Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en muros de mampostería H-12 desde el enfoque *Lean Construction*

Ray Andrés Ardila Cubillos

Trabajo de Grado para Optar al Título de

Magister en Ingeniería Civil

Director

Guillermo Mejía Aguilar

Ph.D. Construction Engineering

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Con amor para la bisabuela Inés, cuya dulzura y sonrisa recorro entre recuerdos borrosos (el origen); para mi abuela Marina, de carácter fuerte, mirada protectora y regazo seguro (el cimiento de nuestra familia); a mi madre Luz, siempre bella, aguerrida y de pasos decididos, habitamos el sendero de su amoroso encargo (el armazón que nos sustenta), para mis hermanas Johana y Jenifer, líderes que animosas se alzan triunfantes, son frutos, retoños y presente (murallas que protegen y confortan); a mis sobrinas María José y Alma, cándidos brotes verdes, tiernas herederas de una estirpe valiosa, son futuro, luz y alegría que cohesiona la existencia en su conjunto.

Agradecimientos

Agradecimiento al profesor Guillermo Mejía Aguilar por su dirección, apoyo y confianza en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Agradecimiento a la ingeniera Yurani Alexandra Ardila Carreño, por su apoyo en la elaboración y aplicación del instrumento de recolección de datos del objetivo específico #2.

Agradecimiento a la profesora Ruth Maritza Navas Ariza, por su apoyo en la elaboración del instrumento de recolección de datos del objetivo específico #2, tanto en lo referente a la redacción, cohesión y coherencia de su contenido, como a la aplicación, análisis y correctivos de la prueba piloto.

Tabla de contenido

Introducción 15

1. Planteamiento del problema 16

2. Objetivos 18

2.1 Objetivo General 18

2.2 Objetivos Específicos 18

3. Marco teórico 19

3.1 Gestión de proyectos 19

3.1.1 Niveles jerárquicos de gestión en la industria de la construcción 19

3.1.2 Marcos de referencia según el enfoque de gestión 21

3.2 *Lean Construction* 22

3.2.1 Herramientas de Lean Construction 25

3.2.2 Selección de la herramienta Lean Construction 28

3.2.3 Etapas del mapeo de flujo de valor 31

3.3 Modelos basados en tareas 34

3.4 Cuadrillas de trabajo 37

3.5 Productividad laboral en construcción (PLC) 38

4. Marco metodológico 39

4.1 Planteamiento del problema 41

4.2 Revisión de la literatura 41

4.3 Indagar por los métodos empleados por la industria 41

4.3.1 Fase I. Diseño de la encuesta 42

4.3.2 Fase II. Prueba piloto 44

4.3.3 Fase III. Aplicación del cuestionario 46

4.3.4 Fase IV. Análisis de resultados. 48

4.4 Diseño de la metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en muros de mampostería desde el enfoque *Lean Construction.* 48

4.4.1 Selección del proyecto y levantamiento del proceso de mampostería 49

4.4.2 Levantamiento del proceso de mampostería 67

5. Resultados de investigación y discusión 69

5.1 Métodos existentes en la literatura científica para la determinación de la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo 70

5.2 Métodos existentes en la práctica de nuestro contexto colombiano para la determinación de la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo mediante la aplicación de una encuesta a empresas constructoras regionales. 78

5.3 Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en muros de mampostería H-12 de edificaciones. 83

5.3.1 Levantamiento del proceso constructivo de mampostería H-12 edificio EDID UIS 83

5.3.2 Implementación de la herramienta Lean “Mapa de flujo de valor” al caso de estudio 98

5.3.3 Elección de la cuadrilla de trabajo óptima para el proceso de mampostería H-12 observado en el proyecto EDIC 116

5.3.3.1 Identificación y cuantificación de las pérdidas en cada uno de los elementos de la cuadrilla de trabajo 118

5.3.4 Modelo 124

6. Conclusiones 137

7. Referencias Bibliográficas 139

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 *Marcos de referencia de gestión de proyectos por orientación, enfoque y país.* 22

Tabla 2 *Fuentes de pérdidas a mejorar con herramientas Lean* 29

Tabla 3 *Metas y objetivos según la herramienta Lean* 30

Tabla 4 *Técnicas e instrumentos de recolección.* 43

Tabla 5 *Estructura del cuestionario empleado.* 44

Tabla 6 *Empresas constructoras según CIIU.* 46

Tabla 7 *Parámetros para la determinación de la muestra representativa.* 47

Tabla 8 *Cálculo de desperdicio de unidades de mampostería y demanda semanal total.* 56

Tabla 9 *Cálculo de la cantidad de mortero de pega por metro cuadrado de mampostería H-12.*57

Tabla 10 *Cálculo de demandas semanales de materiales para mortero de pega 1:3.* 57

Tabla 11 *Cálculo de cantidades totales de materiales para muros de mampostería H-12.* 58

Tabla 12 *Distancia en metros desde los puntos observados hasta la ubicación de los materiales, proyecto EDIC.* 60

Tabla 13 *Consolidado de documentos de la revisión de literatura.* 75

Tabla 14 *Métodos para el modelado del diseño de la cuadrilla de trabajo en procesos constructivos.* 75

Tabla 15 *Ciclos de producción observados en el proceso de mampostería H-12, proyecto EDIC.* 84

Tabla 16 *Ciclos de producción observados en el proceso de mampostería H-12, proyecto EDIC (Tabla normalizada).* 85

Tabla 17 *Estadística descriptiva de los metros cuadrados instalados por ciclo.* 86

Tabla 18 *Estadística descriptiva de los metros cuadrados instalados acumulados.* 86

Tabla 19 *Resumen del modelo de regresión lineal.* 88

Tabla 20 *Análisis de varianza de la regresión lineal.* 88

Tabla 21 *Porcentajes de tiempos según los tipos de tareas observadas en proyectos verticales.* 92

Tabla 22 *Labores identificadas en el proceso de mampostería H-12 según su duración relativa.* 95

Tabla 23 *Parámetros para la implementación del mapa de flujo de valor correspondientes al caso de estudio.* 98

Tabla 24 *Identificación y aplicación de tiempos de mejora, eliminados y optimizados de las labores que componen el proceso de mampostería H-12, ejecutados por el ayudante de la cuadrilla de trabajo observada.* 118

Tabla 25 *Identificación y aplicación de tiempos de mejora, eliminados y optimizados de las labores que componen el proceso de mampostería H-12, ejecutados por el oficial de la cuadrilla de trabajo observada.* 119

Tabla 26 *Valor de la hora-cuadrilla según sus diferentes configuraciones.* 122

Tabla 27 *Estimación de las horas efectivas mensuales (año 2022).* 123

Tabla 28 *Cuadrilla observada sin mejoramiento de procesos.* 129

Tabla 29 *Cuadrilla observada con mejoramiento de procesos.* 130

Tabla 30 *Cuadrilla óptima con mejoramiento de procesos.* 131

Tabla 31 *Cuadrilla sobredimensionada con mejoramiento de procesos.* 133

Tabla 32 *Precio de la mano de obra, contrato laboral vs. subcontrato.* 134

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1 *Descomposición jerárquica de la gestión según el enfoque empleado.* 20

Figura 2 *Símbolos relevantes en la elaboración de un mapa de flujo de valor* 33

Figura 3 *Esquema de un Mapa de flujo de valor.* 34

Figura 4 *Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo (Thomas).* 35

Figura 5 *Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo (Serpell).* 36

Figura 6 *Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo (Botero).* 37

Figura 7 *Esquema metodológico del estudio.* 40

Figura 8 *Metodología empleada en la revisión de literatura.* 41

Figura 9 *Fases del estudio de indagación por los métodos empleados en la industria.* 42

Figura 10 *Metodología para la cuadrilla óptima de trabajo en mampostería H-12.* 49

Figura 11 *Nuevo edificio de investigaciones de la Facultad de Ciencias (EDIC) (en construcción).* 51

Figura 12 *Planta tipo del proyecto EDIC, escala 1 : 250.* 52

Figura 13 *Muro en mampostería tipo H-12. Edificio EDIC.* 53

Figura 14 *Unidades de mampostería de arcilla cocida, perforación horizontal H-12. Proyecto EDIC.* 54

Figura 15 *Preparación del mortero de pega, proyecto EDIC.* 58

Figura 16 *Plano de ubicación de materiales y muros observados, proyecto EDIC, sin escala.* .. 60

Figura 17 *Ubicación del ladrillo H-12, proyecto EDIC.* 61

Figura 18 *Cinta métrica (flexómetro) y palustre observados en el proyecto EDIC.* 62

Figura 19 *Herramienta martillo observada en el proyecto EDIC.* 63

Figura 20 *Manguera de niveles observada en el proyecto EDIC.* 64

Figura 21 *Hilo de polipropileno tranzado a tres cabos, observado en el proyecto EDIC.* 65

Figura 22 *Plomada metálica observada en el proyecto EDIC.* 65

Figura 23 *Llana de madera observada en el proyecto EDIC.* 67

Figura 24 *Hachuela metálica observada en el proyecto EDIC.* 68

Figura 25 *Levantamiento, procesado y construcción del modelo del proceso constructivo de mampostería H-12.* 68

Figura 26 *Resultados de la búsqueda por cantidad de documentos y año.* 74

Figura 27 *Métodos de diseño de cuadrilla de trabajo según el enfoque de producción.* 76

Figura 28 *Métodos de modelado para diseño de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos.* 76

Figura 29 *Métodos de modelado de cuadrillas de trabajo.* 77

Figura 30 *Marcos de referencia de gestión empleados por las empresas constructoras regionales en sus proyectos.* 78

Figura 31 *Métodos empleados por las empresas constructoras regionales para determinar cuántos integrantes deben conformar una cuadrilla de trabajo en procesos constructivos.*..... 79

Figura 32 *Responsable de determinar la cantidad de integrantes de la cuadrilla de trabajo y su grado de capacitación.*..... 79

Figura 33 *Momento en el que se determina cuantos integrantes debe tener la cuadrilla de trabajo.* 80

Figura 34 *Requerimientos tenidos en cuenta para conformar la cuadrilla de trabajo.* 81

Figura 35 *Método o herramienta usada para determinar la cantidad de integrantes de las cuadrillas de trabajo y su grado de capacitación.* 81

Figura 36 *Gráfico de metros cuadrados instalados (eje vertical) por ciclo de observación (eje horizontal).*..... 87

Figura 37 *Gráfico de metros cuadrados instalados acumulados (eje vertical) por ciclo de observación (eje horizontal).* 87

Figura 38 *Tareas que componen el proceso de mampostería H-12 observado, proyecto EDIC.* 89

Figura 39 *Modelo del proceso constructivo de mampostería H-12 observado, lenguaje BPMN v 2.0.*..... 90

Figura 40 *Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo de mampostería H-12 observado, proyecto EDIC.*..... 91

Figura 41 *Comparación de tiempos según los tipos de tareas observadas en proyectos de construcción vertical.*..... 92

Figura 42 *Tipo de trabajo realizado por el oficial en la cuadrilla de trabajo 1x1.*..... 93

Figura 43 *Tipo de trabajo realizado por el ayudante en la cuadrilla de trabajo 1x1.* 93

Figura 44 *Tipos de trabajo realizado por el oficial de la cuadrilla a través de los ciclos de producción observados en segundos.* 94

Figura 45 *Tipos de trabajo realizado por el ayudante de la cuadrilla a través de los ciclos de producción observados en segundos.* 94

Figura 46 *Análisis de Pareto a las labores identificadas en el proceso de mampostería H-12 según su duración relativa.* 96

Figura 47 *Duración relativa de las principales tareas identificadas al interior del proceso de mampostería H-12.* 97

Figura 48 *Descomposición y duración relativa de "otras tareas" identificadas en el proceso de mampostería H-12 observado.* 97

Figura 49 *Mapa de flujo de valor (estado actual) del proceso de muros de mampostería H-12 del proyecto EDIC.* 100

Figura 50 *Mapa de flujo de valor futuro propuesto para el proceso de muros de mampostería H-12 del proyecto EDIC.* 103

Figura 51 *Tipos de "pallets" o estibas de madera estandarizadas más usadas en el país.* 106

Figura 52 *Cargue y descargue de unidades de transporte con montacargas.* 106

Figura 53 *Estibadora manual para transporte interno horizontal.* 107

Figura 54 *Transporte interno vertical de unidades de manipulación de ladrillo H-12 con torre grúa.* 108

Figura 55 *Harnero mecánico con motor eléctrico para cernir arena.* 110

Figura 56 *Nivel láser de tres ejes para propuesto para su uso en la alineación y aplomado del proceso de mampostería H-12.* 111

Figura 57 *Herramienta tipo "brechador" propuesta para mejorar la labor de extendido de la brecha horizontal del mortero de pega.* 112

Figura 58 *Ladrillo en mitades listo desde la fábrica.* 113

Figura 59 *Andamios multidireccionales certificados.* 114

Figura 60 *Comparación del tiempo observado en el proceso vs. El tiempo con mejoras (solo el oficial).* 120

Figura 61 *Comparación del tiempo observado en el proceso vs. El tiempo con mejoras (solo el ayudante).* 121

Figura 62 *Comparación del tiempo observado en el proceso vs. El tiempo con mejoras (cuadrilla 1x1).* 121

Figura 63 *Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en procesos de mampostería H-12.* 136

Resumen

Título: Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en procesos de muros de mampostería H-12 desde el enfoque *Lean Construction*.[*]

Autor: Ray Andrés Ardila Cubillos[**]

Palabras Clave: Cuadrilla de trabajo, Procesos constructivos, Mampostería, Lean Construction, Productividad Laboral, Programación Lineal de Restricciones, subcontratación, BPMN 2.0, Modelo.

Descripción: La importancia de la industria de la construcción queda manifiesta respecto de la cantidad de empleos directos que genera y su aporte tanto al PIB como a la economía local y global, por otro lado, es evidente el uso masivo del recurso de mano de obra en los proyectos de construcción. El indicador relacionado a dicho recurso es la productividad laboral, que en las últimas décadas ha mostrado bajo incremento a nivel global e incluso desaceleración a nivel local. Esta investigación aporta un marco teórico para el diseño de la cuadrilla de trabajo óptima en procesos constructivos, en relación de la cantidad de integrantes y su capacitación, aplicando el enfoque basado en la producción *Lean Construction*, respecto del flujo de trabajo y eliminación de pérdidas, bajo las restricciones de demanda de producción y plazo de ejecución, de cara a mejorar la productividad laboral. Se realiza la observación del proceso de mampostería H-12 en un caso de estudio, se identifican las labores y tareas que lo componen, así como el tipo de trabajo y su responsable, adicionalmente, se diseña y aplica una encuesta a 60 empresas locales para indagar sobre los métodos de determinación de cuadrillas de trabajo que emplean. Como resultado se obtiene un modelo de la cuadrilla que realiza el proceso seleccionado, además, se plantean las ecuaciones para la determinación la cuadrilla óptima de acuerdo al número de integrantes y su capacitación, empleando la programación lineal de restricciones para la optimización del sistema. Finalmente se propone una metodología para dicha determinación que tiene en cuenta los parámetros del proyecto y las características de la cuadrilla. Se evidencia informalidad en la determinación de los integrantes de la cuadrilla de trabajo en procesos constructivos en obra, que trae fenómenos subyacentes como la tercerización y la subcontratación laboral.

---

[*] Trabajo de Grado

[**] Universidad Industrial de Santander. Maestría en Ingeniería Civil. Director: Guillermo Mejía Aguilar. Ph.D.

Abstract

Title: Methodology to determine the optimal work crew in H-12 masonry wall processes from the Lean Construction approach[*]

Author(s): Ray Andrés Ardila Cubillos [**]

Key Words: Work crew, Construction processes, Masonry, Lean Construction, Labor Productivity, Constraint Linear Programming, subcontracting, BPMN 2.0, Model.

