y en el eje Y estarán los cimientos, piso 1, piso 2, piso 3, piso 4 y techos, así si vamos a graficar la actividad de acabados y esta actividad en cada piso toma una semana y se empieza a hacer en la semana 13, la línea en el eje X abarcaría desde el inicio de la semana 13 hasta el final de la semana 16, y en el eje Y pasaría por los pisos 1 al 4, esto se haría con todas las actividades, tal como se muestra en la Figura 7.

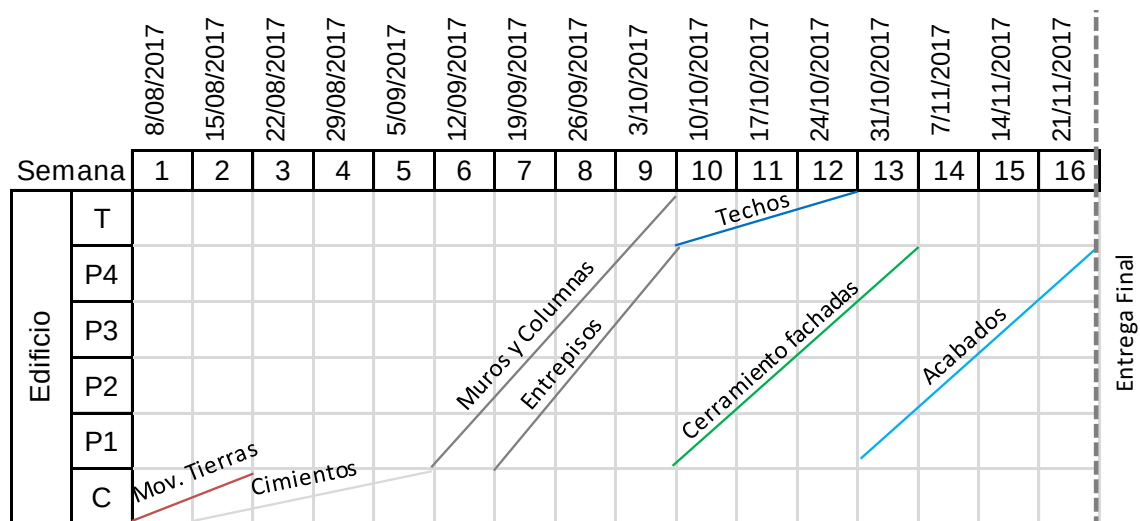


Figura 7. Ejemplo LDB
Fuente: Elaboración propia

3.5 KANBAN EN CONSTRUCCIÓN

Kanban es una expresión derivada de la combinación de dos palabras japonesas y puede traducirse como tarjeta visual o tablero visual. Es una metodología de gestión que se basa en señales visuales para la optimización de procesos continuos, desarrollada en Toyota por Taiichi Ohno, diseñador del sistema de producción Toyota o TPS, la idea de Ohno era detener la sobreproducción ya que se estaban generando grandes inventarios y costando mucho dinero, así que tomó el modelo que observó en supermercados en su visita a Detroit, donde los productos consumidos se reponían una vez eran retirados por un cliente y lo adaptó al sistema de Toyota, un Kanban como una señal que autoriza la ejecución de alguna actividad (Gemba Academy, 2018).

Esta herramienta de tipo pull, pertenece al sistema justo a tiempo o JIT por sus siglas en inglés, lo que implica que los recursos deciden cuándo y cuánto trabajo se comprometen a realizar, estableciendo límites ya que nada se ejecuta sin una señal, evitando sobrecargas de trabajo innecesarias, además de vincular físicamente el flujo de información con el trabajo a realizar (Figuerola, 2011).

Los principios del método Kanban han sido aplicados en la generación de los tableros Kanban, esta es una herramienta que facilita la visualización de problemas potenciales en el avance del trabajo, limita la cantidad de trabajo que realiza cada miembro del equipo, mejora el flujo de trabajo y facilita alcanzar un ritmo sostenible (Grupo Oxean, 2011). El primer paso para desarrollar exitosamente la metodología Kanban menciona el uso de tableros Kanban, de estos existen distintos tipos.

El tablero manual, que se realiza en un tablero físico en el que se dibujan columnas, pueden ser las tres columnas genéricas que separan actividades pendientes, en curso y realizadas, o las que se necesiten de acuerdo al tamaño y características del proyecto, este tablero se llena con post-its, donde cada uno a representa la actividad a realizar junto con toda la información de la misma, el post-it iría en la columna que le corresponde de acuerdo a la etapa en la que está la actividad (Berzal, 2014). En la Figura 8 se presenta un tablero sencillo con las tres columnas base.

El otro tipo de tablero se desarrolla de manera digital, existen distintos desarrollos que consolidan toda la información del tablero y lo comparten en tiempo real a todo el equipo, cada tarjeta es editable por lo que se le puede asignar un responsable, una fecha de vencimiento o lo que se considere necesario, Trello es uno de los programas más utilizados para esto, junto con Kanbanize, Kanban Tool, Asana, entre otros, que funcionan de maneras similares. Estos tableros le dan al equipo de trabajo un panorama y orden sobre sus actividades, y es una excelente alternativa para gestionar a tiempo cualquier contratiempo. En la Figura 9 se presenta un tablero Kanban desarrollado en Kanbanize.



Figura 8. Tablero Kanban básico
Fuente: (Kanban Tool)

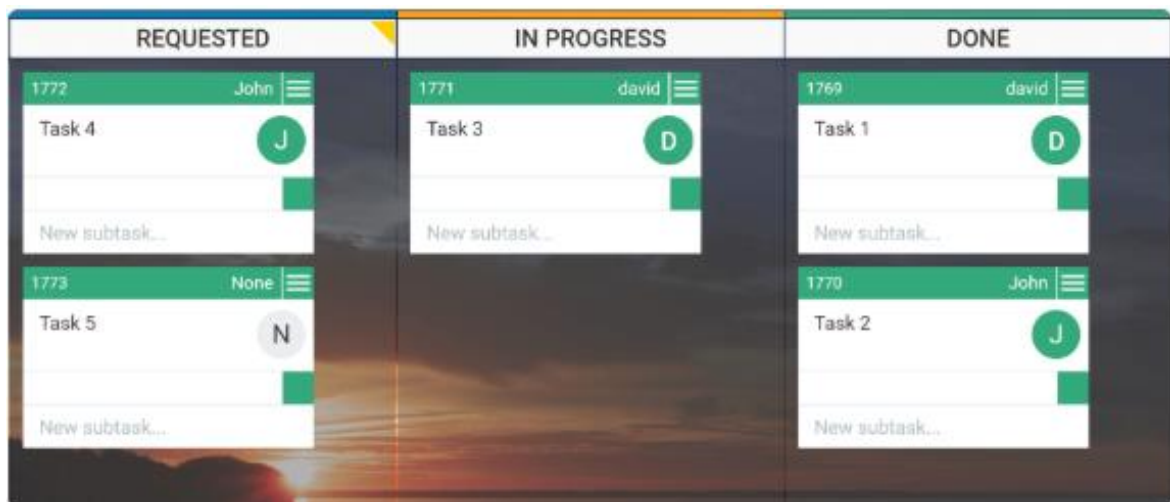


Figura 9. Tablero Kanban Kanbanize
Fuente: (Kanbanize)

El funcionamiento de este tablero se basa en una tarjeta con información de la actividad se transportará de una columna a otra dependiendo de la etapa en que

esté, es decir, si hay una tarea en la columna de pendientes y se inicia la actividad, esta tarjeta se moverá a la columna de en proceso, y al finalizar la actividad pasa a la columna de realizadas, cuando el trabajador tome una actividad debe dedicarse exclusivamente a esta y dedicarse a ella hasta terminarla, y en caso que la actividad que el trabajador este desarrollando no pueda continuar por falta de información o materiales, se debe marcar una señal adicional a esta tarjeta y mover a la columna de pendientes, con el indicativo que esa tarea está detenida y hay que gestionar los recursos para que vuelva al flujo (Grupo Oxean, 2011).

3.6 MODELADO BIM

“BIM es una tecnología de modelado, y una serie de procesos, que sirven para generar comunicar, y analizar proyectos constructivos” (Eastman et al., 2012).

BIM es una metodología de trabajo colaborativa entre proyectistas, constructores y demás agentes implicados en un proceso constructivo, permite la gestión integral de los proyectos, en todas sus fases y durante todo el ciclo de vida de un proyecto por medio de modelos virtuales entre los diferentes agentes que intervienen. Consiste en la centralización de la información en un único modelo, para que no solo se tenga un concepto visual del proyecto, sino que su representación se fundamenta en datos, existiendo una relación permanente entre el modelo y la base de datos, por lo que si se presentara un cambio, automáticamente se actualizarían los elementos afectados, así como todos los dibujos y planos que se hayan generado desde el modelo, consiguiendo un ahorro de tiempo y una optimización del proceso, y como consecuencia una mayor calidad y rentabilidad del proyecto (Fundación laboral de la construcción, 2018).

La abreviatura “BIM”, corresponde a las siglas en inglés de Building Information Modelling, que significa Modelado de Información en Construcción. Este no es un producto o programa, es una herramienta que requiere disciplina y combina una serie de programas, conocimientos, métodos y procesos encadenados, que seguirán sirviendo durante toda la vida útil del proyecto, desde su construcción, pasando por su operación y terminando en el replanteo o demolición al final del ciclo de vida del mismo. BIM es un proceso universal que puede aplicarse a cualquier tipo de construcción sea una casa, edificio, acueducto, puente, carretera o cualquier otro tipo de obra (MundoBIM, 2018). En el proceso BIM interviene todo

tipo de información, tanto planos como, levantamientos topográficos, datos de tráfico, fotos, requerimientos de tiempo y plazos, costos, materiales, normatividad y demás que se tengan a disposición, se puede integrar al diseño.

El BIM como metodología de trabajo colaborativo posee una gran ventaja, y es que permite que todos los agentes implicados en un proyecto, que ya bien se encuentren en el mismo espacio de trabajo, o estén en oficinas, ciudades o países diferentes, puedan trabajar en este, y es gracias a que el proyecto central sobre el que todos los miembros trabajan, se encuentra en un servidor al que todos pueden acceder desde cualquier lugar al hacer uso de internet (ESDIMA, 2016).

Es el trabajo colaborativo lo que hace que el modelado BIM permita a profesionales afines a la construcción, arquitectos e ingenieros, introducir al modelo la información que pueda ser de utilidad al proyecto, sin tener alguna importancia el lugar o zona horaria en que se encuentren. Una gran ventaja del uso de modelos colaborativos en BIM es que los cambios generados por cualquier miembro desde cualquier lugar, actualizará todos los elementos del modelo que tengan que ver con el cambio, así como estarán disponibles desde el mismo momento en que se realizan, para todos los miembros del equipo. Al trabajar con BIM, alcanzan su eficiencia y eficacia conceptos como comunicación, optimización, toma de decisiones, análisis de datos, entre muchos otros, integrando el proyecto en todos sus aspectos, por lo que quienes no se alineen a este sistema, estarán perdiendo una importante oportunidad.

Modelado se refiere a la toma de información, su conversión a un formato digital y el uso de esta para correr análisis matemáticos y entender cómo se relacionan unas cosas con las otras, un modelo BIM va más allá de mostrar los planos de un proyecto en 3D, que en BIM es solo uno de los productos que se generan, esta herramienta toma toda la información y la presenta de distintas formas, haciendo posible un análisis mucho más profundo de un proyecto (Revit - MundoBIM, 2018). Es destacable que no existe una solución genérica que se pueda aplicar a todos los proyectos de la misma manera, esto porque en el proceso, los requerimientos, necesidades, insumos y productos dependen del mismo proyecto que se esté realizando, este se planea y ejecuta de acuerdo a los requerimientos del cliente.

Existen diversas confusiones sobre lo que es BIM y lo que no, por ejemplo, muchas herramientas modelan en 3D pero solo muestran la geometría y no contienen propiedades del edificio o sus componentes, para ser BIM debe

contener información de la composición y el comportamiento de lo que se está modelando o no es más que una foto, otro ejemplo que tampoco es BIM es un modelo que no propague automáticamente los cambios de una vista al resto de ellas, ya que no existe una lógica que relacione estas y eso es fundamental en un modelo BIM. Muchos elementos por si solos no son BIM, sin embargo son parte del proceso, en el caso de una serie de planos 2D, por sí solo no es BIM, sin embargo hace parte de los insumos del proceso (MundoBIM, 2018).

Desde el concepto de proyecto hasta la demolición de este, este ciclo de vida es dividido en la literatura en distintas etapas o dimensiones de acuerdo al autor, a continuación se mencionan las 6 dimensiones que expone Eastman (2012):

1D: La idea de proyecto, es la primera etapa en la que se parte de una idea, puede ser una vivienda, un edificio, un puente o una carretera, en esta se definen las condiciones iniciales, la ubicación del proyecto y se hacen las primeras estimaciones como tamaños y costos, en esta etapa también se establece el plan de ejecución.

2D: El boceto o diseño conceptual, en esta etapa se prepara el software para modelar, se realizan los planos CAD tradicionales, y se hace un plan de insumos necesarios, también se definen las cargas estructurales y energéticas.

Las primeras dos dimensiones abordan tareas iniciales, planeamiento y carga de datos al software, según Hildebrandt Gruppe (2016) a partir de aquí se empieza a incluir información de profundidad para la gestión y el desarrollo:

3D: El modelo colaborativo de información del proyecto, toma toda la información recopilada y genera el modelo en 3D, en esta dimensión se trazan columnas, muros o vigas, y es en esta etapa en que los planeadores del proyecto pueden recoger o generar la información que sean de su necesidad, en esta dimensión se vinculan todas las vistas y se actualizan durante todo el ciclo de vida del proyecto.

4D: El tiempo en esta etapa es incluido al modelo, de modo que se puede establecer las etapas del proyecto e incluir el plan maestro en términos temporales, controlando la duración de las distintas actividades que se deban realizar y simulando esta ejecución, esta etapa presenta un modelo 3D que se va construyendo en el tiempo y puede enseñar cómo se va a ver el proyecto de acuerdo a una fecha, también se pueden realizar simulaciones en el tiempo para

conocer el ciclo de vida, su interacción en el tiempo con el sol, viento y lluvia entre otros.

5D: El costo se incluye al modelo en esta dimensión por medio de un análisis de cómo será el flujo de caja durante el proceso, y junto con cambios que se realicen al modelo, los cambios se van reflejando en el software de costeo, conociendo fácilmente cómo una decisión afectaría las finanzas del proyecto. Esta dimensión está enfocada en la optimización de las utilidades del proyecto, se incluyen las cantidades de materiales y se puede conocer los costos operativos del proyecto. En esta dimensión ya se puede tener una estimación de la eficiencia de las decisiones que se hayan tomado.