Description: The importance of the construction industry is evident with respect to the number of direct jobs it generates and its contribution to both GDP and the local and global economy, on the other hand, the massive use of labor resources in the construction projects. The indicator related to this resource is labor productivity, which in recent decades has shown low growth at the global level and even deceleration at the local level. This research provides a theoretical framework for the design of the optimal work crew in construction processes, in relation to the number of members and their training, applying the approach based on Lean Construction production, regarding the workflow and elimination of losses, under the restrictions of production demand and execution time, in order to improve labor productivity. The observation of the H-12 masonry process is carried out in a case study, the tasks and tasks that compose it are identified, as well as the type of work and its person in charge, additionally, a survey is designed and applied to 60 local companies to inquire about the methods of determining work crews that they use. As a result, a model of the crew that performs the selected process is obtained, in addition, the equations for determining the optimal crew according to the number of members and their training are proposed, using linear constraint programming for the optimization of the system. Finally, a methodology is proposed for said determination that takes into account the parameters of the project and the characteristics of the crew. Informality is evident in the determination of the members of the work crew in construction processes on site, which brings underlying phenomena such as outsourcing and labor subcontracting.

---

[*] Degree Work

[**] Industrial University of Santander. Civil Engineering Master`s degree. Direction: Guillermo Mejía Aguilar. Ph.D.

Introducción

La importancia de la industria de la construcción queda patente al observar el comportamiento del Producto Interno Bruto (P.I.B.) a nivel mundial, al cual aporta 3.0% del total, y adicionalmente al hecho de generar hasta el 7.0% de la fuerza de trabajo remunerada según las cifras del Observatorio de Derechos Humanos y Empresas de la región mediterránea (Observatori de Drets Humans i Empreses a la Mediterrania, 2018). En este sentido, tanto por la relevancia de la industria como por el uso masivo que esta hace de la mano de obra (Gupta et al., 2019) (que constituye entre el 30% y el 50% del costo directo de los proyectos de construcción vertical (Shree et al., 2015)), se justifica dirigir esfuerzos investigativos a estudiar el mejoramiento de la productividad desde este recurso, y de este modo ayudar a incidir positivamente en el impacto económico y social.

Durante las décadas comprendidas entre 1995 y 2015, el crecimiento de la industria manufacturera (3.6%) casi ha cuadruplicado al de la industria de la construcción (1.0%) y este último ha estado en la tercera parte del crecimiento de la economía global (2.7%) (McKinsey Global Institute, 2017) (Cámara Colombiana de la Construcción, 2018), situación que refleja tanto crisis y obstáculos por factores internos, externos y globales, como rezago respecto del enfoque de producción tradicional adoptado por una industria reticente al cambio, con características contractuales y especiales del producto. Todo esto, anima a observar con detenimiento ese enfoque exitoso de producción adoptado en las últimas décadas por las manufacturas, y que en su momento adaptaron a la construcción Koskela, Howell y Ballard, conocido como *Lean Construction*, y aplicarlo al campo donde se intercepte con ese recurso de interés (la mano de obra), es decir, en

los procesos operacionales de construcción. Para ello, se estudia el proceso constructivo de mampostería tipo H-12 aplicando los principios, metas y herramientas del pensamiento *Lean,* y posteriormente formular una metodología de diseño para la cuadrilla de trabajo óptima en dicho proceso, analizado desde este enfoque. Este estudio servirá para profundizar en el estudio de procesos productivos de construcción, la implementación de la filosofía *Lean Construction* en el diseño de cuadrillas de trabajo, todos ellos temarios que se encuentran hasta cierto punto en estado insipiente y con baja presencia en la literatura científica.

1. Planteamiento del problema

La industria de la construcción presenta síntomas evidentes de baja productividad que han sido mostrados en los estudios de McKinsey de 2017 y para el caso colombiano por Camacol en su informe de productividad de 2018, donde se muestra un bajo crecimiento (1.0%) de este indicador en las últimas décadas respecto al crecimiento de la productividad en la economía global (2.7%) y del sector industrial de manufacturas (3.6%), lo que significa que se obtiene menor valor de retorno respecto de las otras industrias con una misma inversión de recursos. Adicionalmente, en dichos informes Colombia se posiciona entre los países con menor productividad laboral, decreciendo -0.5% y mostrando un valor añadido bruto por hora trabajada de solo USD 5.0, en contraste con países como Bélgica, con un crecimiento en la productividad laboral de 2.0% y un valor añadido bruto por hora trabajada de USD 47.0 (casi 10 veces mayor); esto inevitablemente repercute en los márgenes de ganancia de las empresas, su desempeño y aporte al crecimiento de la economía.

Estas cifras obligan a indagar por las posibles causas de la situación de baja productividad en la industria de la construcción; al respecto Mckinsey y Camacol señalan tres fuentes principales:

en primer lugar aquellas generadas por factores externos a la industria de la construcción como pueden ser el incremento de la complejidad en los proyectos y las regulaciones cada vez más estrictas entre otras; en segundo lugar las propias de la dinámica de la industria, por ejemplo: ser un sector muy fragmentado, las estructuras contractuales versus los incentivos desalineados y los requisitos y solicitudes de los clientes demasiado personalizadas; y por último en tercer lugar, los factores internos de la industria como pueden ser, una etapa de planeación inadecuada, una gestión de proyectos deficiente, informalidad organizacional en las empresas, falta de capacitación y supervisión de la mano de obra, adicional a la falta de innovación. En un estudio previo (Ardila & Mejía, 2021) aplicado a empresas constructoras locales se valida lo presentado en la tercera fuente de causas, al obtener como resultado que el 50% de los encuestados manifiesta no aplicar ningún marco de referencia o lineamientos de gestión en los proyectos que desarrolla, y al indagar por los métodos usados para el diseño de cuadrillas de trabajo en los procesos de construcción, el 60% de los encuestados respondieron que emplean métodos basados la experiencia de proyectos anteriores, incluso el 6.7% responden no emplear ninguno. En este mismo sentido, ciertos autores plasman que después de 30 años de monitoreo de proyectos de construcción nunca han observado un plan operativo detallado en el sitio de la obra(Thomas et al., 2007), y recientemente en 2019, Gupta et al. recomiendan realizar más investigaciones para proponer un modelo de composición de la cuadrilla de trabajo para lograr tasas de productividad óptimas. Observando estas posibles causas, queda de manifiesto que se requiere analizar e incluir enfoques distintos a los tradicionalmente se han venido empleando, no solo en la parte de organización del proyecto, sino también desde las operaciones de producción ya que se observa que la productividad podría ser mejorada, como lo ha mostrado el comportamiento de la productividad en las otras industrias, salvando las características y la naturaleza de estas.

Después de esbozarse lo anterior, este estudio plantea abordar el problema desde la tercera fuente de posibles causas de baja productividad en la industria de la construcción, eligiendo para ello un marco de referencia desde el cual enfocar la solución, orientándose tanto en el recurso de mano de obra (cuadrillas de trabajo), como en la observación y mejoramiento de un proceso constructivo (mampostería tipo H-12), trazando para ello una metodología para determinar la composición de la cuadrilla de trabajo óptima en dicho proceso en la etapa de ejecución (obra de construcción).

2. Objetivos

Para contribuir a la solución del problema anteriormente enunciado, el presente estudio propone los siguientes objetivos:

2.1 Objetivo General

Diseñar una metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en muros de mampostería H-12 desde el enfoque *Lean Construction*.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los métodos existentes en la literatura especializada para la determinación de la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo en obra realizando el estado del arte.
- Identificar los métodos existentes en la práctica de nuestro contexto colombiano para la determinación de la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo mediante la aplicación de una encuesta a empresas constructoras regionales.
- Aplicar el enfoque *Lean Construction* en el diseño de una metodología que permita determinar la cuadrilla de trabajo óptima en muros de mampostería H-12 de edificaciones.

3. Marco teórico

Para poner en contexto esta investigación, se expondrá el enfoque teórico de la gestión de proyectos, entendiendo que se requiere la aplicación metódica de conocimientos, habilidades y prácticas de gestión a las actividades del proyecto; posteriormente se abordaran los marcos de referencia y enfoques de interés por ser pertinentes respecto del desarrollo del estudio.

3.1 Gestión de proyectos

La gestión de proyectos se identifica como una ciencia pluridisciplinaria que recoge aportes teóricos desde varias fuentes (Saenz, 2012), por otra parte, el *Project Management Institute* la plantea cómo: "la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades para cumplir con los requisitos mediante la integración adecuada de los procesos de gestión identificados para el proyecto" (PMI, 2017); en un sentido similar, la *Association for the Advancement of Cost Engineering* (AACE, 2015) en su marco de referencia *Total Cost Management*, define la gestión de proyectos como "la aplicación metódica de conocimientos, habilidades y prácticas de gestión a las actividades del proyecto para cumplir con los objetivos del proyecto."

3.1.1 Niveles jerárquicos de gestión en la industria de la construcción

Dentro de la definición del alcance del estudio, corresponde identificar el nivel jerárquico de gestión y el enfoque a emplear, en este sentido, se establecen dos categorías según el enfoque; por un lado, con base en los atributos del proyecto e ítems de componentes físicos, y por otro, en el campo de acción y los procesos tecnológicos. La primera se ajusta al tipo jerárquico organizacional al nivel de la empresa y del proyecto, la segunda a uno operacional enfocado en la producción, los procesos constructivos, asignación de tareas y labores en las cuadrillas de trabajo (Halpin & Senior, 1981) como se aprecia en la **Figura 1.**

Este estudio se sitúa en el mejoramiento de un proceso constructivo en la etapa de ejecución, específicamente en las estaciones de las unidades de trabajo, por ende, se emplea el segundo nivel, el de gestión operacional de procesos.

Figura 1

Descomposición jerárquica de la gestión según el enfoque empleado.

Nota. Fuente: Modificado de Halpin y Senior, 1981.

3.1.1.1 Tarea. El nivel de tarea se ocupa de la identificación de las partes elementales del trabajo a realizarse dentro de un segmento físico de avance del proyecto (actividad), y su y asignación a las unidades de producción y equipos de trabajo (cuadrillas) (Halpin and Senior, 1981). Para este caso de estudio, el segmento físico de avance del proyecto es la actividad de mampostería H-12, las tareas corresponden a las partes fundamentales que componen dicha actividad, y por último se llega al nivel de granularidad de las labores, al desglosar aquellos esfuerzos que se requieren para completar una tarea.

3.1.2 Marcos de referencia según el enfoque de gestión

Son muchas las entidades que han compilado cuerpos del conocimiento y marcos de referencia de gestión de proyectos, entre las más representativas están el *Project Management Institute* (PMI), cuyo *Project Management Body Of Knowledge* (PMBOK) se encuentra protocolizado como estándar del *American National Standards Institute* (ANSI) desde su sexta edición de 2017 y en su definición de proyecto hace especial énfasis en la producción del entregable final; cabe anotar que por cercanía y área de influencia su uso ha sido frecuente en el continente americano. La AACE es una de las más antiguas fundada en 1956, en su marco de referencia *Total Cost Management* (T.C.M) se enfoca en la concepción, creación, modificación y terminación del activo estratégico. Por su parte la *International Organization for Standardization* (ISO) con su estándar ISO-21500 de 2012, focaliza en el grupo de procesos para lograr los objetivos del proyecto. La *office government commerce* (O.G.C) promulgó la primera edición de su marco de referencia PRINCE2 en 1996, haciendo énfasis en la organización temporal para producción de entregables cumpliendo con el caso de negocio. De otro lado, a nivel de filosofías y enfoques, el *Lean Construction Institute* (L.C.I) fundado en 1996 se promulga como un pensamiento basado en la gestión de la producción y se enfoca en la optimización de las actividades que dan valor al cliente, el flujo de trabajo y el mejoramiento continuo.

Aunque la mayoría de las instituciones de gestión de proyectos se han esforzado porque sus cuerpos del conocimiento sean aplicables a cualquier tipo de proyecto, es cierto que, el ámbito de aplicación, el nivel jerárquico de gestión, las características de la organización, del proyecto y del producto entre otras, marcan la selección de un marco de referencia por encima de otros (Crawford & Pollack, 2004) (Wirth & Tryloff, 1995). En la **Tabla 1** se aprecian algunas de las entidades más relevantes de gestión de proyectos, seguidas del respectivo marco de referencia y el

país donde está ubicada la casa matriz de la institución que los promulga (Montes-Guerra et al., 2013), pero adicionando dos columnas según su orientación, el tipo de enfoque y otras entidades que no fueron tenidas en cuenta como la AACE y el ILC.

Tabla 1

Marcos de referencia de gestión de proyectos por orientación, enfoque y país.

Entidad	Marco de referencia	Orientado a	Enfoque	País
OGC	PRINCE2	Organizaciones	Caso de negocio	Reino Unido
AIPM	NCSPM	Personas	Certificación	Australia
ECITB	ECITB	Personas	Certificación	Reino Unido
PMI	PM CDF	Personas	Certificación	Estados Unidos
SAQA	SAQA	Personas	Certificación	Sudáfrica
APM	APMBOK	Proyectos	Caso de negocio	Reino Unido
BSI	BS 6079	Proyectos	Planificación	Reino Unido
IPMA	ICB	Proyectos	Resultados, calidad	Suiza
ISO	ISO 21500	Proyectos	Procesos, objetivos	Suiza
PMAJ	P2M	Proyectos	Procedimiento, valor	Japón
PMI	PMBOK	Proyectos	Resultado	Estados Unidos
LCI	LPDS	Proyectos	Producción, operaciones	USA
AACE	TCM	Proyectos	Activo estratégico	USA

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Situándonos en el ámbito del presente estudio, y una vez establecido el nivel jerárquico de gestión operacional, así como su énfasis en los procesos productivos, identificamos que lo planteado en la filosofía *Lean Construction* se ajusta como marco de referencia para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados.

3.2 *Lean Construction*

El pensamiento *Lean* ha nacido y se ha desarrollado en la industria manufacturera como un nuevo enfoque de producción que se adapta tanto a los desafíos globales, como a las nuevas tecnologías emergentes obteniendo mejoras en el comportamiento global de la productividad; por

su parte, la industria de la construcción ha querido replicar dichos principios y procedimientos encontrando como principal obstáculo las características propias de su naturaleza, entre ellas, la reticencia al cambio, la toma de decisiones basada en la experiencia, un enfoque tradicional no lineal de producción, poca o nula estandarización, diseño único, costo elevado, gran tamaño del producto y tiempos de ejecución extremadamente extensos entre otras. No obstante, Koskela en 1992 realiza la conceptualización respecto del enfoque de producción tradicional y el nuevo enfoque de producción abordando los problemas de flujo en los procesos (Koskela, 1992), así como las pérdidas de valor causadas por las peculiaridades antes mencionadas, así como una propuesta para la implementación de enfoque *Lean* a la industria de la construcción, allí también plantea los principios para el diseño y la mejora del proceso de flujo:

1. Reducir la proporción de actividades que no agregan valor.
2. Incrementar el valor de producción mediante la consideración sistemática de los requisitos del cliente.
3. Reducir la variabilidad.
4. Reducir los tiempos de ciclo.
5. Simplifique minimizando el número de pasos, partes y enlaces.
6. Aumente la flexibilidad de producción.
7. Incrementar la transparencia del proceso.
8. Enfoque el control en el proceso completo.
9. Incorporar la mejora continua al proceso.
10. Equilibre la mejora del flujo con la mejora de la conversión.
11. Benchmark.

Howell es otro autor relevante en la literatura del pensamiento *Lean Construction*, quien lo define como el resultado de aplicar nuevas formas de gestión de la producción a la industria de la construcción, con un enfoque que tiene el objetivo de satisfacer mejor las necesidades del cliente y priorizar la cadena de valor, optimizando los recursos. Las características esenciales incluyen un conjunto claro de objetivos para el proceso de entrega, destinados a maximizar el rendimiento a nivel de proyecto, el diseño concurrente del producto y el proceso, y la aplicación del control de producción a lo largo de la vida del producto desde el diseño hasta la entrega (G Howell, 1999). Existen tres metas principales en el diseño de sistemas de producción según *Lean Construction* (Ballard & Zabelle, 2000):

1. Producir el entregable de la manera más eficiente (Gestión de las tareas)
2. Eliminar las pérdidas (Gestión del flujo)
3. Maximizar el valor (Gestión del valor)

Valor en Lean Construction: El valor del entregable se establece desde las necesidades del cliente, y consiste en todas las actividades específicas requeridas para entregar el producto en las diferentes etapas de diseño, gestión de la información y transformación. Estas actividades se pueden dividir según el análisis del flujo de valor en: actividades que crean valor, actividades que no crean valor, pero son necesarias y actividades que no generan valor (pérdidas) (Frias, 2017).

Flujo constante: Obedece a realizar el proceso productivo en bloque y no en lotes, sin interrupciones, transporte ni esperas, al ritmo táctico (*takt time*) que marca la demanda y el sistema a tracción (*pull*).

Dentro del pensamiento *Lean*, el concepto de pérdida es esencial y está asociado al vocablo japonés "*muda*" que hace alusión a algo inútil o a un desperdicio, y fue establecido por Taichii Ohno en 1988 en el *Toyota Production System* (TPS). Específicamente en el contexto de la

industria de la construcción, pérdida es todo aquello que consume recursos y no agrega valor (Koskela, 1992), existen 7 fuentes principales para su obtención:

1. Sobreproducción
2. Esperas
3. Transporte innecesario
4. Sobreprocesamiento
5. Exceso de inventario
6. Movimientos innecesarios
7. Defectos de calidad

En la revisión bibliográfica realizada por Castaño, se identifican otras tres fuentes de pérdidas adicionales (Castaño-Jiménez et al., 2021):

8. Subutilización de la mano de obra
9. Accidentes de trabajo
10. Otros

En el contexto de la aplicación de los principios del pensamiento *Lean,* el logro de metas, la identificación de pérdidas, la satisfacción de las necesidades del cliente, priorización de la cadena de valor, normalmente se han empleado diversidad de herramientas en el marco de su implementación.

3.2.1 Herramientas de Lean Construction

En este apartado se describen las principales herramientas y prácticas correspondientes a la aplicación del pensamiento *Lean.*

3.2.1.1 Mapa de flujo de valor (*Value stream mapping*). Herramienta gráfica para visualizar el flujo de valor actual y diseñar el del estado futuro del proceso constructivo, mediante la reducción de fuentes de pérdidas como la sobreproducción, los tiempos de espera, inventarios y desplazamientos innecesarios, ha mostrado ser una herramienta adecuada para rediseñar sistemas

de producción (Maradzano et al., 2019) . La clave es que el flujo de material e información entre proveedores y clientes fluyan sin esperas, retrasos u otra fuente de pérdidas en todas las acciones requeridas para llevar el producto hasta el consumidor final (Lacerda et al., 2016) (Frias, 2017).

3.2.1.2 Justo a Tiempo (*Just-In-time JIT*). Sistema implementado por la compañía Toyota para eliminar todo aquello que no aporte valor, y que por ende debe considerarse fuente de pérdidas, además contemplando solo los materiales y equipos mínimos y necesarios para el proceso de producción (Bajjou et al., 2017), enfocándose en pequeños lotes de producción en la medida que la demanda así lo requiera (sistema a tracción) mediante el suministro de los materiales en el sitio de la obra para ser instalados sin incurrir en ninguna fuente de pérdidas.

3.2.1.3 Gestión Visual (*Visual Management*). Se realiza la implementación de señalización visual en el sitio de la obra mediante carteles de rutas de circulación, identificación de bodegaje de materiales y riesgos de accidente entre otros. Contribuye a la reducción de movimientos innecesarios y la seguridad en el trabajo (Castaño-Jiménez et al., 2021).

3.2.1.4 Sistema 5S (*5S System*). Técnica que busca la mejora de los procesos mediante la reducción de las pérdidas, el incremento de la efectividad en la productividad y la obtención de resultados consistentes (Chee Houa et al., 2018) mediante la aplicación de 5 principios: Clasificación, alineamiento, pulido, estandarizado y mantenimiento, tanto de las instalaciones como de los procesos empleados en la construcción. Dentro de sus ventajas esta la reducción del tiempo de búsqueda de insumos, equipo, herramientas y recursos en general, así como la organización de los espacios de trabajo y mejoramiento del ambiente laboral (Maradzano et al., 2019).

3.2.1.5 Sistema del último planificador (*Last Planner System LPS*). Aplicación de conceptos y metodologías Lean Construction para el control de la producción desarrollado por

Ballard en 1992, consta de: programa maestro, programa intermedio, análisis de restricciones y programa semanal, busca reducir la incertidumbre y la variabilidad en la producción (Aziz & Hafez, 2013) (Castaño-Jiménez et al., 2021). Mejora la fiabilidad del flujo del trabajo a través de la participación de todos los miembros del equipo del proyecto (Zhang & Chen, 2016).

3.2.1.6 Diseño del valor objetivo (*Target value design TVD*). Aplica métodos al diseño para ser desarrollado de acuerdo con las restricciones, en especial el costo. Prioriza los requerimientos del cliente para definir las restricciones y la entrega del valor (Miron et al., 2015).

3.2.1.7 Prefabricación (*Prefabrication*). Consiste en emplear componentes de construcción modulares, prefabricados, desacoplados y manejables, se enfoca en superar problemas comunes de producción en el sitio de la obra al facilitar el montaje final y la puesta en servicio (Alves et al., 2010).

3.2.1.8 Estandarización (*Standardization*). Conjunto de métodos, componentes y procesos en los cuales la regularidad y repetición llevan a prácticas exitosas, con el mínimo esfuerzo y en el menor tiempo posible (Fitchett & Hartmann, 2017).

3.2.1.9 A prueba de errores (*Error proofing poka-yoke*). Poka-joke es una palabra japonesa que se refiere a “prueba de errores”, la herramienta se enfoca en evitar errores y prevenir defectos en el flujo a lo largo del proceso constructivo, incrementando la calidad y las condiciones de seguridad en la obra (Abdelhamid & Salem, 2005).

3.2.1.10 Sistemas de entrega de proyectos Lean (*Lean project delivery system LPDS*). El Sistema de Entrega de Proyectos Lean es un conjunto de funciones interdependientes, reglas de toma de decisiones, procedimientos para la ejecución de funciones, herramientas de implementación, incluido el software cuando corresponda, acorde al marco conceptual

desarrollado por Ballard (Ballard & Zabelle, 2000) para guiar la implementación Lean Construction en sistemas de producción basados en proyectos (Aziz & Hafez, 2013).

3.2.1.11 Mejora continua (*Continuous improvement - Kaizen*). Contempla la idea que todo proceso puede y debe ser medido continuamente, analizado y mejorado en término de los recursos empleados, el tiempo requerido, la calidad demandada por el cliente y otros criterios de desempeño relevantes en la construcción (Sarhan et al., 2017).

3.2.1.12 Sistema "Kanban" a tracción (*Pull "Kanban" system*). Los sistemas a tracción son un enfoque desarrollado en la industria automotriz que solicita materiales y partes a lo largo de la cadena de valor sobre una base "justo a tiempo". La palabra "*Kanban*" significa tarjeta o formulario, y es el nombre asignado a la tarjeta de control usada en un sistema a tracción (Arbulu et al., 2003).

3.2.2 Selección de la herramienta Lean Construction

La finalidad de este estudio es ofrecer una metodología para el diseño de la cuadrilla de trabajo óptima en procesos constructivos de muros de mampostería H-12, enfocada en el momento de definir las cuadrillas en la etapa de ejecución del proyecto. Dicha metodología se basa en la consecución metas principales en el diseño de sistemas de producción según *Lean Construction* (Ballard & Zabelle, 2000) (Arbulu et al., 2003) referenciadas con anterioridad: producir el entregable de la manera más eficiente (Gestión de las tareas), eliminar las pérdidas (Gestión del flujo), maximizar el valor (Gestión del valor), requiriendo para ello seleccionar una herramienta *Lean* acorde con la consecución de los objetivos planteados. Con este propósito en la **Tabla 2** se visualizan los beneficios y mejoras que ofrecen diferentes herramientas *Lean* respecto de la disminución de pérdidas, observando que el mapeo de flujo de valor y el sistema 5s ofrecen mayor cobertura respecto de la disminución de fuentes de pérdidas con un 86% respecto de las otras

herramientas; de manera similar, en la **Tabla 3** se muestran las metas y objetivos a obtener según la herramienta *Lean*, donde el diseño de valor objetivo y el mapa de flujo de valor son herramientas que potencian el levantamiento y diagnóstico del proceso, siendo este un componente esencial para el modelado del proceso constructivo en cuestión y la consecución de dicho objetivo de investigación, pero se observa que el mapa de flujo de valor contribuye en la gestión de las tareas, esto sumado a la mayor cobertura en la disminución de fuentes de pérdidas nos permite seleccionarla como la herramienta *Lean* apropiada para realizar el levantamiento, diagnóstico, modelado y mejora del proceso de mampostería reseñado.

Tabla 2

Fuentes de pérdidas a mejorar con herramientas Lean

	Movimientos innecesarios	**Transporte**	**Inventario**	**Reprocesos**	**Espera**	**Preparación previa**	**Descanso**
Mapa de flujo de valor	X	X	X	X	X		X
Gestión visual	X	X		X		X	
Sistema 5S	X	X	X	X	X	X	
Sistema del último planificador			X	X	X	X	X
Prefabricación	X			X			
Estandarización	X	X	X	X	X	X	
A prueba de errores	X			X	X	X	
Sistema de entrega de proyectos			X	X			
Mejora continua		X		X			
Sistema Kanban			X				

Nota. Fuente: (Hossain et al., 2019) (Castaño-Jiménez et al., 2021).

Tabla 3

Metas y objetivos según la herramienta Lean

	Levantamiento y diagnóstico del proceso	Gestión de las tareas (Eficiencia)	Gestión del flujo (Pérdidas)	Gestión del valor (Valor)
Mapa de flujo de valor	X	X	X	X
Justo a tiempo		X	X	X
Gestión visual		X	X	
Sistema 5S		X	X	X
Sistema del último planificador		X	X	X
Diseño del valor objetivo	X		X	X
Prefabricación		X	X	X
Estandarización		X	X	X
A prueba de errores		X	X	X
Sistema de entrega de proyectos		X	X	X
Mejora continua		X	X	X
Sistema Kanban		X	X	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La aplicación del mapa de flujo de valor en la industria de la construcción puede agruparse en tres categorías (Li, 2015):

- Procesos de constructivos: Se identifican las pérdidas en el entorno y el desempeño del proceso de producción durante la etapa de ejecución.
- Macroprocesos: Uso integrado del mapa de flujo de valor para eliminar pérdidas en las entregas a nivel del proyecto para satisfacer las necesidades del cliente.

- Proceso de soporte de construcción: Usado para rediseñar el proceso de producción; puede mejorar la cadena de suministro; aplicación a nivel de estaciones de trabajo.

Para nuestro caso, se plantea abordar el mapeo desde la tercera clasificación, por la posibilidad de identificar las pérdidas a lo largo del proceso de producción, y adicionalmente realizar un rediseño de este a nivel más operacional (estaciones de trabajo).

Una vez seleccionada la herramienta Lean y también el contexto de aplicación, se procede a enumerar las etapas para su implementación.

3.2.3 Etapas del mapeo de flujo de valor

Una vez seleccionada la herramienta *Lean* de Mapa de flujo de valor, se procede a definir los pasos para su implementación en el proceso de mampostería analizado (Pasqualini & Zawislak, 2005).

3.2.3.1 Selección de la familia de productos. Se selecciona el entregable de muro divisorio en mampostería H-12 por su naturaleza cíclica respecto a su producción, adicionalmente a su representatividad en las edificaciones regionales y a la facilidad de observación en el sitio de la obra.

3.2.3.2 Mapeo del estado actual del proceso. Consiste de una construcción gráfica del proceso productivo actual, empelando símbolos como se muestra en la **Figura 2**, que contenga la representación del flujo de valor, materiales e información obtenidas en el sitio de la obra como se muestra en la **Figura 3.**

Para la actividad productiva de muros divisorios en mampostería la unidad de medida usada es el metro cuadrado terminado (m^2).

3.2.3.3 Análisis del mapa del estado actual del proceso. En el análisis se identifican las fuentes de pérdidas para posteriormente proponer acciones de mejora que se reflejen en la construcción de un nuevo flujo más regular, tiempos de entrega más cortos, incremento de la calidad y reducción de costos (Pasqualini & Zawislak, 2005). Para desarrollar este nuevo flujo se se aplican seis proposiciones principales Rother y Shook en 1998 :

La relación entre el ritmo de producción y el ritmo de ventas o entrega es denominado ritmo táctico (*tack time*), y la primera proposición plantea que un ritmo de producción por debajo del ritmo táctico refleja que se está produciendo más de lo que se está vendiendo o solicitando, en otras palabras sobreproducción; por otra parte, si el ritmo de producción está por encima del ritmo táctico implica que el proceso productivo no responde a la demanda, por esa razón, debe anticiparse y producir antes de que los clientes compren. La situación ideal es situarse en un punto de equilibrio entre el ritmo de producción y el ritmo de entrega, en el caso de la industria de la construcción es relevante los tiempos planteados en el cronograma de actividades y la productividad de las cuadrillas de trabajo.

La segunda proposición consiste en definir si la empresa debe producir para expedición o para un mercado de productos terminados. En el caso de la industria de la construcción, se presentan características especiales propias de su naturaleza asociadas al gran tamaño, tiempo y costo de los proyectos, donde en esencia la relación entre el comprador y la empresa no se presenta de manera instantánea, como sería en el caso de un producto de manufactura masiva en un supermercado, sino por el contrario se marca por una relación extendida en un plazo relativamente largo en el tiempo, expresa y reglada por medio de un contrato entre las partes, dentro del cual se encuentran clausulas claves como el plazo de entrega, que obedece entre otros a un cronograma de actividades, presupuesto, definición de alcances y garantías entre otros.

Procurar desarrollar el flujo continuo donde sea posible a lo largo del proceso productivo.

Donde el flujo continuo no es posible, debe usarse un supermercado para controlar la producción, en el caso de la industria de la construcción y sus características especiales este control de producción se podría lograr por terceros.

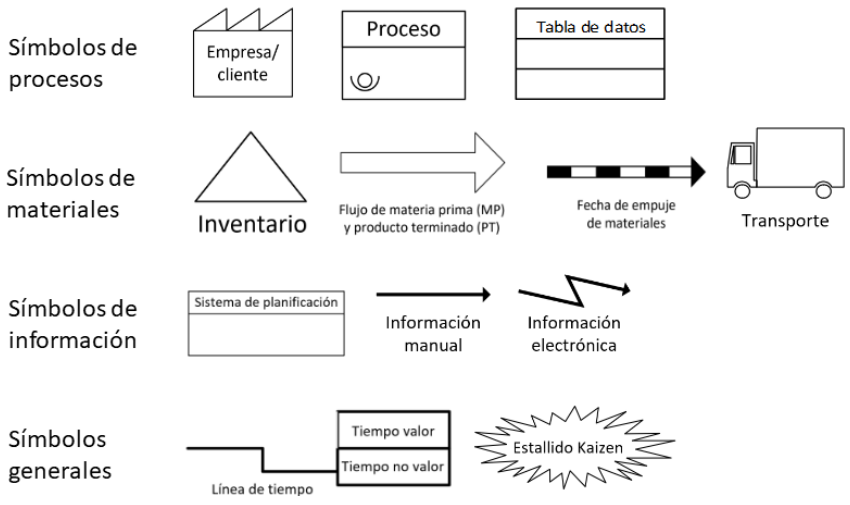
Establecer la programación de entregas al proceso de producción, es decir un proceso a tracción (*Pull*), que controla el ritmo de producción.

Distribución uniforme de la producción de los diferentes entregables a lo largo del proceso de tracción, nivelando su producción a lo largo de la ejecución.

3.2.3.4 Mapa del estado futuro del proceso. Esta representación gráfica se obtiene del análisis del mapa del estado actual observando la aplicación de las seis proposiciones anteriores, los principios y metas del pensamiento Lean Construction en el proceso constructivo. Representa un estado ideal de producción. Las mejoras planteadas deben observar los puntos donde se presentan las fuentes de pérdidas y como pueden ser reducidas, de ser posible eliminadas.