6D: Sostenibilidad es la sexta dimensión del modelo, en esta se incluye la información relacionada con la operación y el mantenimiento del proyecto, aquí se incluye información sobre cada elemento del edificio a modo de ficha técnica, incluyendo modo de fabricación, materiales, y modo de uso, facilitando el mantenimiento al proyecto. En esta dimensión se pueden simular las condiciones de operación del proyecto a lo largo del tiempo, tiene en cuenta la eficiencia energética y la gestión de recursos y simular las diferentes opciones para llegar a una alternativa óptima, desde antes de iniciar el proyecto.

En la literatura se encuentran publicaciones como la de Hildebrandt Gruppe (2016) donde menciona la 7D y la describe como la gestión del ciclo de vida, sin embargo esto lo incluye Eastman (2012) en la misma 6D. Asimismo con el transcurso del tiempo otros autores han incluido más dimensiones como BIM Academy (2016) que incluye 8D que es el As Built del proyecto que también está incluida en la 6B de Eastman, la 9D es Lean Construction y la 10D que es la construcción industrializada. Y así en el transcurso del tiempo se irán planteando nuevas D para incluir al modelo BIM.

A la hora de la puesta en práctica de BIM, se encuentran diferentes maneras de llevar un proceso y usar las herramientas, asimismo cada consultor tiene su forma diferente de trabajarlo, por lo que llega a causar confusiones porque cada persona desde su rol usa las herramientas de una forma diferente, es por de estos inconvenientes que surgen los estándares BIM.

Los estándares BIM son comparables con los códigos de construcción, que buscan que todos construyan o diseñen de maneras similares, ya que los estándares BIM buscan esto mismo, que todos utilicen las mismas herramientas,

diseñen y utilicen la información de maneras similares. Reino Unido es uno de los países que más ha avanzado en la definición de estándares BIM, e incluso lo exigen en las obras públicas, asimismo países como Estados Unidos y Australia han avanzado en la definición de estándares en sus países, Singapur le apunta a eventualmente tener un modelo BIM de todas sus ciudades, con todos sus edificios completamente detallado.

Dado que Reino Unido es uno de los países que más ha avanzado en la definición de estándares BIM, y en donde lo han hecho obligatorio para las obras públicas, se aborda el PAS 1192, que es el que rige allá.

De acuerdo al PAS1192-2 (2013), el análisis del ciclo de vida de un proyecto empieza por la necesidad del cliente, esta necesidad se la plantea a un consultor y este va a desarrollar un concepto, una idea con un poco más de forma acerca de cómo resolver la necesidad, una vez conceptualizado el proyecto, habrá distintas definiciones que completen la idea de que es lo que se quiere hacer, luego se pasa a un proceso de diseño en el que se generan los documentos y la información necesaria para materializar el proyecto constructivo.

A partir de aquí se pasa a la etapa constructiva en la que se convierte lo que está en el papel a un objeto, hasta aquí el modelo BIM se llama modelo de proyecto (PIM) e incluye toda la información que hasta aquí se ha desarrollado; después viene la entrega, a partir de esta etapa hasta el final del ciclo de vida el modelo BIM se llama modelo de activo (AIM), en esta etapa se concretan todas las anteriores para que lo construido empiece a ser utilizado, a partir de este momento se empieza a utilizar el bien construido en el uso que el propietario le quiera dar, con el paso de los años la construcción cumple su vida útil y puede haber dos opciones, restauración o demolición, dependiendo de su estado, cerrando así el ciclo de vida del proyecto.

En esencia, según PAS1192, BIM parte desde una idea inicial hasta la entrega final (PIM), y después de esta entrega hace un acompañamiento al cliente o propietario en el trascurso de la operación y uso del producto construido, hasta el final de la vida útil del proyecto en la que se restaura o es demolido para empezar un nuevo proyecto (AIM), en este punto el proceso BIM vuelve a empezar, formando un ciclo que a partir de cierto punto vuelve a iniciar. AIM también es conocido como el As-Built incluido en la 6D de Eastman (2012).

La información a lo largo del ciclo de vida del proyecto irá aumentando, sin embargo no estará en un solo formato o desarrollada en un solo aplicativo, el modelo BIM integra toda la información sin importar el formato que se ocupe, sean documentos en PDF, hojas de cálculo, planos constructivos, muros 3D, análisis estructurales, análisis climáticos, fotografías y demás.

Por esto el PAS1192, desarrolla un entorno compartido de datos o CDE por sus siglas en inglés, en el que se intercambia información en la nube, en formato digital, en un sistema que permite que todo un grupo de personas acceda a la información actualizada y la comparta dentro de un sistema común (Revitor - MundoBIM, 2018). Este CDE se compone de un conjunto de programas y espacios de almacenamiento que procesen la información, y puede ser tan simple o tan complicado como se decida.

Un CDE desarrollarse de distintas formas, por ejemplo puede ser tan sencillo como una red LAN dentro de una oficina, con un servidor central que almacene la información, documentos y productos, y el intercambio de información vía correo electrónico, o en otro caso el uso de Dropbox, Google Drive o OneDrive para compartir la información, Revit para el modelado, y LOD Planner o Procore para darle seguimiento al proyecto, no importa la herramienta utilizada o que tan compleja sea, lo importante es que sirva para crear un entorno compartido de datos.

Las dudas empiezan a surgir cuando se empiezan a mencionar los del proceso BIM, tal como planes y requerimientos, que en ocasiones los consultores terminan resolviendo en etapas de diseño, haciendo que la información sea extensa e incomprensible. Sin embargo el éxito de un proceso BIM, son los documentos, por lo que es muy importante que estos sean comprendidos, el PAS 1192-2 (2013) recomienda el uso de los siguientes documentos:

- EIR (Requerimiento de información del propietario). Es el primer documento y se genera en la etapa en que se detecta la necesidad que se requiere solucionar, este aporta la información respecto a lo que el propietario espera obtener de todo el proceso, así como la información que quisiera que contenga el modelo y el uso que pretende darle a esta información, es muy importante tener claros estos aspectos para satisfacer al cliente, por ejemplo si se construye una edificio y el propietario espera entregarle la información a quienes van a operarlo, esta debe incluir datos de operación y mantenimiento, pero si este propietario solo está interesado en un modelo

BIM que presente los planos con sus vistas, el modelo debería llevar justo lo que el propietario está pidiendo, por lo que es importante que en el EIR, se incluya el nivel de desarrollo que se requiere en el modelo.

- BEP (Plan de ejecución BIM). Este plan de ejecución es el que entrega un consultor, contratista o diseñador, en el que hace una propuesta, con un plan de ejecución donde en términos generales explica cómo piensa llevar a cabo el proceso, las herramientas que tiene pensado utilizar, los entregables que va a presentar, la frecuencia de entrega de estos entregables y demás, sin mayor definición. Es una propuesta de las reglas y métodos del proceso BIM, este sirve para comprobar que la propuesta del proceso esté alineada con las necesidades contenidas en el EIR.
- BEPc (Plan de ejecución BIM de contrato). No hace parte del PAS1192-2, sin embargo en la literatura MundoBIM (2018) lo separa como una segunda etapa del BEP por su importancia. Tras seleccionar un proponente, se generaría un segundo plan de ejecución que incluya información más específica sobre los miembros del equipo, como participarían, los medios que se van a usar para compartir la información, recursos y formatos específicos a usar, así como este proponente seleccionado debe confirmar que toda su cadena de proveedores, tiene la capacidad para satisfacer el EIR. La importancia de esta segunda etapa del plan de ejecución, es la frecuencia con que se da que un proponente al momento de ser contratado dice que no tienen problema para cumplir, pero durante el proceso constructivo sus proveedores o subcontratistas, no están listos para someterse a un proceso bajo la metodología BIM, se retrasan, no entregan información a tiempo, o no tiene sistemas de información compatibles. Este segundo plan de ejecución, permite evitar estas situaciones al requerir que el proponente elegido certifique la capacidad BIM de toda su cadena de suministro.
- MDP (Plan maestro de entrega de información). Este plan se basa en el plan de ejecución, contiene las reglas que indican la información que se va a entregar, en que momentos, quién es el responsable y de qué manera va a realizarse la entrega (mensualmente se actualizan los modelos, en la tercera semana entrega un RVT con el nivel de detalle acordado, las especificaciones técnicas se entregan en DOC, la tabla de oferta se presenta en CALC, se codifica en JAVA y así). La importancia de este plan

radica en el compromiso del contratista, fijado a manera de metas, si se establece un plan de manera adecuada, se tendrán entregas claras.

Mundo BIM (2013) Además de estos incluye un último documento que es el Manual de proyecto, siendo al final de todo el proceso el manual del propietario. Este incluiría lo que se identificó en el EIR.

Tras el desarrollo del MDP, se puede proceder al proceso de diseño, y al proceso de construcción, tras finalizar el proceso constructivo se entrega el proyecto al propietario. En este punto de entrega los contratistas se separan del proceso y pasan a ser los operadores quienes siguen interactuando con el proyecto realizado, utilizando el proceso BIM hasta que finalmente llega el fin de la vida útil de la construcción donde se decide si se renueva o se demuele y es aquí donde el ciclo vuelve a empezar.

BIM, entonces es un proceso que se realiza durante toda la vida útil de un proyecto constructivo, que toma información del entorno, para convertirla en digital y compartirla entre todos los participantes del proceso para ser analizada y utilizada, con el fin de generar un producto que optimice la construcción y operación del proyecto. Este proceso debe pensarse y ejecutarse con disciplina, no es un producto genérico que pueda utilizarse en cualquier proyecto, tiene una lógica, métodos y prácticas recomendables para aplicar en cada caso.

3.7 PLANIFICACIÓN TRADICIONAL VS PULL

La planificación tradicional es la zona de confort del común de los constructores, sin embargo es la resistencia al cambio lo que hace que permanezcan en este sistema ya que son más las desventajas que los beneficios que aporta y puede ser esta la razón de la mayoría de problemas comunes en el país de las obras que se retrasan.

Una planificación pull, es aquella que jala toda la cadena, es en esta planificación que más ventajas se puede apreciar, ya que los problemas son gestionados eficientemente de tal manera que no se opongan al flujo, lo que como resultado positivo trae la finalización de un proyecto exitosamente, y es por esto que en países como Reino Unido, la utilización de sistemas lean que en consecuencia son pull, son de uso obligatorio ya que esto define la productividad de un país.

En la Tabla 2 se presenta una comparación entre ambas planificaciones, para visualizar las diferencias entre ambas planificaciones.

Tradicional	Pull
Conversión de materias primas en productos	Flujo de procesos
Primero se diseña el producto y después el proceso	Los productos y procesos se diseñan simultáneamente
No se consideran todas las etapas del ciclo de vida durante el diseño	Se consideran todas las etapas del ciclo de vida durante el diseño
No diferencia los subprocesos de conversión asumiendo que todos agregan valor	Separa las actividades que si agregan valor de las que no, enfatizando en la minimización y/o eliminación de las pérdidas de un proceso
Se elige a los subcontratistas de acuerdo al costo	Se elige a los subcontratistas de acuerdo a su capacidad de colaboración
Asume que el costo del proceso se reduce si se minimizan los costos de todos los subprocesos, ignorando los efectos producidos por la interdependencia de los subprocesos	Reduce el costo minimizando y/o eliminando desperdicios

Tabla 2. Comparación modelo tradicional vs pull

Fuente: (Grupo Edifica, 2011)

4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN LA EMPRESA CASO DE ESTUDIO

La empresa estudiada se dedica a la construcción de obras civiles en el Valle del Cauca, teniendo como clientes al Estado, personas jurídicas y personas naturales, realiza obras a partir de mil millones de pesos. Desarrolla proyectos de infraestructura, plantas industriales, edificaciones comerciales e institucionales, vivienda y urbanismo, con una trayectoria de más de 40 años en el sector, cuenta con talleres de mantenimiento y reparación de equipos en Cali y Bogotá, con un área aproximada de 18.000 m², maquinaria pesada y un parque automotor, lo que le permite asumir compromisos de gran magnitud, goza de la certificación BUREAU VERITAS que incluye ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 y OHSAS 18001:2007, además de eso tiene el talento humano, la capacidad financiera y operativa que le permite emprender proyectos con altos estándares de calidad, seguridad y respeto con el medio ambiente. Su sede principal está ubicada en la ciudad de Cali, con oficinas en Bogotá y Lima-Perú.

Debido a la necesidad de atender proyectos de menor tamaño requeridos por diferentes clientes, en 2008 se crea una promotora para soportar la operación de la empresa y ayuda a ofrecer un mejor servicio ya que esta además realiza diseño de planos, ejecuta proyectos de construcción de vivienda y algunos centros comerciales de pequeña escala, y los gerencia, dejando así la construcción de proyectos de mediana escala a la promotora para enfocarse en los más grandes.

Tiene como misión desarrollar proyectos en la *cadena de valor de la construcción*, con excelencia técnica y operacional, construyendo confianza y asegurando la promesa de valor al cliente. Sostenible financiera y socialmente que comparte valor con sus grupos de interés, contribuyendo con el mejoramiento de la calidad de vida y el desarrollo de Colombia.

Y su visión es en el 2023 ser una organización actora en el desarrollo, crecimiento y competitividad de Colombia cumpliendo con el acuerdo de acreedores. Admirada por la innovación, calidad técnica, operativa y de gestión que desarrollamos en los proyectos en la *cadena de valor de la construcción*. Preferida los nuestros clientes, proveedores y colaboradores por el cumplimiento de la promesa de valor y contribución en crecimiento y calidad de vida. Referente, por compartir valor con los colaboradores y la sociedad en general.

5. PROPUESTA DE UN SISTEMA PULL EN CONSTRUCCIÓN

5.1 VALOR

El primer principio de la filosofía lean es el la especificación del valor desde el punto de vista del cliente, este concibe el valor como su producto final en la calidad esperada, en el tiempo estipulado y al menor precio.

En términos de tiempo la empresa permanentemente está investigando la cantidad de tiempo que el cliente está dispuesto a esperar para que se le entregue el proyecto solicitado. Por lo general el principal cliente es el Estado; el cuál prefiere que el tiempo de duración de las obras contratadas sea acorde con el tamaño y necesidades particulares de cada proyecto, por ejemplo, si se necesita un puente peatonal en la ciudad, en términos de tiempo para el cliente (Estado) el valor está en recibir la infraestructura dentro de los parámetros de tiempo definidos en las cláusulas contractuales o de acuerdo a las condiciones de la licitación.