Figura 2

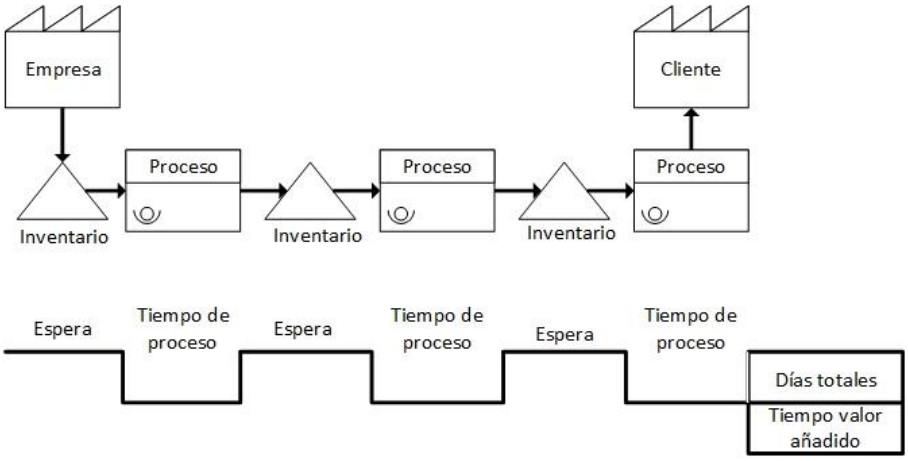
Símbolos relevantes en la elaboración de un mapa de flujo de valor



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3

Esquema de un Mapa de flujo de valor.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se plantea realizar el modelado o mapeo del proceso de mampostería H-12 realizando una descomposición del trabajo requerido para completarlo en tareas.

3.3 Modelos basados en tareas

Dichos modelos parten de dividir el trabajo requerido para la producción de un entregable de acuerdo a su importancia o necesidad. Ciertas tareas son consideradas básicas o necesarias, otras como complementarias y un tercer grupo de tareas innecesarias, que equivalentemente se caracterizan como sigue (Thomas & Daily, 1983):

Tareas de trabajo directo: Directamente suman a la unidad de producción que se está elaborando, por ejemplo, colocar, alinear, encajar, amarrar en su posición aquellos elementos que contribuyen directamente a completar la unidad de trabajo.

Tareas de trabajo contributivo: No suman directamente a la unidad producida, pero son necesarias para elaborarla, incluye acarrear y manipular los materiales hacia el sitio de trabajo,

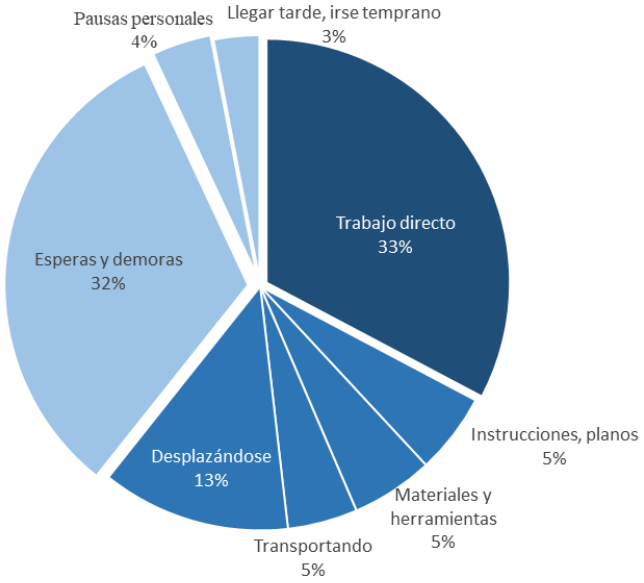
recibir o dar instrucciones, lectura de planos, transportar herramientas en las inmediaciones del área de trabajo, realizar mediciones, sostener materiales, armar o mover andamios, etc.

Tareas de trabajo inefectivo: Aquellas no necesarias para completar la elaboración de la unidad de producción, como caminar sin asignación de trabajo, tiempo parado sin justificación, tiempos de espera por materiales y/o herramientas o esperando a que otras cuadrillas terminen el trabajo para iniciar, llevarse las herramientas fuera del sitio de trabajo.

En la **Figura 4** se observa el modelo basado en tareas que componen un proceso constructivo de edificación vertical (Industrial), donde la fuerza del sombreado marca de manera respectiva a la intensidad el trabajo directo, el contributivo y el inefectivo.

Figura 4

Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo (Thomas).



Nota. Fuente: (Thomas & Daily, 1983).

A nivel regional, Serpell en 2002 plantea una caracterización similar del trabajo al interior de los procesos constructivos de la siguiente manera (Serpell et al., 2002):

Tareas de trabajo productivo: Aportan en forma directa a la producción tales como, colocar ladrillos, pintar un muro o colocación de acero de refuerzo.

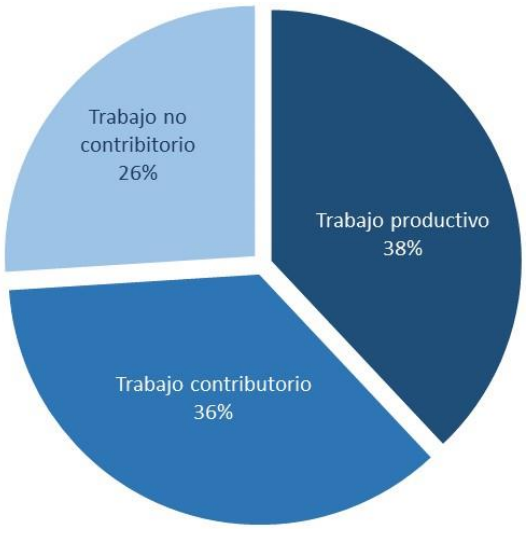
Tareas de trabajo contributorio: Trabajo de apoyo, debe realizarse para que pueda ejecutarse el trabajo productivo, algunas tareas son recibir o dar instrucciones, lectura de planos, retirar materiales, ordenar y limpiar, descargar un camión, etc.

Tareas de trabajo no contributorio o no productivo: El que no corresponda a las categorías anteriores, como caminar con las manos vacías, esperar a que otro obrero termine su trabajo, fumar, etc.

Adicionalmente, Serpell también propone una representación gráfica de los procesos constructivos propia de observaciones realizadas a proyectos de construcción vertical (Vivienda, hoteles, oficinas) en Chile durante un periodo de cinco años como se parecía en la **Figura 5.**

Figura 5

Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo (Serpell).

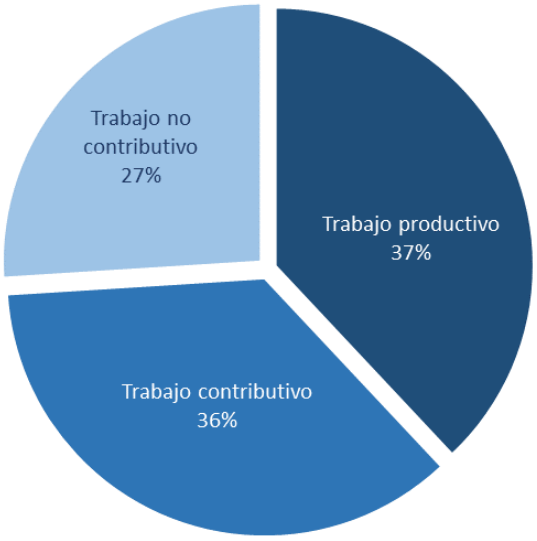


Nota. Fuente: Serpell, 2002.

En el ámbito local colombiano, Botero en 2004 realizó una caracterización que se aproxima más a lo planteado por Thomas en 1983, y expone los valores obtenidos en un estudio de mejoramiento de la productividad realizado por la Universidad EAFIT y un gremio relevante de la industria de la construcción de la ciudad de Medellín, específicamente a la construcción vertical de vivienda (L. F. B. Botero & Álvarez, 2004), como se muestra en la **Figura 6.**

Figura 6

Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo (Botero).



Nota. Fuente. Botero, 2004.

3.4 Cuadrillas de trabajo

A nivel genérico, las cuadrillas de trabajo se definen como unidades de trabajo continuo responsables de la producción de bienes y provisión de servicios (Cohen & Bailey, 1997). En la industria de la construcción, el recurso de la mano de obra agrupa individuos de producción

(trabajadores) en configuraciones usuales de equipos o cuadrillas de trabajo, compuestas por oficiales y ayudantes (Navas et al., 2012). Esta conformación de oficiales y ayudantes debe ser la estrictamente necesaria y suficiente para realizar una tarea de manera idónea, configurándose así la cuadrilla tipo (Mejía A. Guillermo & Hernández C. Triny, 2007). Aunque por lo general, los contratistas no definen una cuadrilla típica de trabajo, cada trabajo puede exigir un tamaño y una composición de cuadrilla completamente diferente (Hassanein & Melin, 1997).

Adicional a la conformación de las cuadrillas de trabajo laboral en obra, otro factor que influye en los índices de productividad es la alta rotación del personal que labora en la industria de la construcción. Esta situación dificulta la transferencia del conocimiento, que por lo general se da de manera tácita e informal, demandando a los nuevos trabajadores un mayor tiempo para la asimilación y adaptación en su desempeño en las nuevas tareas, lo que impacta de manera adversa en la productividad laboral. Este fenómeno se ha estudiado bajo el concepto de curvas de aprendizaje.

3.5 Productividad laboral en construcción (PLC)

Según Thomas, la productividad parcial constituye un indicador de referencia del desempeño a nivel operacional del insumo requerido en función de las unidades producidas, en este sentido, la productividad laboral en construcción se expresa como la relación entre la producción indicada en las unidades de medida instaladas del producto y la cantidad del insumo de mano de obra invertido para producir dichas unidades, indicado en horas-hombre u horas-cuadrilla, como se indica en la ecuación (1) (Park et al., 2005):

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{C}}{\mathbf{T}} = \frac{\text{Unidades instaladas}}{\sum(\text{horas hombre})} \quad \textbf{(1)}$$

4. Marco metodológico

Como marco metodológico se plantea emplear la investigación de la ciencia del diseño (*Design Science Research DSR*), que sitúa al investigador como un actor al interior del problema a solucionar (Holmström et al., 2009). Según Azhar, este tipo de metodologías podrían ser más beneficiosos para la industria de la construcción y pueden conducir a mejores prácticas de gestión, procedimientos de campo más efectivos y mejores niveles de productividad. Para la investigación de la ciencia del diseño, un "artefacto" es un producto o resultado de la investigación creado para solucionar problemas no resueltos (Azhar et al., 2010).

La investigación de la ciencia del diseño tiene su origen en la ingeniería y las ciencias de lo artificial (del diseño, no del comportamiento). Según Kasanen y Lukka, la investigación de la ciencia del diseño "se enfoca en desarrollar y evaluar artefactos innovadores, destinados a resolver problemas del mundo real y hacer una contribución a la teoría de la disciplina en la que se aplica" (Kasanen et al., 1993). March y Smith proponen cuatro artefactos que pueden ser desarrollados y evaluados en la investigación de la ciencia del diseño (Salvatore T. March *, 1995).

- Constructos: Conceptualización para describir problemas y sus soluciones específicas.
- Modelos: grupo de proposiciones o declaraciones que expresan relación entre los constructos.
- Métodos: un conjunto de pasos (un algoritmo o una guía) que se utilizan para formar una tarea. Los métodos se basan en un conjunto de construcciones subyacentes (lenguaje) y una representación (modelo) del espacio de la solución.

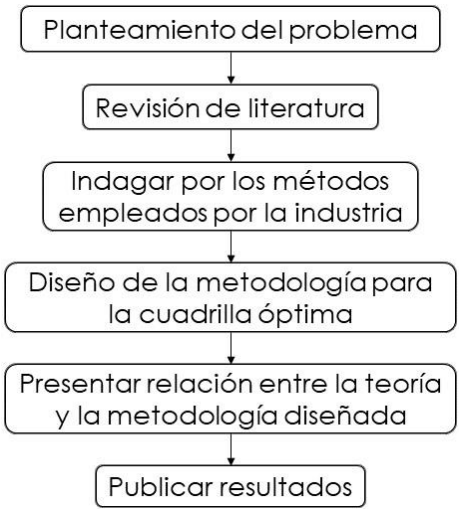
- Implementar: la realización de un artefacto en su entorno, es decir, la implementación (es) de constructos, modelos y métodos, demostrando la viabilidad de los elementos conceptuales que contiene la solución.

El artefacto que se adecúa para nuestra propuesta es la generación de un método, o conjunto de métodos, que contengan guías, algoritmos y representaciones modelo de una actividad específica, donde se articula un enfoque de optimización desde la gestión de procesos operacionales basado en *Lean Construction.* En esencia, lo que se desea proponer es una metodología para apoyar la gestión de proyectos basados en un sistema de prácticas, técnicas, procedimientos, y normas para determinar la cuadrilla óptima de trabajo en obra.

En la **Figura 7** se muestran los pasos del enfoque metodológico empleado.

Figura 7

Esquema metodológico del estudio.



Nota. Fuente: adaptado de Kasanen et al, 1993.

4.1 Planteamiento del problema

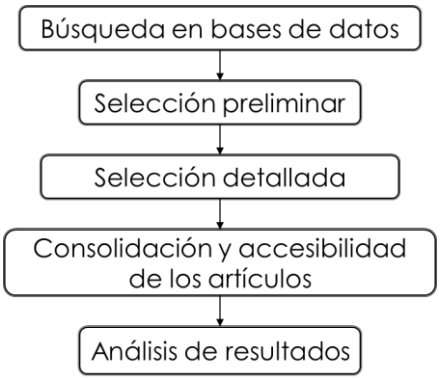
Para el planteamiento del problema se hace uso de herramientas como las preguntas de investigación, diagramas de causa y efecto, la continuidad de las líneas de investigación al interior de la unidad académica y la opinión de expertos participantes de la industria de la construcción.

4.2 Revisión de la literatura

Se realiza una investigación documental en las bases de datos de la literatura científica, mediante ecuaciones búsqueda con operadores booleanos, de acuerdo a la **Figura 8**, cuyo resultado es el estado del arte respecto de los métodos empleados para el diseño de la cuadrilla de trabajo óptima en procesos constructivos.

Figura 8

Metodología empleada en la revisión de literatura.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

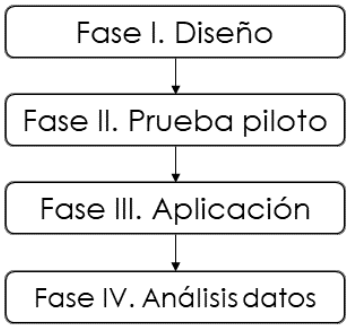
4.3 Indagar por los métodos empleados por la industria

Esta fase corresponde a la consecución del objetivo específico número dos, donde se busca el estado actual de la técnica respecto del diseño de las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos de la industria de la construcción en el contexto local, empleando para ello una encuesta. Cabe anotar que dicho resultado de la investigación fue publicado como un capítulo de

libro, titulado “Fundamentos conceptuales y métodos para determinar la conformación de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos” (Ardila & Mejía, 2021) del cual se extraen las fases de estudio que se muestran en la **Figura 9**.

Figura 9

Fases del estudio de indagación por los métodos empleados en la industria.



Nota. Fuente: Ardila y Mejía, 2021.

4.3.1 Fase I. Diseño de la encuesta

Con el fin de conocer los métodos y herramientas usadas por la industria de la construcción para el diseño de las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos, se selecciona la técnica de la encuesta, orientada a los profesionales de las empresas locales; se parte de una revisión de literatura y diseño del instrumento de recolección de la información.

4.3.1.1 Revisión de literatura. Se realiza en la base de datos Scopus, empleando las ecuaciones de búsqueda (TITLE-ABS-KEY (critical Review) AND TITLE-ABS-KEY (factors) AND TITLE-ABS-KEY (labour productivity)) y (TITLE-ABS-KEY (crew design)), de fecha 10 de mayo de 2021.

4.3.1.2 Diseño del instrumento de recolección. Se analizan las diferentes técnicas posibles a aplicar en el estudio, las más relevantes se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Técnicas e instrumentos de recolección.

Técnicas	**Instrumentos**
Observación	Lista de frecuencia
Entrevista	Guía de entrevista
Encuesta	Cuestionario
Grupo focal	Cuestionario
Narrativa	Biografía
Semántica	Redes semánticas
Análisis de contenido	Corpus sistematizados

Nota. Fuente: Cisneros et al. 2014.

La encuesta fue la técnica seleccionada debido al carácter exploratorio y descriptivo, de corte transversal para indagar sobre actitudes, prácticas y percepciones en un grupo determinado. Así mismo, se opta por el cuestionario como instrumento de recolección de la información, los canales digitales el medio de distribución, haciendo uso de la base de datos de las empresas constructoras inscritas en la Cámara de Comercio de Bucaramanga (CCB), además de las mesas de trabajo de la Sociedad Santandereana de Ingenieros (SSI). La estructura del cuestionario se compone de 5 secciones temáticas que agrupan 23 preguntas, distribuidas como muestra la **Tabla 5**.