En términos de calidad, la empresa tiene en cuenta las características esperadas por sus clientes para planificar la realización de la obra, especialmente en las etapas previas a la construcción, (diseño y planeación) se encarga de trabajar conjuntamente con el cliente para asegurarse que la estructura se realizará perfectamente de acuerdo a las necesidades y expectativas de este. En estas primeras etapas se genera un documento que de manera explícita define los requerimientos de calidad del cliente, en el caso de edificaciones de vivienda por ejemplo, en el documento tanto los usuarios como los gestores de la implantación de la construcción participan. Así se asegura la empresa que la calidad del producto final sea acorde a lo proyectado.

En términos de precio, teniendo en cuenta la calidad señalada por el cliente y el tiempo estipulado, la empresa busca la opción con el mejor precio para el cliente, ofreciéndole un conjunto de opciones que podrían optimizar el uso de los recursos financieros y dejando en sus manos la elección de alguna de estas. La empresa constantemente se encuentra en la búsqueda de procesos que minimicen ineficiencias que acrecienten los costos transferidos al cliente en el precio final, en la búsqueda de un mayor valor y satisfacción para el cliente.

5.2 CADENA DE VALOR

Para tener una visión clara, de cómo realiza esta empresa el proceso constructivo, se detalla el proceso de planeación general y se describe una obra finalizada, esta consistió en la construcción de un edificio de parqueaderos, que va a ser el caso ejemplo para todas las consideraciones que se tendrán en adelante en el documento.

En la Tabla 3 se muestra el diagrama SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer), que es una herramienta que permite analizar procesos de una manera de detallada:

Supplier Proveedor	Input Entrada	Process Proceso	Output Salida	Customer Cliente
Cliente	Propuesta	Negociación	Paquete de especificaciones	Adjudicación del contrato
Negociación	Paquete de especificaciones	Adjudicación del contrato	Planos, Presupuesto, EDT nivel 3	Planificación del proyecto
Adjudicación del contrato	Planos, Presupuesto, EDT nivel 3	Planificación del proyecto	Presupuesto meta, Plan de calidad, Plan de pruebas y resistencias, EDT completa, Cronograma, Personal e Insumos	Contratación según lo planeado

Supplier Proveedor	Input Entrada	Process Proceso	Output Salida	Customer Cliente
Planificación del proyecto	Presupuesto meta, Plan de calidad, Plan de pruebas y resistencias, EDT completa, Cronograma, Personal e Insumos	Contratación según lo planeado	Recursos contratados según cronograma	Ejecución de proyecto
Contratación según lo planeado	Recursos contratados según cronograma	Ejecución de proyecto	Avances por porcentaje	Seguimiento
Ejecución de proyecto	Avances por porcentaje	Seguimiento	Inconformidades detectadas y corregidas, aprobación de cuota	Entrega de Proyecto
Seguimiento	Inconformidades detectadas y corregidas, aprobación de cuota	Entrega de Proyecto	Entrega a satisfacción, cobrar saldo, pagar multas	Cliente

Tabla 3. SIPOC – Descripción del proceso

Fuente: Elaboración propia

La información contenida en el SIPOC se obtiene por investigación cualitativa que es aquella que se basa en la obtención de datos en principio no cuantificables, basados en la observación, de esta se obtienen datos que pueden ser operados con el fin de ser analizados, haciendo que la explicación acerca del fenómeno estudiado sea más completa. Las personas fueron la principal fuente de información en este método de investigación, se realizó entrevistas con el gerente administrativo, directores de obra, almacenistas y maestros, cada uno desde su punto de vista, cargo y experiencia tuvo algo diferente para aportar.

El proceso descrito en la Tabla 3, se separa en tres etapas clave, negociación, planificación, y ejecución y seguimiento.

En la negociación el departamento comercial recibe la propuesta del cliente junto con los planos y el tiempo en que el cliente desea se realice, con los planos se genera un presupuesto y se hace la negociación del pago para que finalmente se adjudique el contrato. El presupuesto acordado se le entrega a la obra con el paquete de especificaciones.

En la planificación la oficina comercial hace una estructura de desglose de trabajo o EDT de tercer nivel, que es una herramienta de proyectos que consiste en una descomposición jerárquica muy utilizada en la gestión de proyectos, esta se enfoca en el entregable y lo hace por medio de la identificación de paquetes de trabajo, responsables y recursos necesarios para completar tales paquetes, y cada nivel descendente de la EDT representa una definición con un detalle incrementado del trabajo del proyecto (RIB Spain SA, 2018).

En la obra se completa la EDT, después con base en el presupuesto entregado se hace un presupuesto meta para tener un control sobre esto y no pasarse, y se hace el plan de calidad y ensayos (pruebas y resistencias), para esto es necesario tener el contrato con todas las especificaciones.

A partir de los factores definidos, se diseña el organigrama de la obra, se define el personal que se va a necesitar entre personal fijo de la empresa y contratistas y subcontratistas, se hace el presupuesto de los insumos en las fechas que se van a necesitar y se entrega a compras para que lo vaya suministrando en el momento adecuado, esto se hace por medio de Microsoft Project y es la herramienta utilizada para hacer seguimiento de estos. Se define el tipo de contratistas (mano de obra o a todo costo). Se hace la planeación de los equipos necesarios en cada etapa.

En este punto de la planificación todo se realiza a nivel administrativo y no se incluye a los planeadores de cada especialidad, lo que puede generar que se haga una planificación diferente a lo que realmente se va a necesitar y es algo que si se ha presentado anteriormente.

En la etapa de ejecución y seguimiento, la oficina técnica hace la contratación de insumos, personal y maquinaria en el momento que se van necesitando en la obra, el almacén recibe estos y los va suministrando de acuerdo a la ejecución.

Se realiza el proceso constructivo de acuerdo a las especificaciones del cliente, es importante resaltar que en muchos casos estas especificaciones cambian durante la ejecución por parte del mismo cliente, se presenta en la mayoría de casos que el cliente entrega los planos el mismo día que se debe empezar una actividad, esto afecta los tiempos de entrega ya que la empresa se encuentra con condiciones que recién está conociendo y debe hacer un plan de acción. Se hace seguimiento al desarrollo de la obra por medio de la entrega de cuotas, el maestro debe aprobar y liberar cuotas, así como el interventor firmar y esto se le presenta a las gerencias técnica y administrativa.

Finalmente cuando la obra termina, la gerencia técnica la recibe y la gerencia general hace entrega al cliente, en este punto se cobra el saldo y en algunas ocasiones se paga las multas generadas por días de retraso, en este punto se revisan las bitácoras de obra, que es el instrumento de trazabilidad utilizado por la empresa, en ese escriben el director de construcción, el director de obra, interventor y residentes.

Los procesos de construcción no se encuentran estandarizados, debido a las novedades o particularidades presentes en cada proyecto, para efectos de este estudio se toma un proyecto terminado de construcción vertical, una torre de parqueaderos y oficinas administrativas de una clínica. La información presentada en la Tabla 4 es extraída de la bitácora de obra y el cronograma de obra, este último es diligenciado por la empresa en diagramas de Gantt, esta es una herramienta gráfica que se utiliza para ilustrar el tiempo de dedicación previsto para diferentes actividades a lo largo de un tiempo total (Sinnaps, 2017).

En la Tabla 4 se describe en detalle la ejecución de dicha obra:

Supplier Proveedor	Input Entrada	Process Proceso	Output Salida	Costumer Cliente
Topógrafo	Levantamiento topográfico	Preliminares	Cerramiento, Localización y Replanteo	Excavación
Preliminares	Cerramiento, Localización y Replanteo	Excavación	Nivelación de terreno, excavación de zapatas y vigas de cimentación	Cimentación
Excavación	Nivelación de terreno, excavación de zapatas y vigas de cimentación	Cimentación	Fundición de zapatas y vigas de cimentación	Estructura
Cimentación	Fundición de zapatas y vigas de cimentación	Levantamiento de Estructura	Columnas, vigas de amarre, escaleras, losas, muros de contención	Mampostería
Estructura	Columnas, vigas de amarre, escaleras, losas, muros de contención	Levantamiento de Mampostería	Muros (paredes), fachadas, lagrimales, sillares, dovelas, cunetas	Instalaciones hidrosanitarias y eléctricas
Mampostería	Muros (paredes), fachadas, lagrimales, sillares, dovelas, cunetas	Instalaciones hidrosanitarias y eléctricas	Aparatos sanitarios, tuberías, cajas, acometida	Pisos
Instalaciones hidrosanitarias y eléctricas	Aparatos sanitarios, tuberías, cajas, acometida	Elaboración de pisos	Pisos impermeabilizados y enchapados	Cubierta
Pisos	Pisos impermeabilizados y enchapados	Instalación de Cubierta	Impermeabilización, estructura metálica, teja	Carpintería

Supplier Proveedor	Input Entrada	Process Proceso	Output Salida	Costumer Cliente
Cubierta	Impermeabilización , estructura metálica, teja	Instalación de Carpintería	Carpintería metálica, en aluminio, madera, vidrio y acero	Acabados
Carpintería	Carpintería metálica, en aluminio, madera, vidrio y acero	Realización de Acabados	Cielos falsos, pintura, enchape, muros	Detallado, aseo final y entrega

Tabla 4. SIPOC – Ejecución de obra

Fuente: Elaboración propia

La obra descrita en el SIPOC de la Tabla 4 consistió en una torre de parqueaderos y oficinas administrativas de una clínica, el edificio se compone de 7 pisos y 3 sótanos. Este proyecto se caracterizó por haber tenido diferentes contratiempos que impactaron durante la ejecución y los tiempos de entrega, los más representativos fueron:

- En la etapa de excavación se presentaron lluvias que detuvieron en total aproximadamente un mes de operación dado el peligro de trabajar en terreno de barro, el daño a las máquinas y que los botaderos no reciben tierra removida cuando llueve.
- En la cimentación se presentaron hormigueros en la base de los elementos, esto son agujeros que se presentan en el hormigón por falta de vibrado cuando se funden los elementos (Arte y arquitectura, 2006).
- Hubo demora en la entrega de información a pesar de utilizar el correo electrónico como principal canal de información, tratándose de planos o definición en diseños, se debía solicitar la misma información en repetidas ocasiones para poder continuar.
- El contratista hidrosanitario (externo) en varias ocasiones no entregó su trabajo a tiempo retrasando otras actividades que estaban programadas, como es el caso de retrasos por parte del contratista en entregar listos los posos de succión, filtros o drenajes para empezar a fundir losa, el 15 de septiembre de 2014 ya se presentaban dos semanas de retraso en la fundición de losa.

- El terreno presentaba características desconocidas o no incluidas en los planos, como el caso de anclajes o cámaras preexistentes bajo tierra que aparecen durante la excavación, al aparecer situaciones así se debe reunir al comité para tomar decisiones y continuar.
- Los materiales que suministró el cliente se comportaron de maneras inesperadas, en el caso de esta obra el concreto estaba presentando fisuras por lo que el interventor no aprobaba las cuotas, así que el mismo proveedor tuvo que asistir a revisar las fisuras, en este caso tuvo que aceptar que su producto tenía defectos y lo corrigió, pero hubo tiempo perdido utilizando este insumo.

La obra inició en Enero del 2014 y terminó en Marzo de 2017, teniendo aproximadamente un año de atraso, atribuible a las causas mencionadas anteriormente. Es importante resaltar que las instalaciones hidrosanitarias y eléctricas las realizó otro contratista, se tiene en cuenta en el diagrama a manera informativa pero de este no se tiene información, es evidente que no hay comunicación con los otros contratistas en temas de cronograma lo que hace que el trabajo no sea organizado y se generen retrasos por la espera a que un contratista realice su labor. Según Burgos & Vela (2015) la falta de coordinación con contratistas y subcontratistas es una de las principales causas de retrasos en la industria de la construcción.

Para aclarar la situación actual es pertinente hacer un diagrama que permita visualizar la cadena de valor y los eslabones que la componen, en la Figura 10 se muestra el Value Stream Mapping (VSM) para el proceso de levantar un muro, este se construye con la información suministrada por la empresa de un estudio de tiempos realizado mientras se desarrollaba la obra estudiada.

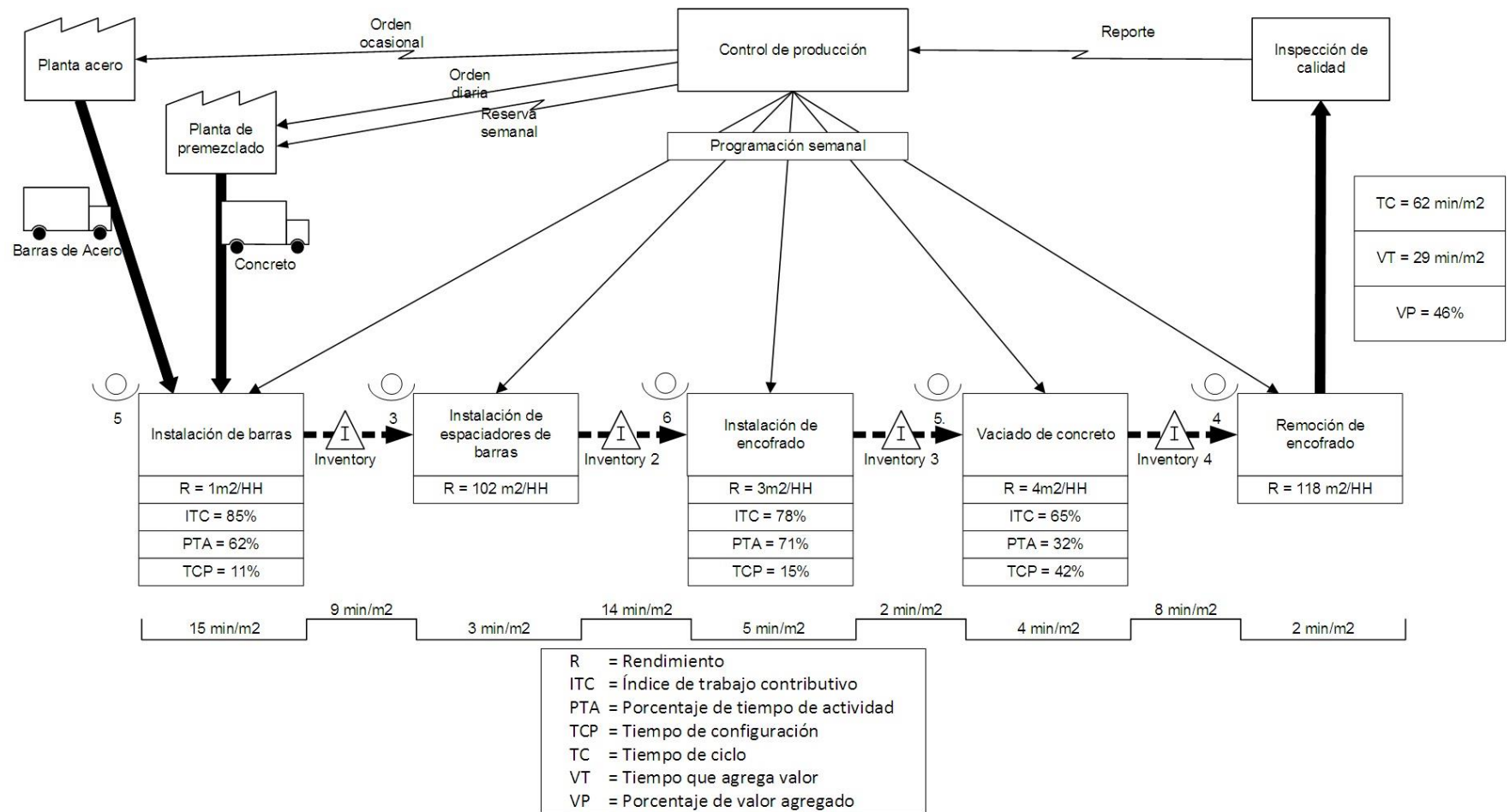


Figura 10. VSM Estado actual
Fuente: Elaboración propia

Al analizar la cadena de valor desde el VSM, se identificaron distintos problemas descritos así:

Variabilidad del proceso: Existe evidencia de una gran variabilidad en los indicadores de duración, rendimiento y porcentaje de tiempo de actividad (PTA). En el mapa se enseñan los valores promedio, pero se presentó gran dispersión, en el caso de la duración de la instalación de barras de refuerzo se presentó una variación del 52% con un promedio de 19 min/m² y un rango de 8 a 36 min/m², igualmente se presentó con la instalación de encofrados y el vertido de hormigón, ambas actividades presentan un 39% de variación en sus duraciones. El mapa también evidencia que la instalación de barras de refuerzo requiere en promedio de 19 min/m², pero el PTA indica que solo el 62% de ese tiempo representa trabajo contributivo, el resto del tiempo esta actividad está inactiva. Otros problemas que crean variabilidad son las ambigüedades técnicas del diseño, los cambios y la planificación imprecisa, y la mala definición del trabajo completado y las responsabilidades.

Dificultades en la gestión de recursos humanos: El índice de trabajo contributivo (ITC) muestra que el uso de los recursos humanos de los subcontratistas es mejor que el del contratista general. En el análisis de la información suministrada el ITC para la instalación de barras de refuerzo es del 85%, y esta actividad la realiza un subcontratista, pero para el vertido de concreto, que es realizado por el contratista general, el ITC es solo del 65%. El bajo nivel de este indicador puede explicarse por una serie de factores, como que la llegada de suministros a menudo se retrasa y como resultado los trabajadores permanecen inactivos, los equipos son demasiado grandes y esto genera aglomeración entre los trabajadores, las cuadrillas no tienen claro qué hacer o cómo realizar el trabajo, y que los trabajadores toman descansos no autorizados excesivos.

Grandes inventarios: Varias actividades produjeron grandes cantidades de inventario acumulado, como la instalación de separadores de varilla corrugada, presentó un promedio de 351 m² de inventario (equivalente a aproximadamente tres secciones de pared). Las observaciones en el lugar demostraron que esto sucede porque cada equipo intenta producir la cantidad máxima de unidades que puede, sin considerar si el próximo equipo está listo para recibirlas. Estas unidades acumuladas permanecieron dispersas por el sitio y expuestas a daños por maquinaria, equipo o el trabajo en actividades cercanas.

Sincronización de flujo de valor: Un aspecto muy importante en flujo de valor es la sincronización con lo demandado por el cliente (entendiéndose que el cliente no es únicamente el consumidor final, entiéndase que cada actividad es un cliente de su actividad anterior). En general, la demanda está relacionada con la calidad, el costo y el cronograma, y durante el estudio varios problemas relacionados con estos se presentaron. Los errores y defectos de calidad a menudo ocurrieron durante la instalación de encofrados o vertido de hormigón. El cumplimiento de la programación se indica mediante los gráficos que separan el porcentaje de entregas tarde, a tiempo y temprano, la tendencia general es a terminar las actividades más tarde de lo programado, en el caso del vertido de hormigón, el 94% del tiempo la se completa más tarde de lo programado.

Se realiza un simulación con Process Simulator que arroja lo contenido en la Figura 11:



Figura 11. Simulación estado actual

Fuente: Elaboración Propia

5.3 FLUJO DE VALOR

Según Rubiano O., “BIM es un sistema de trabajo colaborativo, que utiliza recursos y herramientas tecnológicas para el trabajo y la discusión simultanea

durante el ciclo de vida de una obra, para contribuir al flujo de valor”. En la Figura 12, se presenta el Diamante BIM, que compara los pilares de un enfoque BIM.

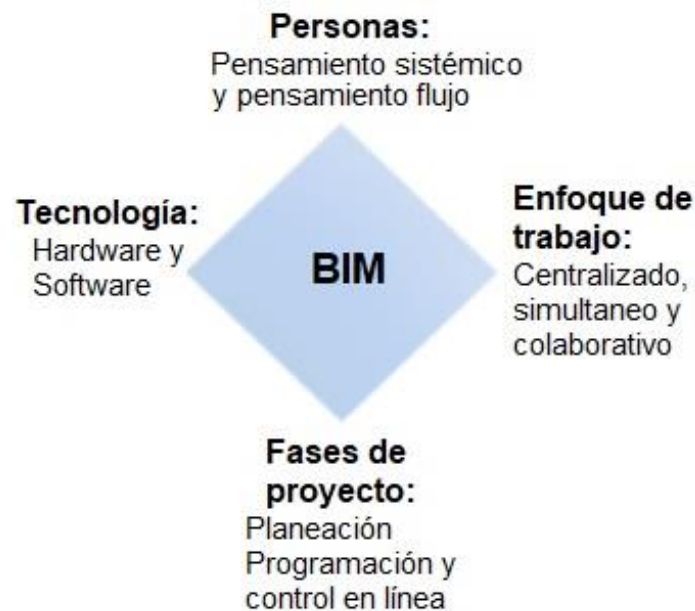


Figura 12. Diamante BIM
Fuente: Elaboración propia

BIM es la nueva metodología de trabajo que cambia los roles y relaciones entre los participantes, facilitando procesos constructivos y de diseño con mayor integración, lo que representa proyectos con mayor calidad a menor costo con menores plazos de entrega (Principe Gonzales).

Se espera que una vez implementada esta metodología los cambios sean notorios, en la Tabla 5 se evidencian los distintos beneficios de implementar BIM:

Modelo Tradicional	Uso de BIM
Los cambios deben informarse a todas las partes por medio de correos y reuniones, la información tarda en llegar a todas las partes	Cualquier cambio en el diseño se refleja automáticamente en todos los modelos BIM
Debe hacer una transición extensa para pasar a la industria 4.0	Se adapta a la industria 4.0

Modelo Tradicional	Uso de BIM
Reprocesos a la hora de generar la documentación del proyecto	La documentación del proyecto se genera automáticamente
Los problemas se detectan en la ejecución y se deben resolver sobre la marcha	Se detectan y resuelven problemas anticipadamente
Desarrollo conocido como "Comunicación sobre la pared"	Su base es la ingeniería Concurrente o simultanea

Tabla 5. Beneficios BIM
Fuente: Elaboración Propia

Además de estos beneficios, la Figura 13 compara en costo y esfuerzo, en las distintas etapas del proyecto.

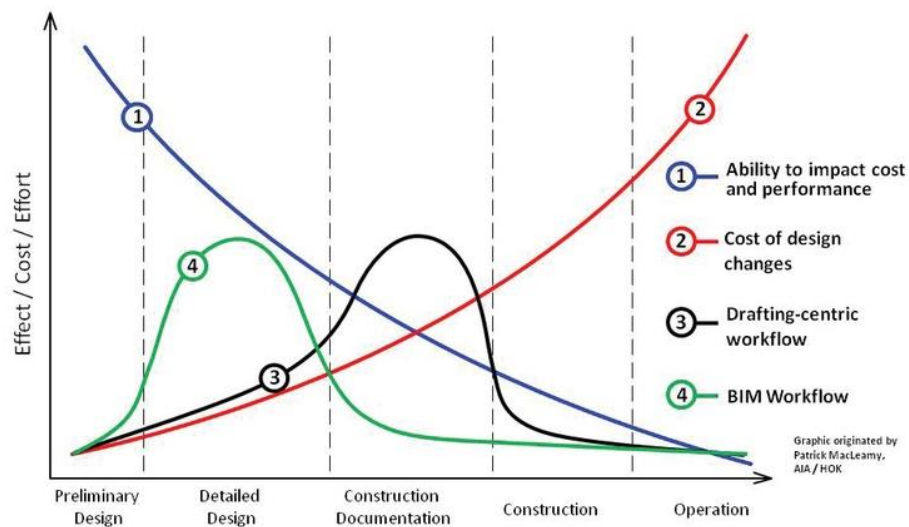


Figura 13. Modelo tradicional vs BIM
Fuente: Patrick MacLeamy

La curva presentada por primera vez en el 2005 por Patrick MacLeamy, CEO de HOK (Hellmuth-Obata-Kassebaum), esta grafica muestra cómo se toman las decisiones a lo largo de un proyecto, la planificación tradicional suele ubicarse en la segunda línea, que toma las decisiones sobre la marcha lo que resulta en un

costo que incrementa a medida que avanza el proyecto. Igualmente con una mejor planeación se llega a ubicar en las líneas 1 y 3, que no tienen el mayor costo pero si un gran esfuerzo ya que el primero toma todas las decisiones desde el inicio lo que es un gran esfuerzo, y el tercero que refiere a una mejor planeación pero que aun así consume más esfuerzo y costos que la curva BIM que solo requiere un esfuerzo medio en la etapa de diseño.

Ahora, en la Tabla 6, se hace el análisis de valor agregado, este sirve para analizar los síntomas que se están presentando, sus causas y encontrar mejoras que permitan un flujo de valor.

Una vez identificadas posibles mejoras es pertinente plasmar esto en un mapa futuro. La Figura 14, contiene las herramientas mencionadas y presenta un estado futuro de la cadena de valor.

ANÁLISIS DE VALOR									
SINTOMA	DESCRIPCIÓN	MUDA						CAUSA	MEJORA
		SOBREPRODUCCIÓN	TRANSPORTE	ESPERAS	INVENTARIO	DEFECTOS	PROCESOS INNECESARIOS		
Variabilidad del proceso	Existe evidencia de una gran variabilidad en los indicadores de duración, rendimiento y porcentaje de tiempo de actividad							Ambigüedades técnicas del diseño, los cambios y la planificación imprecisa, y la mala definición del trabajo completado y las responsabilidades.	Implementación de modelos BIM, que como herramientas colaborativas hace llegar en tiempo real a todos los interesados, cambios, planos, planes, diseños y trabajo a realizar
Dificultades en la gestión de recursos humanos	El índice de trabajo contributivo muestra que el uso de los recursos humanos de los subcontratistas es mejor que el del contratista general							La llegada de suministros a menudo se retrasa y como resultado los trabajadores permanecen inactivos, las cuadrillas no tienen claro qué hacer o cómo realizar el trabajo, y los trabajadores toman descansos no autorizados excesivos.	Kanban como herramienta para asignar trabajo es ideal para solucionar este síntoma, ya que el trabajo se asigna y comparte en tiempo real a todos los interesados, asimismo el supervisor puede hacer seguimiento al trabajo del personal

ANÁLISIS DE VALOR										
SINTOMA	DESCRIPCIÓN	MUDA							CAUSA	MEJORA
		SOBREPRODUCCIÓN	TRANSPORTE	ESPERAS	INVENTARIO	DEFECTOS	PROCESOS INNECESARIOS	MOVIMIENTOS		
Grandes inventarios	Varias actividades producen grandes cantidades de inventario acumulado								Esto sucede porque cada equipo intenta producir la cantidad máxima de unidades que puede, sin considerar si el próximo equipo está listo para recibirlas. Estas unidades acumuladas permanecen dispersas por el sitio y expuestas a daños por maquinaria, equipo o el trabajo en actividades cercanas.	Línea de Balance es una herramienta de programación y control que permite asignar recurso humano a cada actividad de acuerdo a la cantidad necesaria de producto terminado, así si se necesita una cantidad determinada, se asigna el personal necesario a esto, al terminar se reasigna el personal a la siguiente actividad, generando homogeneidad en el producto terminado

ANÁLISIS DE VALOR										
SINTOMA	DESCRIPCIÓN	MUDA							CAUSA	MEJORA
		SOBREPRODUCCIÓN	TRANSPORTE	ESPERAS	INVENTARIO	DEFECTOS	PROCESOS INNECESARIOS	MOVIMIENTOS		
Sincronización de flujo de valor	Se tiende a terminar las actividades más tarde de lo programado								Esto se da por el modelo de planeación utilizado ya que no se contemplan problemas que retrasan las actividades	Last Planner es una herramienta de planificación que se encarga en sus distintas etapas de asignar el trabajo de acuerdo a lo que se necesita, haciendo un seguimiento riguroso al porcentaje de actividades completadas, así se toman medidas sobre la marcha para que las actividades se terminen de acuerdo a lo programado

Tabla 6. Análisis de Valor Agregado
Fuente: Elaboración Propia

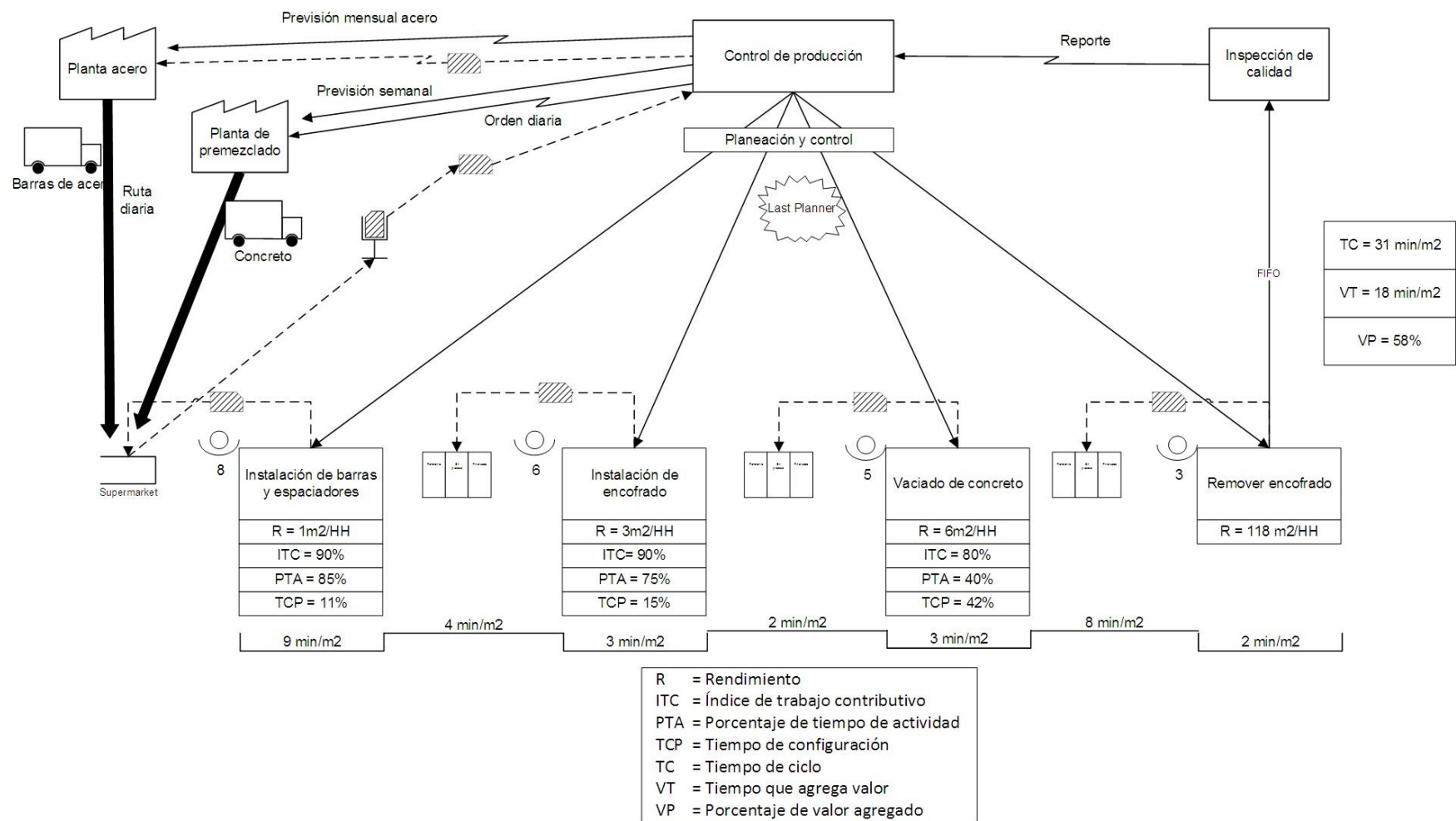


Figura 14. VSM futuro
Fuente: Elaboración propia

Las mejoras consideradas para hacer el estado futuro comprenden lo siguiente:

Las actividades instalación de barras de refuerzo e instalación de espaciadores de varilla corrugada se unifican en una actividad única, esto para que solo sea requerida una cuadrilla que realice el trabajo de manera continua para maximizar el tiempo de valor agregado, eliminando el inventario.

Para el sistema de producción se considera dos tipos de Kanban, uno de material en la actividad de instalación de barras y espaciadores y otro de fase presente en las demás actividades, que limita el WIP (trabajo en proceso), evitando la sobreproducción

Para los suministros se establece un nuevo programa que asegure un flujo continuo de suministros (barras de acero). En el estado actual, las barras de acero se hacen ordenes ocasionales, mientras en el mapa futuro se establece una provisión mensual y se incorpora un Kanban que indique cuando se retira un elemento del almacén, y le envíe una señal a control de producción para que este le envíe otra señal al proveedor de acero, asegurando así el flujo de suministros.

Al simular el estado futuro con Process Simulator se obtiene lo contenido en la Figura 15:

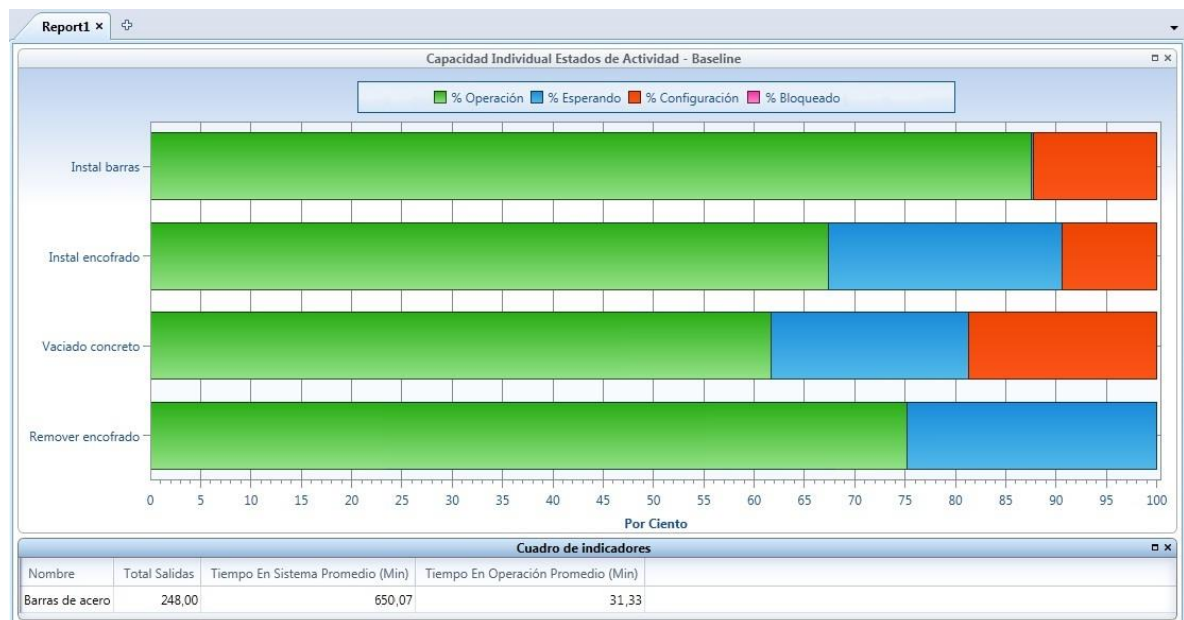


Figura 15. Simulación estado futuro
Fuente: Elaboración Propia

Además la Tabla 7, compara los resultados del estado actual con los resultados del estado futuro

Actividad		Estado actual	Estado futuro BIM
Instalación de barras de refuerzo	de	Duración: 19 min/m ² Operarios: 5	Duración: 9 min/m ² Operarios: 8
	de	Duración: 3 min/m ² Operarios: 3	
Vaciado de concreto	de	Índice trabajo contributivo 65%	Índice trabajo contributivo 80%
Suministro Barras de acero		Orden ocasional	Previsión mensual, señal Kanban de reposición
Tiempo de ciclo		62 min/m ²	31 min/m ²
Porcentaje de valor agregado		46%	58%
Salidas m ²		77	248
Tiempo sistema	en	3 días laborales	1,5 días laborales

Tabla 7. Comparación estado actual vs estado futuro
Fuente: Elaboración propia

5.4 PULL

La propuesta para un sistema pull construction incorpora el uso de herramientas que aseguren el flujo de valor, así como un ritmo de producción sostenido y controlado, y una gestión en línea de recursos al proceso constructivo. A continuación se describe las herramientas que contribuyen a la propuesta.

5.4.1 LAST PLANNER

Uno de los objetivos de la filosofía Lean construction para lograr resultados, es hacer que el valor fluya de manera continua, por esto pull es una finalidad de implementar sistemas Lean, y en el sector de la construcción este sistema es aplicado a los procesos repetitivos. Es por esto que se concibe la idea de un sistema pull en construcción al incorporar herramientas que trabajen en conjunto por conseguirlo.

En la planificación de un proyecto constructivo, interactúan en la conformación del plan maestro o plan inicial, personas que probablemente en adelante tendrán una relación mínima con la ejecución de la obra, por lo que este plan se hace bajo un alto nivel de incertidumbre, ya que no se sabe los problemas que surgirán al ejecutar la obra, que pueden estar asociados entre otros al tipo de suelos trabajados, cambios en el diseño, flujo de suministros a la obra o calidad de los mismos, por lo que se hace muy difícil que en la obra se siga al pie de la letra lo planeado inicialmente. Ante esta situación, es ideal utilizar el sistema de planificación y control de proyectos Last Planner® desarrollado por los profesores Ballard y Howell pertenecientes al Lean construction Institute, que es una planeación pull del proyecto mediante el despliegue de las actividades necesarias y las precedencias entre ellas.

La presencia de últimos planeadores, que pueden ser maestros, ingenieros de obra, residentes, capataces o supervisores, en la realización del plan maestro, es clave, ya que estos desde su misma experiencia adquirida en terreno pueden contribuir a la realización de planes más flexibles, con información precisa y restricciones reales, contribuyendo a que el plan contemple los detalles que no contempla un plan bajo los modelos tradicionales. Es fundamental para este modelo tener claro que este principio no se debe omitir.

Este último planeador, al estar directamente involucrado con la obra, además de contribuir a la construcción del plan inicial, se debe encargar de desarrollar un plan intermedio y un plan semanal que controle la obra de tal forma que los contratiempos se puedan gestionar de manera efectiva y el trabajo se realice de acuerdo al plan, también este debe controlar el indicador del porcentaje de actividades completadas PAC, para llevar un control real de la obra (Barría, 2009).

5.4.2 KANBAN

Una vez se tiene definido un plan con la metodología LPS, se procede a definir el Kanban, y esta relación es la que asegura el *flujo* en el modelo. Kanban es un sistema de control de flujo de la obra, mediante la reposición de trabajo entre dos fases o estados del proyecto, a partir de señales y políticas de transferencia del trabajo (límites de trabajo en marcha), es un instrumento para lanzar trabajo.

Agrupar estas tarjetas en un tablero le da orden a las actividades, y posibilita que se visualice el flujo, ya que se compara cronológicamente lo planeado con lo realizado y son las mismas personas que realizan su labor quienes van reportando lo que han hecho y continúan con la siguiente actividad programada. Con el uso de Kanban, al tener todas las tareas en un solo sitio, todos los miembros del equipo se mantienen al corriente con su trabajo, además de contribuir al seguimiento del tiempo para evaluar el trabajo con precisión.

Los tableros Kanban se pueden hacer físicos o digitales, los últimos facilitan la interacción en grandes obras y son preferibles, ya que la información está disponible en línea y todas las novedades se actualizan automáticamente para todos los participantes, además algunos software permiten incorporar el plan inicial y semanal. Aun así el uso del tablero físico no se descarta y es preferido cuando las implementaciones tecnológicas pueden ser costosas. En la Figura 16 se presenta un Kanban con varias columnas, diferenciando el trabajo por proyecto y separando las columnas por estado.

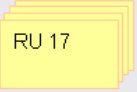
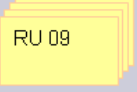
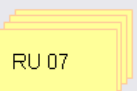
Proyecto	Pendiente	Desarrollo			VAL (3)	Hecho	En Prod
		AF	Code & Pru	Hecho			
Proyecto A: 2 Esf: 7% - 9% Fecha: 30/11/12 · 15/12/12		(1)	(5)				
		C_RU2	RU 13 30/10	RU 14 31/10	RU 16 <i>Espera datos</i> 28/09		RU 11
			C_RU3				
Proyecto B: 1		(2)	(4)				
		RU 6 30/09	RU 1 30/03	RU 10 30/06		RU 12 21/09	RU 2 30/09
			RU 21				
Proyecto C: 1 Esf: 11%-10,5% Fecha: 16/11/12 · 16/11/12		(1)	(4)				
		RU 02	RU 04 30/10		RU 03 15/10		
			RU 6 27/09				

Figura 16. Tablero Kanban
Fuente: (teodorabozheva, 2012)

En la industria de la construcción este concepto ha sido poco explorado, sin embargo, complementa la planificación y el control del cumplimiento de actividades.

Basado en la propuesta de Gilibets (2013), se propone lo siguiente a tener en cuenta para visualizar y controlar el flujo:

- Definir el flujo de trabajo del proyecto: Para esto se debe tener el plan inicial, es aquí donde se define cuanto va a durar el proyecto, duración de tareas, material y mano de obra necesarios, esto siempre teniendo en cuenta el presupuesto disponible, a partir de este se hace una programación semanal y una programación a futuro, y es con esto que se programa el personal y se distribuye el trabajo, definiendo el flujo que tendrá el proyecto.
- Visualizar las fases del ciclo: Kanban se basa en el desarrollo incremental, dividiendo el trabajo en partes, por lo que es importante tomar todo el trabajo y dividirlo en fases con distintas tareas, lo que le da al equipo una visión de la carga total de trabajo que está asumiendo, lo que clarifica el trabajo a realizar, las tareas a realizar por cada equipo, prioridades y metas.

- Stop Starting, start finishing: “Pare de empezar, empiece a terminar”, es el lema de la metodología Kanban, el trabajo debe estar limitado y se debe terminar una tarea para empezar otra, así el trabajo que está en curso se prioriza en lugar de iniciar una nueva tarea. La metodología Kanban sugiere que se defina un número máximo de tareas para cada fase. Asimismo cada actividad terminada mejora el PAC, que es el indicador que mide el desempeño de la obra.
- Control del flujo: Consiste en mantener un flujo constante de trabajo para el equipo, controlar las tareas que están en espera y realizar un seguimiento que no interrumpa las actividades del equipo.

También se recomienda el uso de tableros Kanban electrónicos, ya que estos son complemento ideal de BIM ya que se actualizan en tiempo real y permiten supervisar el trabajo con facilidad.

5.4.3 LINEA DE BALANCE

El ritmo se define como una repetición periódica, de cadencia regular o con ligeras alteraciones. Es justamente esto lo que se visualiza cuando una obra es programada con el método de LDB, esta permite programar y controlar proyectos repetitivos. Esta entre una gran variedad de herramientas utilizadas en proyectos como CPM (Método de la Ruta Crítica), PDM (Método de Diagramas de Precedencias) y PERT (Técnica de Programación, Evaluación y Revisión), es de las técnicas de programación lineal más utilizadas, y son las adecuadas para el manejo de proyectos como construcción de carreteras, desarrollos habitacionales, puentes y otros que están caracterizados por ser operaciones repetitivas (Arcila, 2012). Sin embargo esta es la ideal a utilizar para la propuesta ya que dentro de la misma programación se pueden detectar contraflujos y corregir inmediatamente, asimismo se puede visualizar fácilmente alternativas que permitan mejorar la programación inicial de un proyecto.