Se empleó la técnica embudo para generar confianza al encuestado, formulando preguntas genéricas e impersonales al inicio, que progresivamente van involucrando mayor grado de opinión y compromiso a medida que se desarrolla el cuestionario (Blanco, 2011).

Respecto al tratamiento de las preguntas, 18 preguntas (72%) de las 23 son del tipo única cerrada, con opción de responder “otra, ¿Cuál?”. Las restantes 5 preguntas restantes (28%) son del

tipo escala Likert de importancia. Para evitar el sesgo por la elección de la primera opción, se aplica la rotación de respuestas.

Tabla 5

Estructura del cuestionario empleado.

Sección [Numeración de la pregunta]	**No. Preguntas**	**%**
A. Caracterización de las empresas [de 1 a 5]	5	22
B. Caracterización del encuestado [de 7 a 9]	3	13
C. Comportamiento económico del sector [de 10 a 15]	6	26
D. Métodos de conformación de cuadrillas [de 16 a 22]	8	35
E. Covid-19 [23]	1	4
Total	23	100

Nota. Fuente: Ardila y Mejía, 2021.

4.3.2 Fase II. Prueba piloto

A modo de validación del instrumento de recolección de la información, se aplica el cuestionario diseñado para evidenciar errores en la conformación de la estructura textual, faltas de coherencia, errores de redacción, enunciados con ambigüedad, errores en la tabulación de los datos.

La prueba se aplica a tres tipos de encuestados, en primera instancia a 2 expertos de la industria de la construcción, seguido a 3 docentes del área de gestión de proyectos de construcción, y finalmente a un grupo de 20 estudiantes de último semestre de la escuela de ingeniería civil, analizando el comportamiento de las respuestas al interior del instrumento y medio de aplicación. Se contó con observaciones respecto de los diferentes apartados y tópicos por parte de los participantes, tanto de forma como de fondo.

4.3.2.1 Observaciones de forma. La aplicación de la prueba piloto y su posterior análisis con el apoyo de un profesional en el lenguaje y corrección de estilo arrojó las siguientes observaciones:

- Las preguntas formuladas de forma abierta generaban gran cantidad de respuestas debido a la tabulación interna del uso de mayúsculas, minúsculas y errores orto tipográficos.
- La falta de instrucciones al inicio del cuestionario generó confusión en los encuestados.
- Se evidencio la necesidad de agrupar las preguntas en secciones por temas.
- Se evidencio la necesidad de informar el tiempo aproximado de respuesta del cuestionario y la cantidad total de preguntas que lo conforman.
- Se requiere ofrecer garantías de privacidad, buen manejo de los datos suministrados, confidencialidad y anonimato del encuestado.

4.3.2.2 Observaciones de fondo

- Las preguntas sobre comportamiento económico del sector, desde el punto de vista de la redacción y composición gramatical, no eran claras y generaban ambigüedad. Con el apoyo del profesional del lenguaje se reformulan las preguntas, solucionando la complejidad y ambigüedad de la propuesta inicial. El mejoramiento se evidenció en una redacción más sencilla y entendible.
- Las preguntas sobre métodos de conformación de cuadrillas de trabajo requerían una reformulación, basada en preguntas orientadoras, que respondieran el ¿quién?, ¿cuándo?, ¿cómo?, ¿qué método?, ¿qué herramienta?; se atendió esta observación, y las preguntas fueron reformuladas.

4.3.3 Fase III. Aplicación del cuestionario

Para la aplicación de la encuesta, se seleccionó el medio y la herramienta más favorable acorde a las condiciones y contexto actuales y también a la facilidad y versatilidad de uso, adicionalmente la caracterización de la población y muestra representativas.

4.3.3.1 Medio y herramienta de aplicación de la encuesta. Se escogen los medios digitales debido a la situación de COVID-19, estos son: correos electrónicos de las empresas constructoras registradas en las bases de datos de la CCB, la base de datos y las mesas de trabajo de la SSI. Se tuvo en cuenta que la selección de la herramienta favoreciera la consecución del objetivo del estudio, el alcance, el tiempo y los recursos disponibles, además, que facilitara la recolección de las observaciones y su almacenamiento, en este orden, la herramienta seleccionada fue *Google forms.*

4.3.3.2 Población y tamaño de la muestra. La población objetivo del presente estudio se definió tomando como base las empresas constructoras del área metropolitana de Bucaramanga, legalmente constituidas en la Cámara de Comercio de Bucaramanga. De acuerdo a la CCB, estas empresas se clasifican en actividades económicas con código CIIU, como se muestra a continuación en la **Tabla 6**.

Tabla 6

Empresas constructoras según CIIU.

CIIU	Tipo de construcción	No. Empresas	%
4111	Edificios residenciales	341	40
4112	Edificios no residenciales	60	7
4290	Obras civiles	460	53
	Total	**861**	**100**

Nota. Fuente: Ardila y Mejía, 2021.

La técnica de muestreo seleccionada fue el muestreo con población finita. El tamaño de la muestra representativa fue de 66 empresas constructoras, calculado en la ecuación (1). Los parámetros y los valores para el cálculo del resultado se muestran en la

Tabla 7.

$$n = \frac{z^2 pqN}{(\mathrm{N}-1)e^2 + z^2 pq} \quad (2)$$

n: Tamaño de la muestra
Z: Número distribución normal para un intervalo de confianza del 95%
p: proporción con la característica de interés
q: (1-p)
N: Tamaño del estrato
e: Error

Tabla 7

Parámetros para la determinación de la muestra representativa.

Parámetro	Valor
Confiabilidad	95%
N	861
Z	1,96
p	0,9
q	0,1
e	0,07
n	66

Nota. Fuente: Ardila y Mejía, 2021.

El cuestionario fue administrado vía correo electrónico haciendo uso de la base de datos de la Sociedad Santandereana de Ingenieros, que cuenta con 256 miembros, y del listado de 861 empresas constructoras constituidas en la Cámara de Comercio de Bucaramanga, esto aplicado durante el periodo comprendido entre el 02 de marzo de 2021 y el 08 de mayo de 2021. De las

1,117 solicitudes enviadas, se obtuvo una respuesta de 60 cuestionarios diligenciados, representando aproximadamente el 5,4 % de índice de respuesta.

4.3.4 Fase IV. Análisis de resultados.

Los resultados tabulados y organizados sistemáticamente por la aplicación fueron exportados a una hoja de cálculo, para hacer la estadística descriptiva de las variables. Las variables manejadas en la encuesta son de tipo cualitativo, nominales y ordinales basados en escala Likert de importancia, cuyo análisis estadístico se realiza con base en análisis de frecuencias para identificar tendencias y patrones. Los resultados de esta investigación se detallan en la sección de resultados.

4.4 Diseño de la metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en muros de mampostería desde el enfoque *Lean Construction*.

La elección del proceso constructivo de muros de mampostería obedece a su recurrencia en el desarrollo de los proyectos pertenecientes a “edificaciones”, subsector que presenta un decrecimiento del -26,5% en el valor agregado a corte del cuarto trimestre de 2020 respecto del mismo periodo del año 2019 (DANE, 2021), lo que plantea entre otros, problemas de baja productividad y por ende mayor impacto en la aplicación de metodologías y herramientas de mejora de los procesos. Adicionalmente, al ser una actividad cíclica y continua, con un ítem dominante, que facilita la observación, levantamiento y modelado del proceso constructivo.

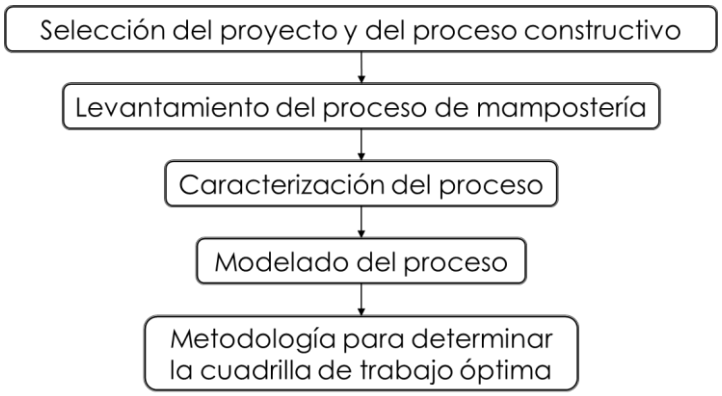
Los muros en mampostería de arcilla cocida de perforación horizontal en las últimas décadas han sido ejecutados bajo la modalidad de subcontratación, tanto en el ámbito internacional (Flórez & Castro-Lacouture, 2014) como a nivel local (L. Botero, 2012) razón por la cual esta metodología debe propender la facilidad de uso y aplicación por parte de estos contratistas.

La fase del ciclo de vida del proyecto de construcción que se estudia es la de ejecución o construcción.

Teniendo en cuenta estos precedentes, el diseño de la metodología cuenta con los pasos que se muestran en la **Figura 10**.

Figura 10

Metodología para la cuadrilla óptima de trabajo en mampostería H-12.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Selección del proyecto y levantamiento del proceso de mampostería

El acceso a proyectos de construcción con procesos de mampostería en ejecución fue difícil, dada la situación del COVID-19 presentada en el periodo comprendido entre 2020-2021, sin embargo, se logró tener acceso a un proyecto en ejecución que se desarrolla al interior del campus de la Universidad Industrial de Santander (UIS), para realizar la observación de la fase final de muros en mampostería de arcilla cocida de perforación horizontal tipo H-12.

Caracterización del proyecto observado y definición del caso de estudio.

En proyecto consta de una construcción compuesta por un sótano, siete niveles y una terraza, que constituirá el nuevo Edificio de Investigaciones de la Facultad de Ciencias (EDIC)

que se aprecia en la **Figura 11**; dicha estructura presenta un área rectangular en planta, con 14.5 m de ancho, 47.9 m de largo y 4.15 m de altura libre de entrepiso, pasillos laterales en voladizo de 2.0 m, extrusión en elevación para formar un único volumen que contiene laboratorios, zonas de trabajo, oficinas, salones, baterías de baños, cuartos de servicio, pasillos de acceso y circulación, escaleras y ascensores. El área aproximada en cada planta es de 727 m^2, para un área total construida de 5.816 m^2. El sistema estructural principal se compone de pórticos, escaleras, losas de entrepiso y losa de cubierta en concreto reforzado, así mismo, en las culatas cortas se presentan muros en concreto que ofrecen rigidez a la estructura (Sombreado de color negro en la planta tipo). A nivel de elementos no estructurales, se presenta un aprovechamiento de la luz natural empleando un uso predominante de divisiones en vidrio y particiones livianas, encontrando muros divisorios en mampostería de unidades de arcilla cocida de perforación horizontal tipo H-12 en la zona de baterías de baños, cuartos de gases y aire acondicionado, ductos y en el interior de las instalaciones (se muestran en sombreado rojo en la planta tipo), la tipología en planta se muestra en la **Figura 12**.

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 (ley 400 de 1997), en su acápite A.2.5.1.2, literal (d), ubica a esta edificación en el grupo de uso III, edificaciones de atención a la comunidad (Guarderías, escuelas, colegios, universidades y otros centros de enseñanza), y consecuentemente su coeficiente de importancia es de 1.25.

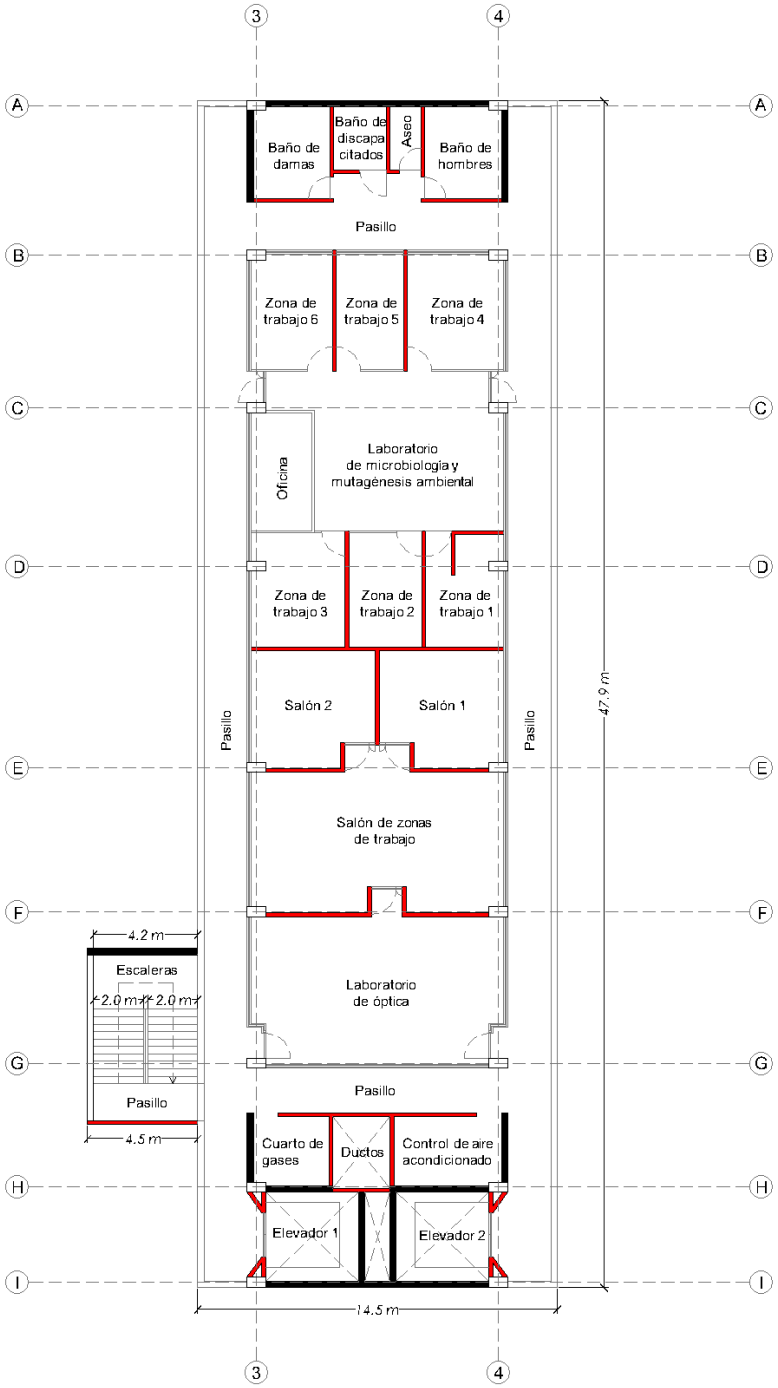
Figura 11

Nuevo edificio de investigaciones de la Facultad de Ciencias (EDIC) (en construcción).

Nota. Fuente: Fotografía de Ray Ardila, Bucaramanga, Santander, 2021. Colección particular.

Figura 12

Planta tipo del proyecto EDIC, escala 1 : 250.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Proceso constructivo de muros en mampostería tipo H-12.

El proceso constructivo elegido corresponde a la actividad de muros no estructurales en mampostería, dispuestos en forma de “estampa”, es decir, sobre el canto de 33 cm x 12 cm para obtener muros divisorios de 15 cm de espesor a nivel de acabados. Dichos muros divisorios están dispuestos en “trabe” cuando se interceptan ortogonalmente en planta, y confinados por elementos tipo columneta y vigueta en concreto reforzado de acuerdo a lo planteado en NSR-10 apartado E.3.1.1.2 y E.4; cabe anotar que dichos elementos de confinamiento configuran una actividad diferente en el cronograma, consecuentemente un ítem diferente en el presupuesto de obra, por tanto su control, seguimiento, recibo y pago se hace separadamente de la actividad de mampostería en estudio. En la **Figura 13** se observa el muro en mampostería H-12 observado.

Figura 13

Muro en mampostería tipo H-12. Edificio EDIC.

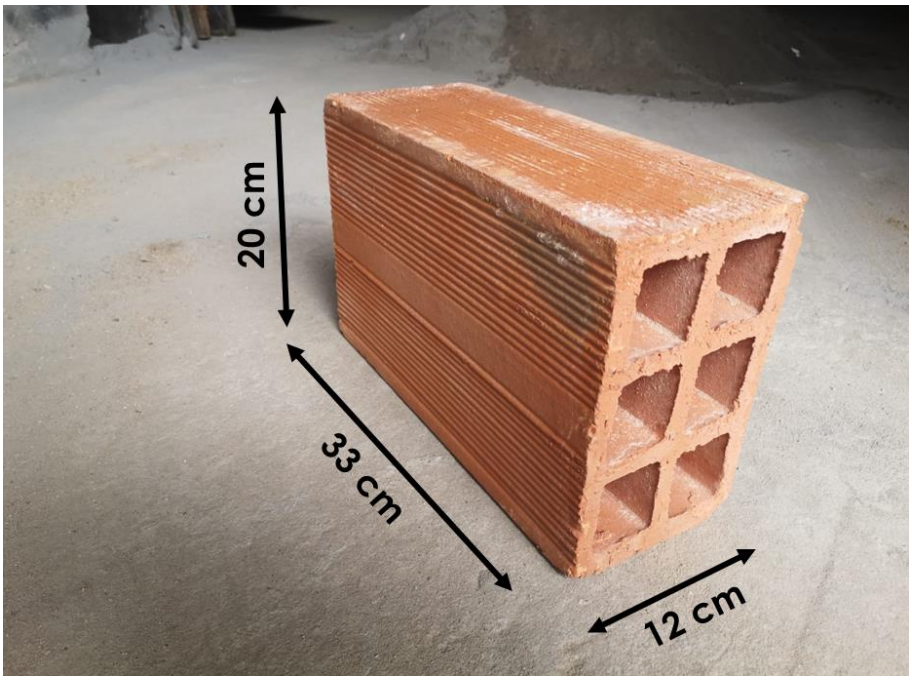
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Unidades que componen el muro de mampostería

Las unidades corresponden a ladrillos de arcilla cocida de perforación horizontal tipo H-12, con dimensiones: largo 33 cm, alto 20 cm y ancho 12 cm, que según NRS-10 E.3.2.1.2 (c) se clasifican como unidades de arcilla de resistencia clase baja y deben cumplir con la norma NTC 4205 (ASTM C56, C212, C216), el ladrillo observado en el proyecto del edificio EDIC se muestra en la **Figura 14.**

Figura 14

Unidades de mampostería de arcilla cocida, perforación horizontal H-12. Proyecto EDIC.



Nota. Fuente. Elaboración propia, fotografía: Ray Ardila, 2021.

Cálculo de la cantidad de ladrillos H-12

La cantidad de unidades de mampostería requeridas en un metro cuadrado se determina con la ecuación (3)

$$x = \frac{1\ \mathrm{m}^2}{(\mathrm{h}+\mathrm{d}`)*(\mathrm{L}+\mathrm{d}`)} \quad (3)$$

Donde:

x: Cantidad de ladrillos

h: Altura del ladrillo dispuesto de estampa

L: Largo del ladrillo dispuesto de estampa

d`: Espesor del mortero de pega

Para nuestro caso de estudio, bajo las características mencionadas, se requieren 12.08 unidades de mampostería o ladrillos H-12 por metro cuadrado de muro producido, sin tener en cuenta desperdicios.

Cálculo del desperdicio de ladrillos H-12

Para realizar la estimación de la cantidad de desperdicio de unidades de mampostería del proceso constructivo observado, se realiza la contabilización de las unidades o segmentos de unidades destruidas o no aprovechadas en un muro de 10 hiladas de altura compuestas de 10 unidades H-12 de ancho, con desplazamiento de medio ladrillo de hilada de por medio para generar la condición de "trabe". En la **Tabla 8** se muestra los parámetros para el cálculo del desperdicio y de los ladrillos totales necesarios por metro cuadrado de muro de mampostería H-12.

Mortero de pega

Según lo establecido en NSR-10 E.3.3, los morteros de pega deben tener buena plasticidad y consistencia, además de garantizar la retención de agua mínima para la hidratación del cemento. La función principal es adherir las unidades de mampostería y por ello se deben establecer dosificaciones que garanticen su calidad. La resistencia mínima a los 28 días debe ser 7.5 Mpa (75 Kg/cm^2). La dosificación entre el material cementante (cemento portland tipo 1) respecto del agregado fino (arena cernida en malla No.8) no puede ser superior a 4 volúmenes de arena respecto a 1 volumen de cemento. En el caso del mortero de pega observado en el proyecto EDIC, el mortero

es de una calidad superior, al contener menor proporción en volumen de arena, siendo esta 1:3, catalogado como un mortero tipo N según la clasificación propuesta en NSR-10 D.3.4-1. En la **Figura 15** se muestra la tarea de preparación del mortero de pega observada en el proyecto EDIC.

Tabla 8

Cálculo de desperdicio de unidades de mampostería y demanda semanal total.

Descripción	Cantidad	Und	Dimensión metros
Ancho muro	10,0	Ladrillos	3,30
Altura muro	10,0	Hiladas	2,30
Metros cuadrados		m2	7,59
Ladrillos empleados	105,0	ladillos	
Ladrillos desperdiciados	5,0	ladrillos	
Desperdicio calculado	4,8%		
Ladrillos por m2	12,08	ladrillos	
Ladrillos totales por m2	12,65	ladrillos	
Cantidad total requerida de metros cuadrados de muro	3433,0	m2	
Plazo de ejecución en el cronograma de obra	6,0	meses	
Demanda mensual de m2 de mampostería H-12	572,2	m2	
Demanda semanal de m2 de mampostería H-12	143,0	m2	
Demanda semanal de unidades de mampostería H-12	1810	Ladrillos	

Nota. Fuente. Elaboración propia

Cálculo de la cantidad de mortero

Para el cálculo de este componente fundamental de la mampostería H-12 observada se emplea la ecuación (4) que relaciona el área de mortero por metro cuadrado de mampostería y su espesor. En la **Tabla 9** se muestran los parámetros y resultados del cálculo de la cantidad de mortero de pega por metro cuadrado de mampostería.

$$y = \frac{[(\mathrm{h}+\mathrm{d}`)*(\mathrm{L}+\mathrm{d}`)]-(\mathrm{h}\ \mathrm{x}\ \mathrm{L})}{(\mathrm{h}+\mathrm{d}`)*(\mathrm{L}+\mathrm{d}`)} * e \quad (4)$$

Donde:

y: Cantidad de mortero en metros cúbicos
h: Altura del ladrillo dispuesto de estampa
L: Largo del ladrillo dispuesto de estampa
d`: Espesor del mortero de pega
e: Espesor del ladrillo puesto de estampa

Tabla 9

Cálculo de la cantidad de mortero de pega por metro cuadrado de mampostería H-12.

Descripción	Cantidad	Und
Espesor del mortero de pega (relación 1:3)	0,03	m
Altura del ladrillo	0,2	m
Largo del ladrillo	0,33	m
Espesor del ladrillo	0,12	m
Cantidad de mortero por m^2	0,024	m^3

Nota. Fuente. Elaboración propia

Un resumen de las cantidades demandadas de materiales en el proceso estudiado (arena, cemento y agua) por semana se muestra en la **Tabla 10**, y la cantidad total para el proyecto en la **Tabla 11**.

Tabla 10

Cálculo de demandas semanales de materiales para mortero de pega 1:3.

Descripción	Cantidad	Und
Demanda semanal de mortero de pega 1:3	3,48	m3
Desperdicio aproximado de mortero 5%	0,17	m3
Demanda total semanal de mortero de pega 1:3	**3,66**	**m3**
Cantidad de arena grano medio por m3 de mortero 1:3	1,09	m3
Cantidad de arena grano medio por m2 de muro H-12	0,027	m3
Demanda total semanal de arena grano medio para mortero de pega 1:3	**4,0**	**m3**
Cantidad de cemento gris portland tipo 1 por m3 de mortero de pega 1:3	454	kg
Cantidad de cemento gris portland tipo 1 por m2 muro H-12	11,1	kg
Demanda total semanal de cemento portland tipo 1 para mortero de pega 1:3	1660	Kg
Demanda total semanal de cemento portland tipo 1 para mortero de pega 1:4	**33**	**Bultos de 50 kg**
Cantidad de agua por m3 de mortero de pega 1:3	240	litros
Demanda total semanal de agua para mortero de pega 1:3	**878**	**litros**

Nota. Fuente. Elaboración propia

Tabla 11

Cálculo de cantidades totales de materiales para muros de mampostería H-12.

Material	Cantidad	unidad	Cantidad alternativa	Unidad alternativa
Ladrillos H-12	43.436	ladrillos	22	Viajes de 10 ton
Arena de grano medio para mortero de pega 1:3	96	m3	12	Viajes de 8 m3
Cemento gris portland tipo 1 para mortero de pega 1:3	39.845	kg	797	Bultos 50 kg
Agua libre de material orgánico para mortero de pega 1:3	21.064	litros	21	m3

Nota. Fuente. Elaboración propia

Figura 15

Preparación del mortero de pega, proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Fotografía: Ray Ardila, 2021.

Ubicación de los materiales y de los muros observados

Dentro de los recursos necesarios para la elaboración de muros de mampostería tipo H-12 se encuentran los materiales, a saber, ladrillos H-12, arena, cemento, agua. En la **Figura 16** se muestra la ubicación de los materiales en un plano de planta.

Cemento: Por su alto valor comercial, y por su tendencia a solidificarse al mínimo contacto con la humedad del ambiente, es gestionado directamente por el almacenista de la obra quien lo suministra a la cuadrilla cuando el oficial lo requiere, estando ubicado sobre estibas en lo que a futuro será el cuarto de gases, entre los ejes G y H a la derecha del eje 3.

Agua: Existe un punto de agua ubicado el sector a la derecha de los ejes 4 y 1, donde es recolectada empleando un cuñete de 4 galones de volumen (18 litros aproximadamente), pero se utiliza cerca de la mitad de esa capacidad por cuestiones de peso y la distancia.

Arena: Es descargada por las volquetas entre los ejes H e I al lado izquierdo del eje 3, allí también se hace el cernido empleando un "harnero" manual o "zaranda", para llevarlo al punto de instalación se emplea una carretilla o incluso, en ocasiones el cuñete mencionado anteriormente.

Ladrillo: Es descargado por el camión del proveedor entre los ejes E y F al lado izquierdo del eje 3 como se aprecia en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., para llevarlo al punto de instalación se emplea una carretilla, en ocasiones incluso se lleva al hombro. En la **Figura 17** se muestra el lugar de descargue y punto de acumulación de ladrillo H-12.

En la **Tabla 12** se muestran la distancias horizontales y verticales medidas en metros desde los puntos observados hasta la ubicación de los materiales en la obra.

Tabla 12

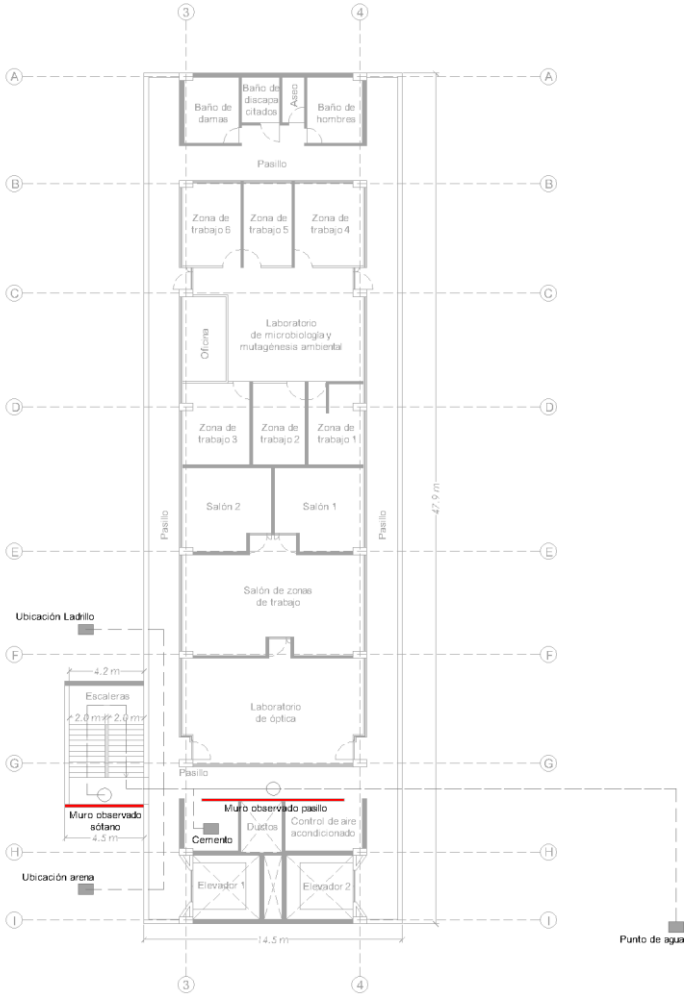
Distancia en metros desde los puntos observados hasta la ubicación de los materiales, proyecto EDIC.

Muro	Nivel	Ladrillo		Arena		Agua		Cemento	
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Pasillo	N+0.0 m	24	0	16	0	30	0	7	0
Sótano	N-3.74 m	28	3.74	25	3.74	51	3.74	20	3.74

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 16

Plano de ubicación de materiales y muros observados, proyecto EDIC, sin escala.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 17

Ubicación del ladrillo H-12, proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

Herramientas y equipos

Herramienta menor: Corresponde a la parte de los recursos que se emplean para potenciar la eficiencia de la mano de obra al aplicar técnicas a los procesos de transformación reduciendo el esfuerzo físico. Por lo general son de carácter liviano y son propiedad del subcontratista, a quien se le paga un "alquiler" por su uso; cabe anotar que este alquiler se tasa tradicionalmente con el 5% del valor de la mano de obra. Entre las herramientas observadas en el proceso de mampostería H-12 del proyecto EDIC se encuentran:

Cinta métrica: También reciben la denominación de flexómetros y en esencia son cintas metálicas flexibles con patrones de medición en forma de líneas marcadas en sentido transversal, con las medidas estandarizadas de los sistemas de medida más conocidos, a saber, el sistema internacional de medidas (*Système international d'unités*) con su unidad de longitud en metros, y por otra parte, el sistema anglosajón o imperial con su unidad de longitud en pulgadas, pies y yardas. Al interior del proceso, se emplea en las labores de localización y replanteo de ejes, niveles, establecer y verificar espesores de morteros, niveles de las hiladas, altura y largo del muro, entre otras. Es una herramienta fundamental, de uso continuo en las obras de construcción, aunque cabe anotar que con el paso del tiempo se han introducido al mercado dispositivos portátiles laser de medición y nivelado, llamados a reemplazar su uso en un futuro. En la **Figura 18** se muestra al lado izquierdo una cinta métrica típica observada en el proyecto EDIC.

Figura 18

Cinta métrica (flexómetro) y palustre observados en el proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

Martillo: Instrumento para realizar percusión sobre puntillas y otros elementos con el propósito de introducirlos en elementos de madera, mampostería, mortero o concreto; también tiene la función de realizar palanca para extraer elementos previamente martillados. Se emplea en las labores de alineamiento, formaleteado, apuntalamiento y demolición. En la **Figura 19**. se muestra la herramienta martillo observada en el proyecto referenciado.

Figura 19

Herramienta martillo observada en el proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

Manguera de niveles: Manguera elástica transparente cuyo diámetro exterior de la sección transversal oscila entre 8 mm y 10 mm, y de largo se encuentra entre 10 m y 20 m según el uso y la actividad. Usualmente se llena con agua, pero también puede usarse ACPM o líquido color verde, para de esta manera, emplear el principio de vasos comunicantes y transferir un nivel de un

punto “A” a un punto “B” ubicados en los extremos de la manguera. Se emplea en las labores de nivelación. La **Figura 20** muestra la manguera de niveles observada.

Figura 20

Manguera de niveles observada en el proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

Hilo: Cordel fabricado en polipropileno trenzado a tres cabos, con resistencia a la tracción mecánica propia de la actividad de la construcción, durable y de baja degradación a la humedad, empleado para ser tensado entre dos puntos con el fin de garantizar la horizontalidad y el alineamiento requeridos. Se emplea en las labores de alineamiento e hilado de los elementos. En la parte derecha de la **Figura 21** se muestra el hilo observado en el proyecto en los procesos de mampostería H-12.