Con el uso de la programación con LDB, inicialmente se muestra la situación ideal de un proyecto en cuanto a un ritmo de trabajo constante, sin embargo el diagrama también sirve para hacer seguimiento al avance real y calcular los impactos de cualquier retraso sobre las demás actividades, su nuevo ritmo y basándose en esto, extrapolar una fecha probable de terminación (Arcila, 2012).

Esta información es muy útil para el constructor ya que permite darle respuesta al cliente rápidamente ante cualquier adversidad, por ejemplo en la obra estudiada en este documento se presentó aproximadamente un mes de retraso en la excavación y cimentación por lluvias, estos retrasos obligan a replantear todo el cronograma y el constructor debe explicar la situación al cliente y dar una nueva fecha, sin embargo sería apresurado pensar que todo el proyecto se retrasaría un mes, ya que no se tiene en cuenta las restricciones, es necesario entonces trasladar este retraso y el nuevo ritmo a la gráfica de la línea de balance para ser acertados a la hora de entregar información al cliente sobre una nueva fecha.

En la Figura 17 se revisa el avance de una obra que ha tenido retrasos que han afectado el ritmo, esta revisión se hace en la semana 12, pero extrapolando el ritmo real, se puede determinar que la primera unidad de acabados no estará en la semana 13, sino en la semana 15.

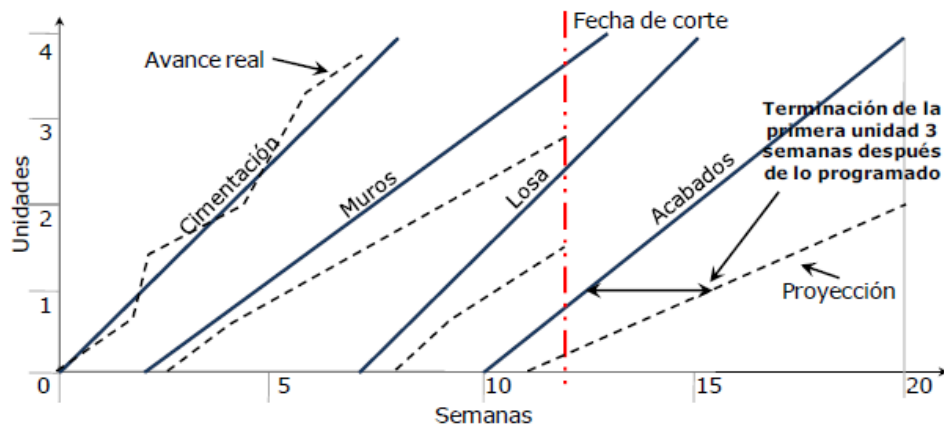


Figura 17. LDB actualizado de un proyecto de vivienda

Fuente: (Arcila, 2012)

En el uso conjunto con Kanban se controla el ritmo de construcción, ya que desde la programación se hace seguimiento y se conoce el ritmo de construcción, es en este seguimiento en que se detectan situaciones que nunca faltan en construcción que se puedan oponer al flujo y asimismo detener o modificar el ritmo de construcción, es aquí donde se trabaja la programación de la línea movilizand recursos para reestablecer el ritmo, y estas reasignaciones y cambios inmediatamente movilizan los tableros Kanban, comunicándole a todas las cuadrillas los cambios para que sigan su trabajo sin mayor caos y reasignando recursos y materiales en tiempo real, por lo que gestiona el avance del proyecto.

Es en situaciones de cambio, donde el uso de tableros Kanban digitales que hacen uso de modelos colaborativos son ideales, ya que el verdadero éxito de la programación con LDB está en que cada mejora que se pueda detectar en la planeación sea comunicada inmediatamente a todo el personal y toda la programación de trabajo inmediatamente se vea mejorada.

La relación de la programación con LDB y LPS, da como resultado una Gestión en línea de todos los recursos, ya que una programación no exime a la otra estas se complementan, siendo la programación inicial insumo para la programación con LDB, y esta a su vez es insumo para el plan semanal y el Lookahead. Es destacable aclarar que en la planeación se parte de las necesidades que en este caso es la obra (producto final) y de un conjunto de precedencias entre las actividades correspondientes, se define unas fases y necesidades de recursos y materiales por fase (cuándo/horizonte tiempo), esto es el ¿Qué?, ¿Cuánto? y ¿Dónde?. Pero es en la programación el que se define el ¿Cómo? y en que secuencia, el ¿Quién?.

Programar con LDB consiste en una secuencia de actividades ya que este es un sistema de programación de actividades y definición de ritmo de trabajo. En su implementación empezar se debe iniciar con la preparación de un diagrama lógico con las actividades necesarias para terminar la obra, después se define la cantidad de horas hombre necesarias para la ejecución de cada actividad, junto con los tiempos de espera que eviten el riesgo de interferencia entre actividades, a continuación se calcula el rendimiento requerido en cada actividad para completar la obra en el tiempo establecido, luego se elabora una tabla con los cálculos necesarios, se procesa a dibujar el diagrama y examinarlo en busca de alternativas que puedan mejorar la eficiencia de la obra.

Una vez se tiene el diagrama lógico, las horas hombre para cada actividad, tiempos de espera y el rendimiento para cada actividad se elabora una de cálculos como la de la Tabla 10, donde se incluyen datos como el tamaño de la cuadrilla, el rendimiento, la asignación de recursos, entre otros, en la Tabla 8 se muestra la nomenclatura a utilizar para los cálculos y la Tabla 9 contiene los criterios y formulas a utilizar:

Nomenclatura	Descripción
Act	Actividad a realizar
H	Horas-hombre necesarias para ejecutar cada actividad
C	Tamaño o número de personas necesarias para integrar una cuadrilla para cada actividad en cuestión
G	Requerimiento teórico de recursos
G	Asignación real de recursos
R	Rendimiento teórico
R	Rendimiento real
D	Duración de la actividad
T	Tiempo transcurrido entre el inicio de la primera sección al inicio de la última sección de una actividad
B	Buffer, tiempo de espera entre actividades para que éstas no se Interfieran

Tabla 8. Nomenclatura para los cálculos de la LDB

Fuente: (Arcila, 2012)

Nomenclatura	Fórmula
Act	La secuencia de actividades, o red, se determina de acuerdo a un orden lógico de interacción entre las mismas.
H	Resultante de la experiencia personal, tabuladores, libros, manuales, etc.
C	Resultante de la experiencia personal, tabuladores, libros, manuales, etc.
G	$= (R \times H) / (h \times d)$ dónde: h = Número de horas que se trabaja en un día. d = número de días que se trabaja en una semana.
R	$= (g \times R) / G$ El valor de g deberá ser redondeado en función del valor de G, y siempre deberá ser múltiplo de G.

Nomenclatura	Fórmula
D	= $H / (h \times C)$ El valor de D deberá ser redondeado al número inmediato superior o Inferior.
T	= $(n - 1) \times d / r$ dónde: n = número de unidades por construir en el proyecto. El valor de T deberá ser redondeado al número inmediato superior o Inferior

Tabla 9. Criterios y fórmulas LDB

Fuente: (Arcila, 2012)

ID	H	C	$G = \frac{R \times H}{h \times d}$	G	$r = \frac{g \times R}{G}$	$D = \frac{H}{h \times c}$	$T = \frac{(n - 1) \times d}{r}$	b
A	110	3	8,25	9	3,27	4,58	29,03	5
B	320	8	24,00	24	3,00	5,00	31,67	5
C	365	9	27,38	27	2,96	5,07	32,11	5
D	35	2	2,63	2	2,28	2,19	41,56	5
E	210	5	15,75	15	2,86	5,25	33,25	5

Tabla 10. Cálculos para la LDB

Fuente: (Arcila, 2012)

Una vez obtenidos estos valores se pueden operar por ejemplo los rendimientos, observando la actividad D se puede observar que el rendimiento real es de 2,28, es la actividad que tiene menor rendimiento y además el tiempo transcurrido del inicio de la 1ra sección al inicio de la última es de 41,56, esto la hace la actividad más lenta, por lo que se puede agregar dos cuadrillas más.

ID	H	C	$G = \frac{R \times H}{h \times d}$	G	$r = \frac{g \times R}{G}$	$D = \frac{H}{h \times c}$	$T = \frac{(n - 1) \times d}{r}$	b
A	110	3	8,25	9	3,27	4,58	29,03	5
B	320	8	24,00	24	3,00	5,00	31,67	5
C	365	9	27,38	27	2,96	5,07	32,11	5
D	35	2	2,63	4	4,56	2,19	20,78	5
E	210	5	15,75	15	2,86	5,25	33,25	5

Tabla 11. Reasignación de recursos actividad D

Fuente: (Arcila, 2012)

Como se muestra en la Tabla 11, la actividad D pasaría a ser la actividad con mejor rendimiento y la más rápida de acuerdo a T. El realizar estos cálculos permite variar los tamaños de las cuadrillas y los horarios de trabajo para obtener determinado rendimiento, además de dar suficiente información desde este nivel de la planeación para la toma de decisiones estratégicas.

Ahora con los cálculos se puede realizar el diagrama, sobre esta misma se puede seguir analizando. Para realizar el diagrama de la LDB se debe dividir el proyecto por partes físicas, es decir, si se trata de un edificio se divide en pisos, si se trata de casas se divide en número de casas o si es una carretera se divide en kilómetros, con ayuda de los planos, el presupuesto acordado y las especificaciones se determina todas las actividades que se van a realizar, esto puede ser con ayuda del cronograma pull mencionado anteriormente en este documento, en donde previamente se determinó la duración y secuencia de las actividades.

En la empresa estudiada se analiza la etapa de acabados de la obra analizada anteriormente, y se traza la línea de balance de acuerdo a la programación aportada por la empresa, esto se enseña en la Figura 18.

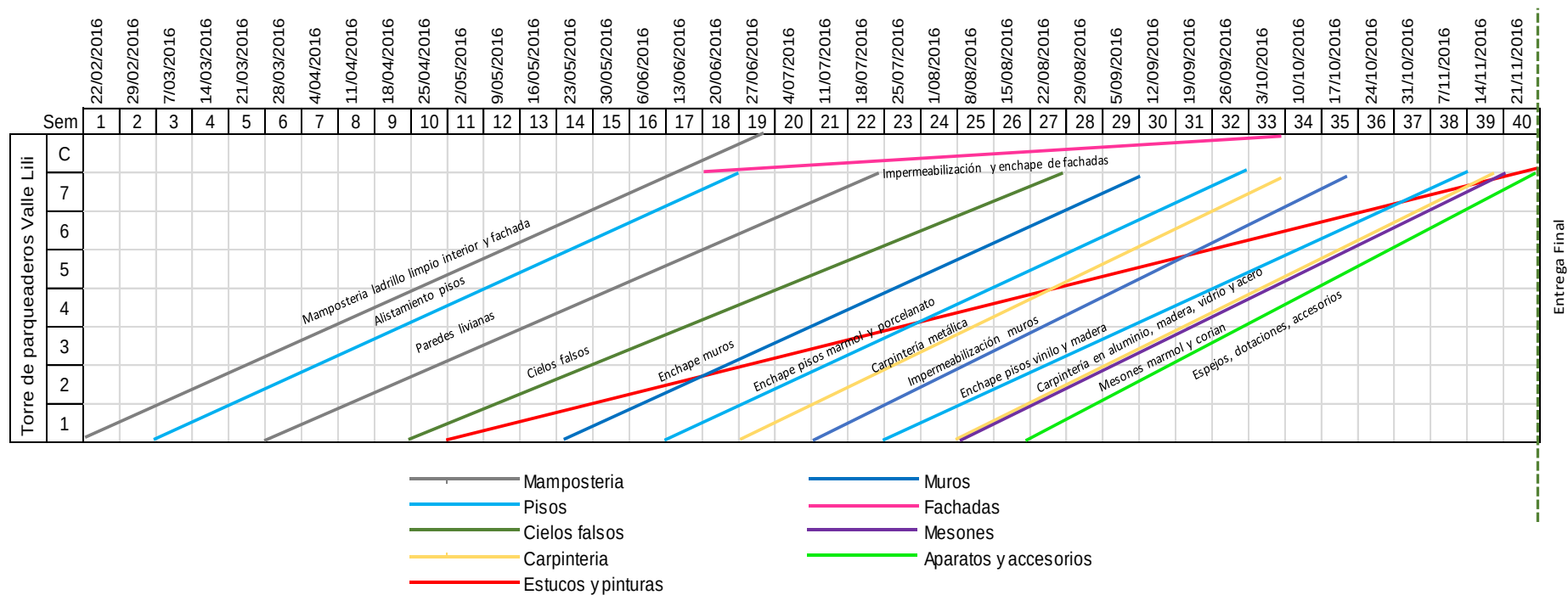


Figura 18. LDB programación inicial acabados obra estudiada
Fuente: Elaboración propia

De esta técnica de programación se pueden inferir el tiempo, que equivale a tiempo por unidad de avance (o unidad de construcción) y tasa de construcción o tasa de avance (ritmo) que sería el avance por unidad de tiempo (inverso).

A diferencia de la programación usando métodos convencionales, LDB ilustra el “ritmo” de trabajo en el cual se deben realizar todas las actividades que conforman el proyecto para concluirlo de acuerdo a lo programado, si un grupo de trabajo está atrasado se puede visualizar el impacto de éste sobre el grupo posterior por lo que se puede tomar decisiones fácilmente.

5.4.4 VALOR SOSTENIBLE

La propuesta para un sistema pull construction como primer elemento incorpora el uso de Last Planner®, siendo la principal herramienta de lean construcción, esta aporta factores que minimizan la posibilidad de presentar desperdicios, principalmente porque la planeación inicial se hace en conjunto con todos los planeadores, lo que hace que se tenga un panorama muy claro de la obra y desde la misma experiencia de quienes aportan, se hacen las estimaciones de materiales, tiempo y restricciones para las actividades. Tras la planificación inicial, se vienen la planificación intermedia y la planificación semanal que en conjunto con el uso de tableros Kanban, tiende a eliminar barreras que se opongan al *flujo*.

La siguiente herramienta es la Línea de balance, trabajada en conjunto con LPS, aportan una *gestión en línea de los recursos* en la obra y el cumplimiento de objetivos, LDB sirve para tener información adicional al cronograma pull, permitiendo hacer un seguimiento sobre el avance general del proyecto y medir el PAC. Además, esta herramienta en su uso conjunto con los tableros Kanban, posibilita un *ritmo* de producción en construcción estable, ya que la programación de trabajo se asigna de acuerdo a un ritmo esperado y se controla diariamente. Es importante destacar que debe haber una gestión de riesgos planeada desde el Last Planner® y ejecutada en el Kanban. En la Figura 19 se muestra las relaciones antes mencionadas, formando un triángulo, estas tres herramientas en su uso conjunto fundamentan el pull construction.

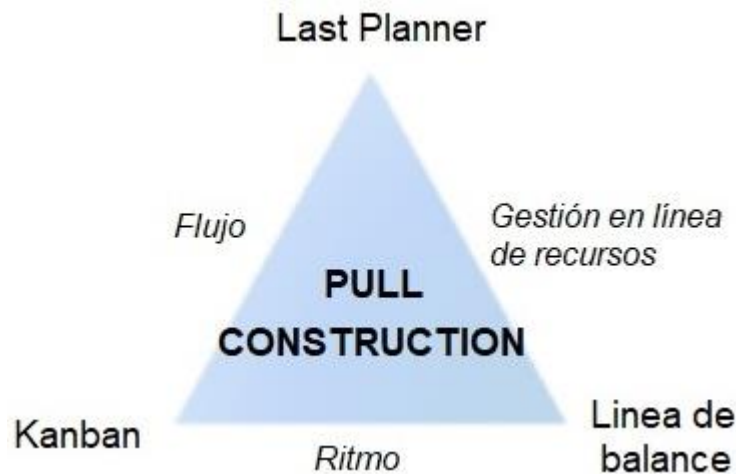


Figura 19. Triangulo pull construction

Fuente: Elaboración propia

Para el uso del sistema pull construction, se recomienda lo siguiente:

- Identificar los últimos planeadores del proceso constructivo, estos serán los más cercanos a la obra con rol de planeadores, deben tener suficiente experiencia en construcción para estimar tiempos de realización de procesos, materiales y actividades necesarias para la realización de determinadas actividades.
- Para realizar el plan maestro, organizar la reunión, citando a la mayor cantidad de planeadores posible, es importante que todos estén dispuestos a escuchar y comentar opiniones variadas que enriquezcan el cronograma pull. En la sesión debe estar presente al menos un representante con el nivel jerárquico necesario para aprobar el plan.
- En la citación a la primera sesión, incluir cuestionamientos sobre rendimiento de materiales, tamaño de cuadrilla por actividad, y demás que puedan ser útiles en la reunión, esto con el fin que los asistentes vayan preparados.
- A partir de la primera sesión pull, acordar reuniones periódicas para revisar el progreso, estas reuniones no deben ser muy largas y no es necesaria la presencia de todos los que estuvieron en la primera reunión.

- A partir del cronograma pull se construye la línea de balance, y se debe empezar a revisar los rendimientos esperados para balancear esta, es destacable que la línea de balance y el cronograma pull deben estar presentes y en un lugar visible en cada sesión.
- Hacer el plan semanal teniendo en cuenta el cronograma pull, asignar el trabajo por medio de software, algunos tienen versiones gratuitas como trello o asana, y se pueden utilizar desde el teléfono. Asignar las tareas de acuerdo a lo descrito el numeral 5.4.2 que menciona los tableros Kanban y su uso, esto facilita la medición del porcentaje de actividades completadas.
- Actualizar la línea de balance todos los días para tener una visión certera del avance de la obra. Es importante proyectar la fecha final ante cada adversidad que no pueda ser gestionada para tener siempre a la mano la información para responder al cliente.
- El uso de modelado BIM facilitaría el uso de las herramientas, por ejemplo está el software *Vico Office Schedule Planner* que mediante los diagramas de línea de balance permite identificar los cuellos de botella y demás conflictos, así mismo la optimización de las cuadrillas de trabajo contratadas para el desarrollo de las actividades.
- Herramientas como las 5S para la organización, la limpieza y orden en el lugar de trabajo son una buena base que contribuye al éxito de la implantación de Lean Construction. Además, son un primer paso para la estandarización de procesos, la disciplina, el trabajo en equipo y la Gestión Visual, además contribuyen enormemente a la reducción de accidentes laborales.

La planeación de un sistema pull construction tiene una secuencia lógica actividades, basado en la propuesta de Cruz & Rosa (2007) se plantean las siguientes etapas:

- Consulta. En la que se aclaran dudas con los proveedores sobre capacidades y especificaciones, esto facilita la respuesta a los requerimientos del cliente. Asegurar un grupo principal de proveedores, trae como beneficio una gran ventaja logística para el proceso de aprovisionamiento de materiales, siendo clave para un buen balance final de la obra.

- Proyecto de ejecución. Este debe contemplar constantes reuniones con el cliente, con el fin de contemplar los eventuales motivos de atraso, a partir de esto, los proyectistas, ingenieros y encargados de obra, deben elaborar un proyecto que permita disminuir el riesgo por factores como recursos humanos, equipos, herramientas, instalaciones, materiales y la distribución de los recursos. Este es un plan del inicio, realización y fin del proyecto.
- Planificación. Es en esta fase que se identifican la mayoría de posibles situaciones generadoras de retrasos y dificultades que muy posiblemente aumenten el costo final del proyecto. En reunión se debe finiquitar la pormenorización del proyecto, las especificaciones técnicas, procesos ejecutivos y determinación de costos, y además es necesario establecer con los proveedores garantías de cumplimiento de plazos. Con esta implicación de los proveedores, se pretende disminuir los riesgos de suministros errados, fuera de tiempo o inconstantes, entre otros.
- Ejecución del proyecto. Durante la ejecución del proyecto es necesario tener un mecanismo de medición del avance de obra para determinar si esta está desviándose o va de acuerdo a lo planeado.

El uso de pull construction facilita el trabajo en la obra y la toma de decisiones, empodera más a los colaboradores y como consecuencia de una gestión ágil del flujo, un ritmo constante de trabajo y una gestión en línea de recursos, lo más probable es que el plan se cumpla a la perfección, evitando multas, incrementando la productividad y la confiabilidad de la marca, por lo que pull también se ve reflejado en las utilidades.

Como se puede apreciar, la utilización de pull construction trae grandes beneficios a la industria de la construcción y su aplicación puede resultar muy sencilla con disciplina y la constancia.

6. VALIDAR EL SISTEMA

6.1 SIMULACIÓN PULL CONSTRUCTION

Para demostrar el sistema, se hace una simulación a modo de workshop basada en la simulación Villego[®], que es el simulador de Last Planner[®], a esta se le adicional la línea de balance y el sistema de los tableros Kanban, con el fin de comprobar el sistema pull construction.

Para la realización del workshop, se citó a un grupo de 10 personas, estos tienen conocimiento en construcción y fuertes arraigos a la planeación tradicional, se les solicitó tener disponibilidad de un día entero.

Ya en la reunión se explica la actividad a realizar, y se procede a entregar el material compuesto por:

- Paquete de indicaciones para construir una casa con legos.
- Reglamento.
- Elementos de protección personal.
- Planos por capas de construcción.
- Presupuesto (\$250).
- Marcadores y resaltadores.
- Pliegos de papel bond.
- Post-it de colores.

El equipo contaba con computador portátil en el sitio por lo que se sugiere el uso de este en caso de considerarlo útil, o cualquier otra herramienta como el celular.

Después de entregar el material se explica al grupo los elementos, el reglamento y se asignan 20 minutos para planear la construcción, aquí se deben hacer un plan general de trabajo y asignar roles dentro del equipo.

Las reglas son las siguientes:

- El tiempo solo corre cuando se ingresa a la obra (espacio demarcado en el suelo frente al espacio de trabajo).
- Cada diez segundos equivalen a un día, cada minuto equivale a una semana de trabajo.
- No se puede ingresar a la obra sin los elementos de protección personal (casco o gorra). Multa \$1.
- Se coloca una pieza con una mano a la vez.
- Si el material se coloca mal es un desperdicio y se elimina. Multa \$2 por pieza
- El material eliminado no se recupera, debe volver a solicitarse al almacén.
- El almacén hace entrega de pedidos una semana después.
- Se debe usar todo el material que se ingresa a la obra, el material no utilizado se elimina. Multa \$2 por pieza.
- No se puede empezar una capa sin acabar la anterior.
- Al finalizar una capa se debe presentar un interventor (del equipo organizador) para aprobar o rechazar el avance y autorizar la siguiente capa, cuando entra el interventor no se cuenta el tiempo.
- El interventor puede eliminar partes mal ubicadas en una capa. Multa \$4 por pieza.
- Después de 10 segundos fuera de la obra se empieza a contar el tiempo como días detenidos. Multa \$4 por día.
- La construcción está compuesta por 113 piezas y cada una cuesta \$1.

6.1.1 PRIMERA ETAPA

Pasado el tiempo otorgado para la planeación se empezó la construcción de la casa, una persona cronometró los tiempos y registró todos los sobrecostos, por multas generadas en la obra, otra hizo el rol del almacén para controlar los suministros.

Durante el tiempo concedido para hacer el plan, se observó que los participantes no hicieron uso de los post-its que se les entregó, en los pliegos de papel bond se distribuyeron el trabajo por columnas como está en la Figura 20, con la idea de que en cada capa, entrara a la obra la persona programada para poner piezas.

1	2	3	4	5
Daniel	Alejandro	Marcela	Andrea	Andrea
Juan	Laura	Daniel	Victoria	
	Diana	Laura	Felipe	
	Pablo	Victoria	Pablo	
			Juan	
			Alejandro	

Figura 20. Planeación primera ronda

Fuente: Elaboración propia

Al iniciar el ejercicio se pudo apreciar que no se respetó el plan y empezaron a entrar a la obra sin ningún orden, por lo que se presentaron repetidos desperdicios por piezas mal colocadas, además el diagrama de Gantt realizado inicialmente no se volvió a revisar, se identificaron todos los 7 desperdicios de Taiichi Ohno, se presentó que el equipo empezó a ensamblar los pisos por fuera de la obra, tuvieron que volver a desarmarlo para llevarlo a la obra, lo que representó procedimientos innecesarios y sobreproducción, se presentaron defectos en las piezas mal colocadas y tiempos de espera por el material desechado, movimientos y transporte porque no se planeó bien el trabajo y en ocasiones debían entrar y salir de la obra por material que no se había ingresado sin embargo estaba en el plan.

Una vez finalizada la construcción se hizo un balance para conocer las utilidades o pérdidas que habían tenido al realizar el ejercicio y este valor se guardó para comparar más adelante con los resultados de la segunda ronda (Tabla 12).

Después se habló con el equipo para conocer su percepción respecto a los problemas que se presentaron durante el desarrollo de la actividad, y todos coincidieron en que el principal problema fue que no se siguió lo planeado, además que no pararon en algún momento para organizar el trabajo y reorganizarse. También se les preguntó si consideran que podrían haber hecho la planeación de otra manera que y si eso hubiese funcionado, las respuestas estaban relacionadas con el uso de MS Project en el computador y la toma de fotos al plan para no olvidarlo, sin embargo todos contestaron que el resultado no habría variado mucho.

6.1.2 SEGUNDA ETAPA

Para la segunda etapa del workshop se hizo una introducción a los sistemas lean construction, con profundidad en Last Planner®, Línea de Balance y Kanban, haciendo énfasis en la forma en que se podían usar estas herramientas con el material asignado e incluso se sugirieron algunas aplicaciones para el uso de Kanban en el celular. Tras aclarar algunas dudas, se pasó a la segunda etapa de la simulación, para la cual se entrega el mismo material y la misma construcción.

Durante el desarrollo de la segunda etapa los cambios fueron evidentes, descargaron la aplicación asana en sus celulares para programar las tareas, hicieron un cronograma pull con el uso de los pliegos de papel bond y trazaron la línea de balance en el formato, asignaron roles claros a cada integrante del equipo dejando a un encargado de hacer seguimiento al programa, otro debía asignar las actividades en el tablero Kanban y otro debía estar pendiente del tiempo y las actividades realizadas para controlar atrasos de acuerdo al plan, los otros siete se repartieron colores de fichas para agregar, debían prepararse para en su turno entrar a trabajar sin retraso alguno por lo que cada uno tenía sus fichas separadas por capa y en el celular habían incluido en el tablero Kanban los planos para no equivocarse al poner las piezas.

El resultado de esta segunda etapa dejó sorprendidos y satisfechos a los miembros del equipo, comentaron que habían sentido que en la primera ronda no habían trabajado en equipo y en la segunda si, comentaron que sabían de otros métodos para programar pero creían que el resultado iba a ser igual y sería más difícil de hacer, también se hizo el comentario que era algo que querían intentar en sus empresas por la magnitud de los resultados.

6.1.3 RESULTADOS

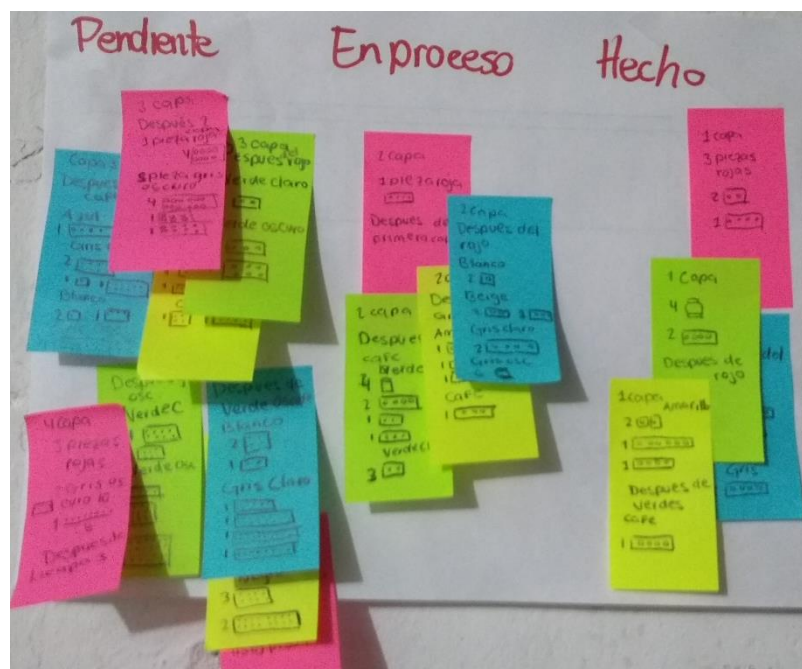
En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos, la productividad está medida en términos de piezas colocadas por minuto.