Figura 21

Hilo de polipropileno tranzado a tres cabos, observado en el proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

Figura 22

Plomada metálica observada en el proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

Plomada: Herramienta de forma cónica usada para verificar la nivelación y la verticalidad de una superficie, donde se usa el principio de la gravedad para observar la ortogonalidad respecto de la horizontal del suelo. Las labores en las que se emplea son el aplomado y alineamiento de elementos. En la **Figura 22** se observa la plomada observada en el proceso ce mampostería.

Palustre: Herramienta de superficie plana y puntiaguda que cuenta con un mango de madera. Sus usos son amplios, desde la preparación del mortero, extenderlo en las brechas horizontales y verticales, limpiar excesos etc. En la **Figura 18** se observa el palustre observado en el proceso constructivo observado.

Llana de madera: Herramienta de superficie rectangular plana, mango de madera o plástico que puede ser abierto o cerrado, según el fabricante y calidad. Su uso es bastante amplio, encontrándose en labores como aplicar, distribuir y alisar frisos y morteros, para el proceso observado, se emplea para distribuir el mortero de pega en conjunción con el palustre. En la **Figura 23** se observa la llana de madera observada en la obra referenciada con anterioridad.

Hachuela metálica: Herramienta de fabricación preferible en metal, para ofrecer mayor energía de impacto al percutir elementos a ser diseccionados o divididos, las labores en las cuales es empleada al interior de proceso de mampostería es la de cortar ladrillos. En la **Figura 24** se muestra la hachuela observada.

Andamios: Se inscriben más en la categoría de equipos que en la de herramienta menor, generalmente son gestionados directamente por la empresa constructora no por el contratista. Esencialmente son estructuras provisionales, seccionadas, pueden ser fijas o móviles, por lo general compuestas por elementos metálicos tipo sección y cruceta; su principal labor es servir como apoyo para llegar a alturas no viables de manera convencional, y lograr así la ejecución de las labores constructivas, también facilita el acceso de materiales y herramientas a aquellos puntos

que lo requieran. En la actualidad se está implementando el uso de andamios certificados, multidireccionales, ajustables en altura, móviles, que cuentan con especificaciones que garantizan tanto la eficiencia cómo la seguridad en el trabajo. En la **Figura 13** se muestran los andamios tradicionales observados en el proceso estudiado conformados por dos secciones completas con sus respectivas crucetas.

Figura 23

Llana de madera observada en el proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

4.4.2 Levantamiento del proceso de mampostería

Para realizar el levantamiento del proceso constructivo de mampostería tipo H-12 actual presente en el proyecto EDIC se aplicarán los pasos que se muestran en la **Figura 25**.

4.4.2.1 Definición del objetivo de las observaciones y herramientas de recolección de los datos. El propósito del levantamiento es desglosar el proceso constructivo, logrando identificar las tareas que lo componen, así como el flujo de trabajo, relacionarlas con el responsable al interior de la cuadrilla, y finalmente cuantificar el trabajo efectivo, el trabajo contributivo y el no efectivo.

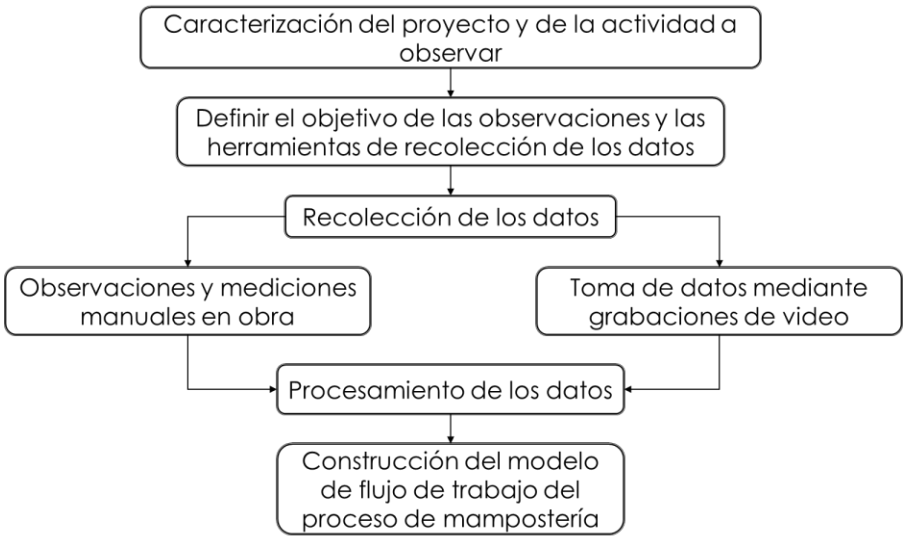
Figura 24

Hachuela metálica observada en el proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Fotografía Ray Ardila, 2021.

Figura 25

Levantamiento, procesado y construcción del modelo del proceso constructivo de mampostería H-12.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2 Herramientas de recopilación de la información: Se opta por la toma de grabaciones en video del proceso constructivo de mampostería, así como la toma manual de observaciones y mediciones en el sitio de la obra.

4.4.2.3 Recolección de datos. Se realiza la visita al lugar de la obra, se dispone de formatos de recolección de datos con la ubicación de los muros a observar, los lugares de almacenamiento de los materiales, toma de medidas y observaciones. También se realizan grabaciones de video con las diferentes tareas que componen el proceso constructivo.

4.4.2.4 Procesamiento de datos. Se realiza la observación de los videos, identificando las tareas principales que componen la actividad del proceso constructivo de mampostería, los responsables, los tiempos de trabajo efectivo, contributivo y no efectivo, relaciones lógicas de precedencia, rendimiento de los recursos y pérdidas.

4.4.2.5 Modelo del flujo de trabajo del proceso de mampostería. Se realiza la integración de la información respecto de tareas, relaciones lógicas de precedencia, responsable, tiempos de ejecución, rendimiento de los recursos y pérdidas, para comprender el funcionamiento interno del proceso.

4.4.2.6 Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en el proceso de mampostería tipo H-12. Basado en el caso de estudio planteado, se emplea la herramienta *lean* propuesta, se emplean los principios y metas de la filosofía *Lean Construction*, para diseñar una Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en el proceso de mampostería tipo H-12.

5. Resultados de investigación y discusión

Los resultados se presentarán de manera consecutiva de acuerdo al desarrollo de los objetivos de investigación propuestos en el numeral 2. y del marco metodológico planteado en 5.

5.1 Métodos existentes en la literatura científica para la determinación de la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo.

Se realizó una revisión de literatura en las bases de datos científicas indexadas en idioma inglés, mediante una ecuación de búsqueda con operadores booleanos que relaciona el diseño de las cuadrillas de trabajo y la industria de la construcción (*TITLE-ABS-KEY ("crew design") AND TITLE-ABS-KEY (construction)*). Se realiza la consulta de las publicaciones realzadas entre 1989 y 2020; las bases de datos científicas consultadas fueron Scopus y *Web of Science* (WoS), de donde se extrajeron 18 documentos, de los cuales 12 son artículos científicos, 5 ponencias en congresos y 1 capítulo de libro; seguidamente, se realizó un filtrado por área disciplinar y tema específico, para posteriormente realizar un análisis cronológico. Se diferencian tres segmentos en el periodo de análisis como se muestra en la **Figura 26**, el primero de 1989 a 1997 con 6 documentos, que marca un inicio en la inquietud investigativa por el tópico, el segundo el comprendido entre 1998 y 2005 con ausencia de documentos, y finalmente el tercer intervalo entre 2006 y 2020 con 12 documentos, que marca la vuelta del interés investigativo en el tema del diseño de las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos, para obtener una muestra de 18 documentos.

El primer segmento está marcado por el interés mostrado por Hassanein y Melin a finales de la década de los 90`s en la universidad de Illinois, donde inicialmente indagan por la metodología empírica usada por los contratistas de la industria de la construcción de edificios para conformar las cuadrillas de trabajo. Los resultados arrojan un proceso reconocible en forma de algoritmo que consta de 4 componentes principales, a saber, características del trabajo, características del contratista, características de la industria y datos de análisis. En sus estudios también incorporaron la noción de dividir las actividades en aquellas que contienen un ítem dominante, por ejemplo, la actividad de mampostería contiene un ítem dominante: los ladrillos, ya

que alrededor de ellos se consumen gran parte de los materiales, mano de obra y en sí recursos al interior del proceso; y de otra parte, aquellas que no tienen un ítem dominante como las redes eléctricas. Adicionalmente, identificaron que, en las primeras, los contratistas suelen priorizar sus esfuerzos y recursos en aquellos ítems dominantes. Dichos estudios también muestran los factores adversos de la productividad según los contratistas consultados, destacando el mal clima, la demora en los materiales, la demora en la actividad precedente y el flujo de trabajo discontinuo. También pudieron establecer ciertas reglas seguidas por los contratistas para diseñar empíricamente las cuadrillas de trabajo, donde se destaca el hecho de que en general los contratistas no tienen cuadrillas típicas, cada oficio y actividad tiene su conformación y tamaño diferentes para cada caso, aunque existen ciertos lineamientos respecto de cuanto es el mínimo y máximo de integrantes de la cuadrilla en los proyectos que ellos tratan de mantener, en ese sentido, los contratistas tratan de mantener el tamaño de la cuadrilla al mínimo para garantizar mayor control y productividad, mientras se garantiza un flujo de trabajo constante; Adicional a esto, pudieron establecer que cuando los requisitos de calidad aumentan, no se afecta el tamaño de la cuadrilla sino la capacidad de los individuos seleccionados para conformarla; de otra parte, el trabajo en alturas incide sobre el tamaño de la cuadrillas dependiendo de la clase de tareas ejecutadas. Dichos estudios marcan el inicio del uso incipiente para aquella época de herramientas y software computacional de una parte, y el desarrollo de algoritmos comparativos de tasas de productividad, en el proceso de diseño de la cuadrilla de trabajo. En este segmento de tiempo se introduce uno de los métodos encontrados en los artículos del marco teórico, que si bien no hace parte de la revisión de literatura, trae uno de los primeros métodos empleados para el diseño de las cuadrillas de trabajo desde la investigación de operaciones, es decir, la carta de balance de cuadrillas o método de ábacos, que exponen Thomas y Daily en 1983 y que trata de medir los

tiempos consumidos por los integrantes de la cuadrilla en las diferentes tareas que componen el proceso constructivo (Thomas & Daily, 1983), para después representarlos en unas barras o ábacos, para posteriormente balancearlos por métodos gráficos y de tasas de productividad.

Una década separa el segundo periodo de interés respecto del tema diseño de cuadrillas a nivel investigativo, ya que solo hasta el 2007 Björnfot y Jongeling realizan un estudio empleando el pensamiento *Lean Construction* para realizar el cronograma y programación de la obra, específicamente la herramienta de líneas de balance, y de otro modo, lo integran al uso de modelos espaciales introduciendo la dimensión del tiempo, configurando un modelo 4D para gestionar el flujo de recursos en las diferentes locaciones del proyecto de construcción, vislumbrándose el desarrollo de BIM *(Building Information Modelling)*, abordando el tema del tamaño de las cuadrillas de trabajo desde la Constructabilidad y la visualización de la congestión en los espacios de trabajo de manera virtual (Jongeling, 2016).

Al inicio de la siguiente década, en 2010 Nerwal y Abdelhamid, emplean unas reglas basadas en el pensamiento *Lean Construction* en lo referente al diseño de las cuadrillas de construcción, reafirmando la utilidad de esta filosofía aplicada a los procesos y operaciones de construcción (Nerwal & Abdelhamid, 2010); empleando lo planteado por Howell en 1994, donde se asevera que las operaciones pueden ser continuamente mejoradas si se llevan desde un estado "ajustado-pero-desbalanceado" a uno "relajado-y-desbalanceado", para finalmente llegar a uno "ajustado-y-balanceado" respecto del uso efectivo y proporcional de cada uno de los integrantes que componen la cuadrilla de trabajo (Greg Howell & Ballard, 1994); se emplea un caso de estudio para generar tres configuraciones que corresponden a cada uno de esos estados, demostrando que el tercero escenario es el que más agrega valor y garantiza el flujo continuo de trabajo en la actividad estudiada; se modela mediante una simulación de eventos discretos usando el programa

"EZStrobe" como herramienta de análisis. Posteriormente, en 2012 Nerwal propone lineamientos para el diseño de cuadrillas de trabajo bajo el enfoque *Lean Construction* que se basa en disminuir las 7 fuentes de pérdidas (Transporte, inventario, movimientos, esperas, sobreproducción, sobreprocesamiento y defectos), de otra parte, maximizar el valor (duración del trabajo, costo, productividad, calidad, satisfacción del trabajador, aprendizaje del trabajador, motivación del trabajador y orgullo por el trabajo realizado); para modelar se emplea una combinación de simulación de eventos discretos (DES) con modelos cualitativos y cuantitativos de dinámica de sistemas (SD) (Nerwal, 2012).

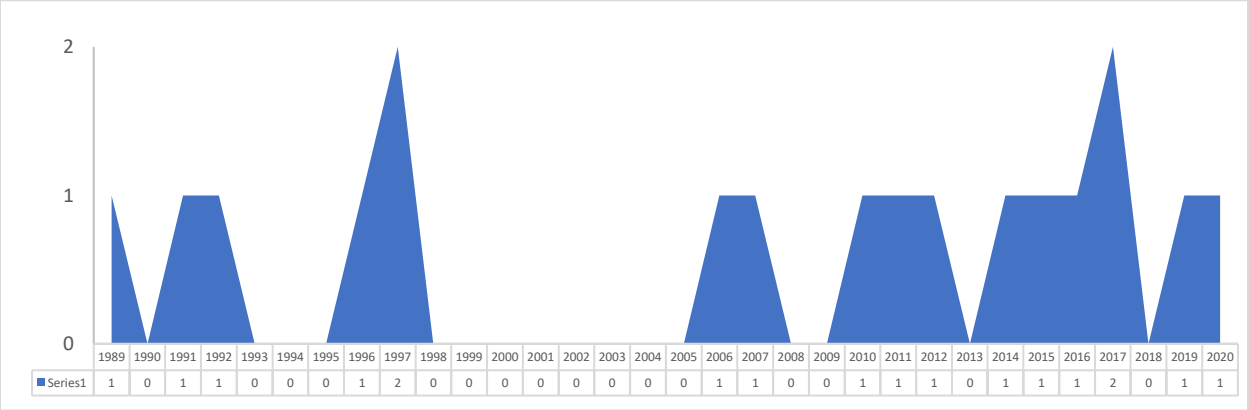
En 2014 Florez y Castro-Lacouture realizan un estudio respecto del diseño de cuadrillas en mampostería considerando los requerimientos del contratista (Composición de la cuadrilla, operarios fijos, tamaño de cuadrilla, control de la cuadrilla, curva de aprendizaje, compatibilidad entre trabajadores, calidad del trabajo) y las necesidades de los trabajadores (Crecimiento personal, estabilidad, motivación) en el marco de la programación lineal de restricciones (Flórez & Castro-Lacouture, 2014). En 2016 Florez desarrolla un sistema de asignación de cuadrillas de trabajo a diferentes secciones de mampostería del proyecto, optimizando funciones enmarcadas en programación lineal de restricciones como el tiempo de ejecución, el número de oficiales y ayudantes, los muros a ejecutar, la altura, el costo y la productividad. Cabe la pena anotar que este se enfoque apunta más hacia la nivelación de recursos (asignación del número de cuadrillas a los frentes de trabajo) desde un esquema tradicional de transformación del PMBOK (diagramas de Gantt) que hacia el diseño de la cuadrilla de trabajo, su número de integrantes y grado de formación al nivel operacional (Florez & Cortissoz, 2016). En 2017 Florez y Cortissoz desarrollan un modelo para predecir la productividad de las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos de mampostería, analizando la compatibilidad de sus integrantes de acuerdo a la personalidad de cada

integrante, integrando los factores de personalidad (OCEAN) en un análisis de clúster (Florez & Cortissoz, 2017).