	Etapa 1	Etapa 2
Tiempo empleado (min)	22:46	9:11
(\$) material eliminado	68	16
(\$) casco	4	1
(\$) errores detectados por interventor	28	4
(\$) Días detenidos	12	0
(\$) Material re-compra	41	9
Productividad	4.96	12.31
Utilidades/Pérdidas	-\$16.00	\$107.00

Tabla 12. Resultados simulación
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la simulación son un buen indicativo de lo que la influencia de este sistema podría generar al ser aplicado en un ambiente donde prima la planeación tradicional.

Las figuras 21, 22 y 23 muestran parte del proceso de construcción.



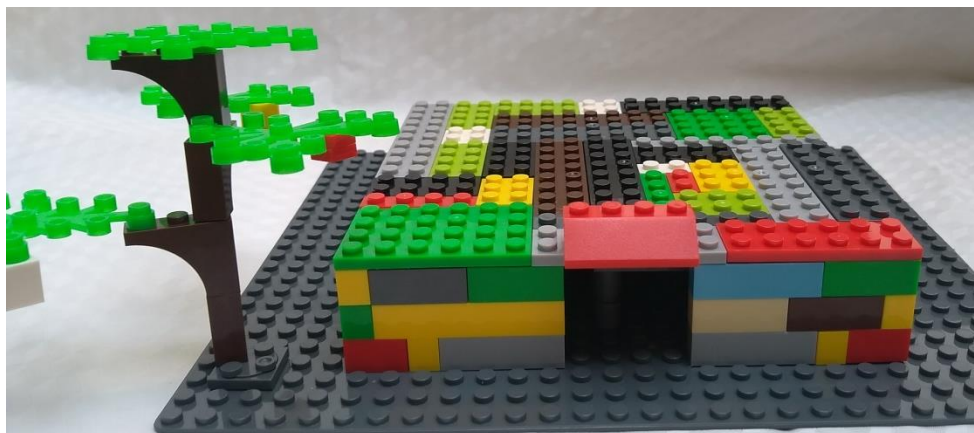


Figura 23. Construcción finalizada

7. CONCLUSIONES

Se logra describir el sistema productivo de la empresa estudiada mediante SIPOC y herramientas como los 7 desperdicios y mapeo de alto nivel, conociendo el estado actual de la empresa y las dificultades que presenta. Se identifica que la empresa maneja la planificación tradicional, no realiza análisis de restricciones y en el momento que sucede un contratiempo solo se detiene la operación y se tiene en cuenta el retraso en la programación, el seguimiento al cronograma se hace por medio de Microsoft Project y diagramas de Gantt, además, en la planeación solo participa el cuerpo administrativo y planeadores de los más altos niveles jerárquicos.

Al identificar esto se propone un sistema pull con la incorporación de distintas herramientas lean construction que conforman un sistema que da solución a los distintos problemas que se conocieron en la descripción del proceso. Esto se incorpora a un value stream mapping futuro, aplicado a un proceso de una obra seleccionada para el análisis presentado en este documento. En el mapa futuro se puede visualizar la ganancia de flujo de valor.

Tras esto se validó el sistema por medio de una simulación basada en Villego®, en la que participaron colaboradores de la empresa, estos visualizaron un beneficio significativo al momento de comparar los resultados de la construcción con las dos planificaciones, teniendo en cuenta que se realizó una capacitación de dos horas en este sistema, se puede concluir que una implementación robusta, que incorpore todos los factores en una obra real, y que lleve un tiempo superior de capacitación alrededor de los conceptos pull construction, tendría una considerable diferencia positiva con respecto a los resultados de un proyecto realizado con la planificación tradicional.

Este sistema permite visualizar la ganancia de flujo entre los eslabones de la cadena de producción, se recomienda a la empresa estudiada su implementación por la magnitud de los beneficios que puede generar.

El modelado BIM es una alternativa que puede optimizar el pull, por lo que se recomienda aprovechar los beneficios que aporta esta herramienta, a pesar que en la empresa estudiada no se realizan planos, esta no es una restricción para su implementación ya que puede recibir los planos e incluirlos al modelo, incluso se facilitaría esta etapa.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelhamid, T. S. (2008). *CMP831 Lean Construction Principles and Methods*. Michigan State University .
- Alarcon, L. F., & Pellicer, E. (Febrero de 2009). Un nuevo enfoque en la gestión: la construcción sin pérdidas. *Revista de Obras Públicas*(3496), 45-52.
- Arcila. (2012). Programación de obras con la técnica de la Línea de Balance. México, México.
- Arditi, D., Tokdemir, O., & Suh, K. (Julio de 2001). Effect of learning on line-of-balance scheduling. *International Journal of Project Management*, 19(5), 265-277.
- Arte y arquitectura. (9 de Noviembre de 2006). *Diccionario de Construcción y Arquitectura*. Obtenido de <https://goo.gl/Kivtdp>
- Ballard, H. G. (Mayo de 2000). The Last Planner System of production control. Birmingham, Inglaterra.
- Barría, C. (2009). Implementación del sistema Last Planner en la construcción de viviendas. Valdivia, Chile.
- Becerra, P., & Patricia, D. (2010). La globalización y el crecimiento empresarial a través de estrategias de internacionalización. *Revista científica Pensamiento y Gestión*(28).
- Berzal, I. (11 de Noviembre de 2014). *El método Kanban: gestión de proyectos y tareas para equipos*. Recuperado el Noviembre de 2018, de iberzal: <https://goo.gl/U8hMu3>
- BIM Academy. (25 de Octubre de 2016). *¿Qué es BIM?* Recuperado el 18 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/WJB6SU>
- Bogren, D. (1 de Febrero de 2018). *¿Cómo funciona la licitación en el área de la construcción?* Obtenido de Cuida tu dinero: <https://bit.ly/2S8hWvF>
- Botero Botero, L. F., & Álvarez Villa, M. E. (2004). Guía de mejoramiento continuo para la productividad en la construcción de proyectos de vivienda (Lean construction como estrategia de mejoramiento). *Universidad EAFIT*, 40(136), 50-64.
- Botero Botero, L., & Acevedo, H. (2011). Simulación de operaciones y línea de balance: Herramientas integradas para la toma de decisiones. *Ingeniería y Ciencia*, 7(13), 29-45.
- Botero, L., & Álvarez, M. (Junio de 2005). Last planner, un avance en la planificación y control de proyectos de construcción Estudio del caso de la ciudad de Medellín. *Ingeniería & Desarrollo*(17), 148-159.

- Burgos Marín, M., & Vela Ávila, D. (Octubre de 2015). Análisis de las causas del inumplimiento de la programación en las obras civiles. Bogotá, Colombia.
- CAMACOL. (20 de Mayo de 2015). *Fundador de Lean Construction entrega reconocimiento a empresas colombianas que implementaron el modelo*. Obtenido de <https://bit.ly/2z7xPGs>
- Costa, M. L., & Rosa, V. L. (1999). Primeiros passos da Qualidade no canteiro de obras 5S no canteiro 2. ed. São Paulo: O Nome da Rosa.
- Cruz, V., & Rosa, P. (2007). Modelo de Planificación Basado en Construcción Ajustada para Obras de Corta Duración. *Revista Información Tecnológica*, 18(1), 107-118.
- Cuatrecasas, L. (2010). *Lean management: la gestión competitiva por excelencia Implantación progresiva en siete etapas*. Barcelona: Profit Editorial.
- DINERO. (13 de Febrero de 2017). *Los sectores económicos que más crecerán en Colombia en 2017*. Obtenido de <https://bit.ly/2Ggx7ZF>
- Eastman et al. (2012). *BIM Handbook*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- EL TIEMPO. (5 de Julio de 2017). *El Valle saldrá ganador con la reactivación del proyecto del Túnel de la Línea*. Recuperado el Octubre de 2017, de <https://goo.gl/RjsvfC>
- EL TIEMPO. (26 de Abril de 2017). *La interminable doble calzada entre Buga y Buenaventura*. (G. I. Arias, Ed.) Recuperado el Octubre de 2017, de <https://goo.gl/JjPqkC>
- ESDIMA. (2016). *Las bases del trabajo colaborativo BIM*. Recuperado el Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/nXQnkU>
- Figuerola, N. (2011). KANBAN: SU USO EN EL DESARROLLO DEL SOFTWARE. *Journal of Personality*, 8.
- Fundación laboral de la construcción. (29 de Octubre de 2018). *Guía para la elaboración del plan de ejecución BIM*. Obtenido de <https://goo.gl/s3GrC9>
- Gemba Academy. (15 de Febrero de 2018). *Introducción a Kanban*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/aJv4au>
- Gilibets, L. (31 de Julio de 2013). *Qué es la metodología Kanban y cómo utilizarla*. Obtenido de <https://goo.gl/r3z1nb>
- Grupo Edifica. (31 de Octubre de 2011). *La Filosofía "Lean Construction" Primera parte*. Obtenido de <https://goo.gl/Wvg4nH>
- Grupo Oxean. (12 de Julio de 2011). *Trabajar sin estrés - Kanban*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/SbwTU9>
- Herrandiz Espuny, S. *Aplicación del Lean Thinking a la Construcción*. Universitat Politècnica de Catalunya.

HildebrandtGruppe. (17 de Mayo de 2016). *PROFUNDIDAD DE LAS DIMENSIONES BIM EN PROYECTOS DE ALTA COMPLEJIDAD*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/2mgs7Y>

Kanban Tool. (s.f.). *¿Por qué utilizar la metodología Kanban?* Recuperado el 15 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/jfXBQN>

kanbanize. (17 de Octubre de 2016). *¿Qué es una tarjeta Kanban? Definición y explicación de los detalles*. Obtenido de <https://goo.gl/1DVC73>

Kanbanize. (s.f.). *Qué es un tablero Kanban: Fundamentos*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/yjwRUz>

Lean Construction Enterprise. (1 de Noviembre de 2016). *¿Qué es Lean Construction?* Obtenido de <https://goo.gl/e1dJDw>

Lean Construction Enterprise. (1 de Noviembre de 2016). *Last Planner - El último planificador*. Obtenido de <https://goo.gl/PT3QVy>

Mayes, J. (29 de Enero de 2013). *6 Week Look Ahead Schedule - Lean Construction*. Obtenido de <https://goo.gl/PFmVKQ>

Mayes, J. (29 de Enero de 2013). *Pull Planning - Lean Construction*. Obtenido de <https://goo.gl/94mLpE>

Mayes, J. (29 de Enero de 2013). *Weekly Work Plan - Lean Construction*. Obtenido de <https://goo.gl/h2FuvA>

Mayes, J. (29 de Enero de 2018). *Percent Planned Complete - Lean Construction*. Obtenido de <https://goo.gl/SWMbYC>

MundoBIM. (2 de Abril de 2018). *Qué es BIM?* Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/xR6gZA>

Oberlender, G. D. (1993). *Project Management for engineering and construction*. USA: MCGrawHill.

Observatorio de Transparencia y Anticorrupción. (12 de Marzo de 2016). *Más de \$1 billón de pesos están en riesgo por 83 obras inconclusas*. Obtenido de <https://goo.gl/YZ5obV>

Ohno, T. (1988). *TOYOTA PRODUCTION SYSTEM: BEYOND LARGE-SCALE PRODUCTION*. Cambridge, Mass: Productivity Press.

Orihuela, P., & Esteves, D. (2003). *Aplicación del método de la línea de balance a la planificación maestra*. Obtenido de <https://goo.gl/CCcNm9>

Osenseis. (19 de Mayo de 2016). *Botiq-Lean: Los 5 principios Lean en 37"*. Obtenido de <https://bit.ly/2wQPB3t>

Padilla, L. (2010). *Lean Manufacturing Manufactura Esbelta/Ágil*. *Facultad de Ingeniería – Revista Ingeniería Primero*, 64-69.

PAS 1192-2:2013. (2013). *Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling*. BSI Standards Limited 2013.

- Prado, R., Gondim, T., & Toledo, R. (2001). Diretrizes e resultados da implantação do programa 5S na construção civil. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO DA QUALIDADE E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, II*.
- PrevenBlog. (13 de Febrero de 2014). *LOS 7 MUDAS: ¿SABES CUALES SON LOS 7 DESPERDICIOS DE LAS EMPRESAS?* (G. Menéndez, Ed.) Obtenido de <https://goo.gl/jEXDn9>
- Principe Gonzales, J. M. (s.f.). *BENEFICIOS DE UNA GESTIÓN BIM EN EL SECTOR EDIFICACIONES*. Recuperado el 27 de Marzo de 2019, de <https://bit.ly/2lss5Pp>
- Revitor - Mundo BIM. (11 de Agosto de 2017). *Cronogramas de línea de balance*. Obtenido de <https://goo.gl/EmcKBE>
- Revitor - MundoBIM. (2 de Abril de 2018). *Qué es BIM?* Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://goo.gl/fN713w>
- RIB Spain SA. (17 de Julio de 2018). *EDT Estructura de Desglose del Trabajo*. Obtenido de <https://bit.ly/2RkfrSE>
- Rodriguez, e. a. (Febrero de 2011). La gestión de la obra desde la perspectiva del último planificador. *Revista de Obras Públicas*(3518), 35-44. Obtenido de <https://www.researchgate.net>
- Rodriguez, e. a. (2011). La gestión de la obra desde la perspectiva del último planificador. *Revista de Obras Públicas*(3518), 35-44. Obtenido de <https://www.researchgate.net>
- Salem, O., Asce, M., Solomon, J., Minkarah, I., & Genaidy, A. (Octubre de 2006). Lean Construction: From Theory to Implementation. *Journal of Management in Engineering*, 22(4), 168-175.
- Sinnaps. (4 de Octubre de 2017). *¿QUÉ ES UN DIAGRAMA DE GANTT Y PARA QUÉ SIRVE?* Obtenido de <https://goo.gl/4ioYs1>
- Soini, M., Leskela, I., & Seppanen, O. (2004). Implementation of Line-of-Balance Based Scheduling and Project Control System in a Large Construction Company. *Proceedings of the 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Copenhagen, Denmark.
- teodorabozheva. (17 de Octubre de 2012). *Kanban en una organización tradicional: Primeros pasos*. Obtenido de <https://bit.ly/2XeJRZu>
- Toleano de Diego, A., Mañes Sierra, N., & García, S. J. (2009). "Las claves del éxito de Toyota". *LEAN, más que un conjunto de herramientas y técnicas. Cuadernos de Gestión*, 9(2), 111-122.
- Wheat, B., Mills, C., & Carnell, M. (2003). *Leaning Into Six Sigma: a Parable of the Journey to Six Sigma and Lean Enterprise*. United States: McGraw-Hill Education.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2005). *Lean Thinking*. España: Ediciones.
Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1995). *La máquina que cambió el mundo*. Madrid: McGraw-Hill.