Dentro del análisis del estado del arte, se evidencia escasa existencia de artículos científicos respecto del diseño de la cuadrilla de trabajo en procesos constructivos, adicionalmente se muestra que el marco de referencia más empleado a nivel de unidades de trabajo (cuadrillas) es *Lean Construction*; a este respecto se nota ausencia de artículos implementado las herramientas *Lean*, a excepción de las líneas de balance, razón por la cual se realizará la selección de una de ellas para emplearla en el estudio. De igual manera, se realizará el modelado por tareas que componen el proceso actual, de cara a identificarlas y caracterizarlas, para posteriormente realizar el mejoramiento del proceso futuro. Por estas razones se propone realizar una metodología que integre un modelo de descomposición de las tareas del proceso constructivo junto a una herramienta Lean, que sirva de guía para la conformación de las cuadrillas de trabajo enfocada a contratistas y residentes en obra en la fase de ejecución.

Figura 26

Resultados de la búsqueda por cantidad de documentos y año.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo el lineamiento metodológico de 5.2, se obtiene el total consolidado de 9 documentos, de los cuales 4 son artículos y 5 son documentos de congreso de ingeniería, relacionados directamente con el diseño de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos, como se muestra en la **Tabla 13**.

Tabla 13

Consolidado de documentos de la revisión de literatura.

Cantidad	Año	Tipo	Base de datos	País	Universidad	Autor
1	1996	Artículo	Scopus	Estados unidos; Egipto	University of Illinois; American University in Cairo	Hassanein A; Melin j
1	1997	Artículo	Scopus	Estados unidos; Egipto	University of Illinois; American University in Cairo	Hassanein A; Melin j
1	1997	Artículo	Scopus	Estados unidos; Egipto	University of Illinois; American University in Cairo	Hassanein A; Melin j
1	2007	Artículo	Scopus	Suecia	Luleå University of Technology	Björnfot A.; Jongeling R.
1	2010	Congreso	Scopus	Estados unidos	Michigan State University	Nerwal N; Abdelhamid T.S.
1	2012	Congreso	Scopus	Estados unidos	Michigan State University	Nerwal N; Abdelhamid T.S.
1	2014	Congreso	Scopus	Estados unidos	Georgia Institute of Technology	Florez L; Castro-Lacouture D
1	2016	Congreso	Web of Science	Reino unido, Colombia	Northumbria University, Universidad de los Andes	Florez L; Cortissoz J
1	2017	Congreso	Web of Science	Reino unido, Colombia	Northumbria University, Universidad de los Andes	Florez L; Cortissoz J

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Métodos para el modelado del diseño de la cuadrilla de trabajo en procesos constructivos.

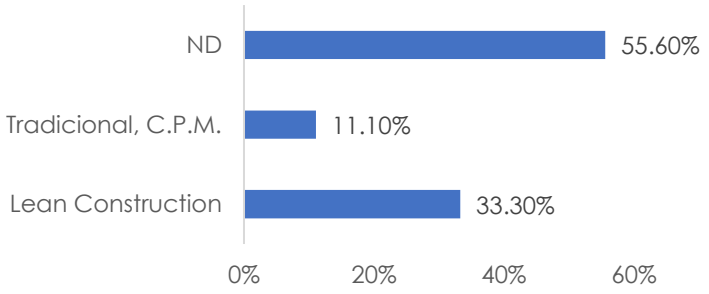
Año	Autor	Enfoque	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Método
1983	Thomas H; Daily J	ND	Matemáticos	Analítico	Análogo	Cartas de balance, ábacos
1996	Hassanein A; Melin j	ND	No algorítmicos	Encuesta	Juicio de expertos	Reglas de los contratistas
1997	Hassanein A; Melin j	ND	Matemáticos	Analítico	Análogo	Algoritmo de diseño contratistas
1997	Hassanein A; Melin j	ND	Matemáticos	Analítico	Análogo	Algoritmo de diseño contratistas
2007	Björnfot A.; Jongeling R.	Lean Construction	BIM 4D	Modelo 4D	Modelo 4D	BIM Modelo 4D
2010	Nerwal N; Abdelhamid T.S.	Lean Construction	Matemáticos	Simulación	Discreto	Simulación de eventos discretos (DES)
2012	Nerwal N; Abdelhamid T.S.	Lean Construction	Matemáticos	Simulación	Dinámico	Dinámica de sistemas (SD)
2014	Florez L; Castro-Lacouture D	Tradicional, C.P.M.	Matemáticos	Analítico	Paramétrico	Programación lineal de restricciones
2016	Florez L; Cortissoz J	ND	Matemáticos	Analítico	Paramétrico	Programación lineal de restricciones
2017	Florez L; Cortissoz J	ND	Matemáticos	Simulación	Estocástico	Análisis de clúster de productividad

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 27** se presenta el enfoque de producción empleado los documentos consolidados, adicionalmente, en la **Figura 28** se presenta la herramienta, método o modelo implementado. Finalmente en la **Figura 29** se muestra un organizador gráfico que relaciona los métodos, modelos y herramientas encontrados en la revisión documental de la literatura científica consultada.

Figura 27

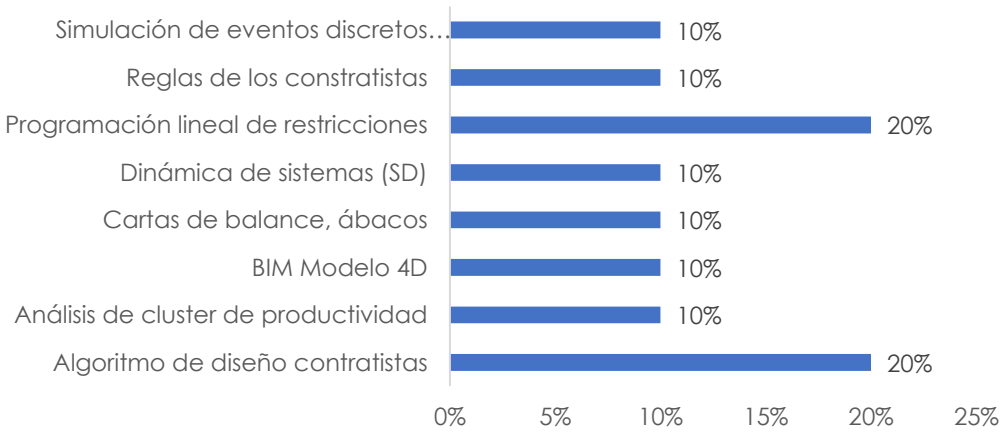
Métodos de diseño de cuadrilla de trabajo según el enfoque de producción.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 28

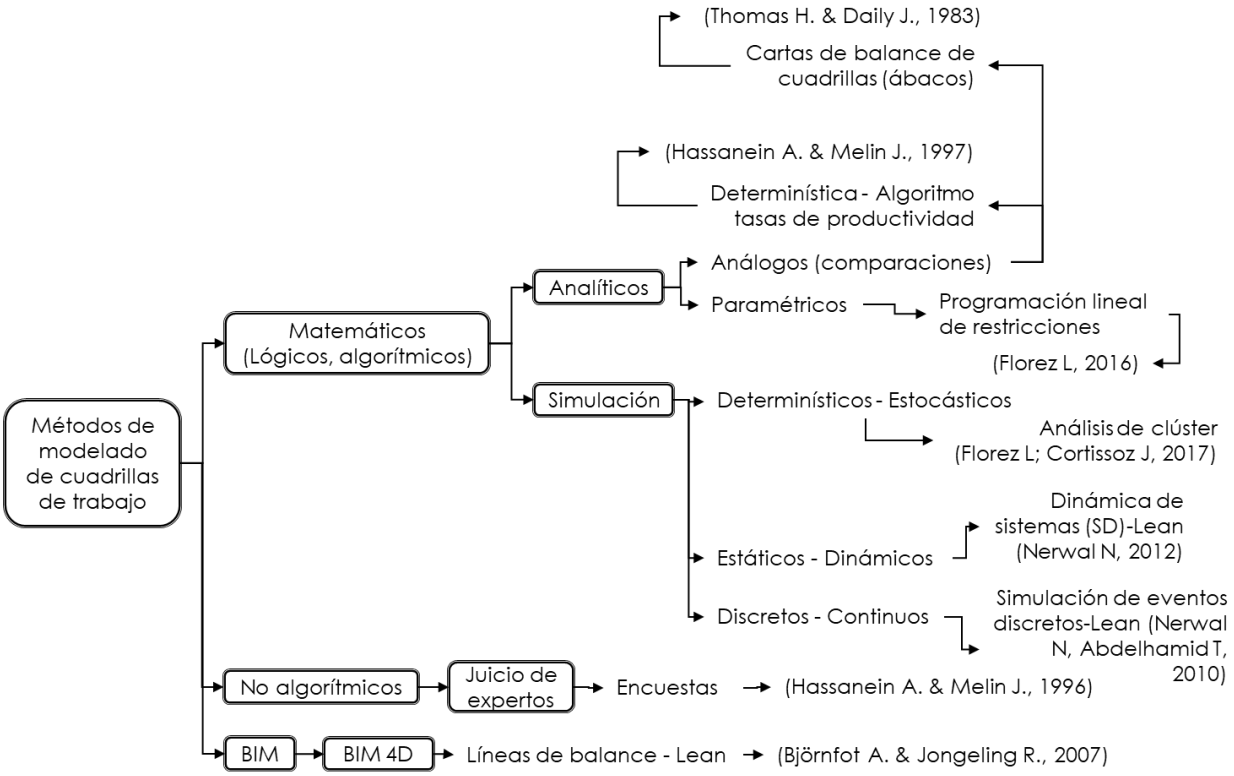
Métodos de modelado para diseño de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 29

Métodos de modelado de cuadrillas de trabajo.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

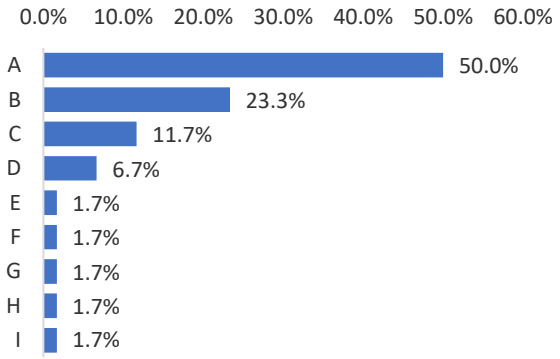
Finalmente podemos concluir que la mayoría de estudios se enfocan en optimizar el número de cuadrillas de trabajo, su ubicación, el tiempo de entrada y salida de nuevas cuadrillas de trabajo, pero la conformación interna de sus elementos (trabajadores) tal como su número, grado de capacitación, es un tópico en estado incipiente y de muy bajo interés de investigación hasta el momento, también se prefiere el desarrollo de herramientas que ofrecen solución a escenarios con gran número de variables que afectan la productividad en los proyectos de construcción, pero el marco teórico y conceptual alrededor del diseño de la composición interna de la cuadrilla de trabajo es irrisorio.

5.2 Métodos existentes en la práctica de nuestro contexto colombiano para la determinación de la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo mediante la aplicación de una encuesta a empresas constructoras regionales.

Después de aplicar el marco metodológico del numeral 5.3, se obtienen los siguientes resultados de investigación respecto de los métodos usados por la industria de la construcción regional para el diseño de las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos.

Figura 30

Marcos de referencia de gestión empleados por las empresas constructoras regionales en sus proyectos.

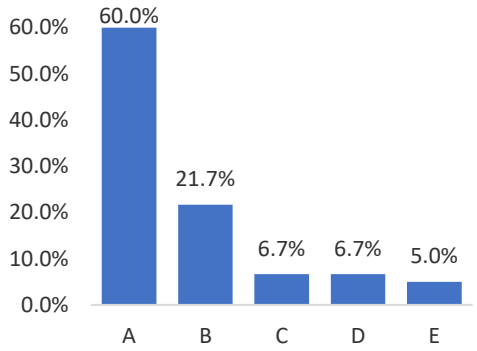


A. Ninguno, solo con base en la experiencia acumulada de la empresa. 50.0%
B. PMBoK del PMI. 23.3%
C. ISO 21500. 11.7%
D. Lean Construction, 6.7%
E. La extensión de construcción del PMboK del PMI. 1.7%
F. Indicadores creados y desarrollados dentro de la propia empresa. 1.7%
G. Manual de diseño del cliente, 1.7%
H. La teoría del pareto 80% consumen el 20% del esfuerzo.1.7%
I. Normatividad Invias. 1.7%

Nota. Fuente: Ardila R, y Mejía G, 2021.

Figura 31

Métodos empleados por las empresas constructoras regionales para determinar cuántos integrantes deben conformar una cuadrilla de trabajo en procesos constructivos.

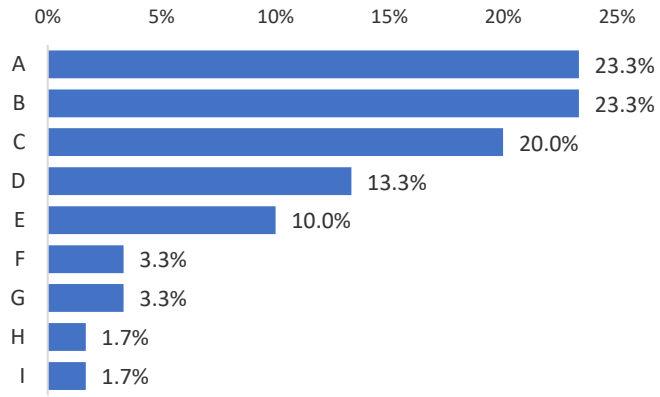


A. Método de asignación directa basado en la experiencia de proyectos anteriores.
B. Método basado en rendimientos de mano de obra extraídos de bases de datos comerciales.
C. Método apoyado en herramientas computacionales o de software.
D. Ninguno
E. Método de regla de tres, que relaciona las horas hombre y el requerimiento del proyecto.

Nota. Fuente: Ardila R, y Mejía G, 2021.

Figura 32

Responsable de determinar la cantidad de integrantes de la cuadrilla de trabajo y su grado de capacitación.



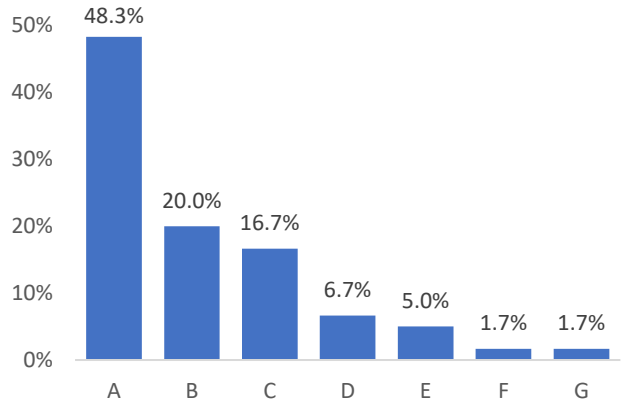
A. Lo determina el mismo proceso, la formaleta o la cantidad de recursos disponibles.
B. Lo determina el ingeniero/arquitecto residente de obra.
C. La determina el director de obra.

D. La determina el maestro general de la obra.
E. El subcontratista de la mano de obra
F. La determina el oficial que lidera la cuadrilla con base en su experiencia.
G. Lo determina el equipo del proyecto (director - residentes - supervisores)
H. El espacio, condiciones y el tipo de personal asociado al tiempo a ejecutar
I. Lo determina el presupuesto con la referencia del encargado

Nota. Fuente: Ardila R, y Mejía G, 2021.

Figura 33

Momento en el que se determina cuantos integrantes debe tener la cuadrilla de trabajo.

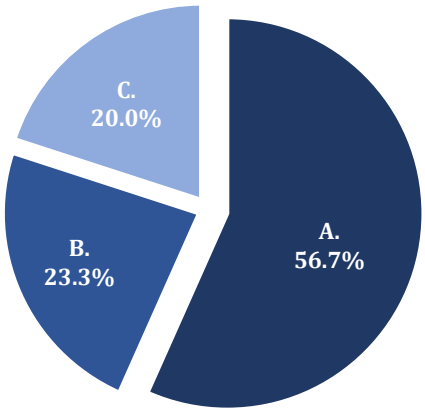


A. Antes de iniciar el proyecto.
B. Al inicio del proyecto.
C. Al inicio de la semana de trabajo.
D. Al inicio de cada catorcena de trabajo.
E. Al inicio de la jornada de trabajo.
F. Al inicio de cada etapa específica del proyecto.
G. Depende del proyecto, inclusive del lugar de ejecución.

Nota. Fuente: Ardila R, y Mejía G, 2021.

Figura 34

Requerimientos tenidos en cuenta para conformar la cuadrilla de trabajo.

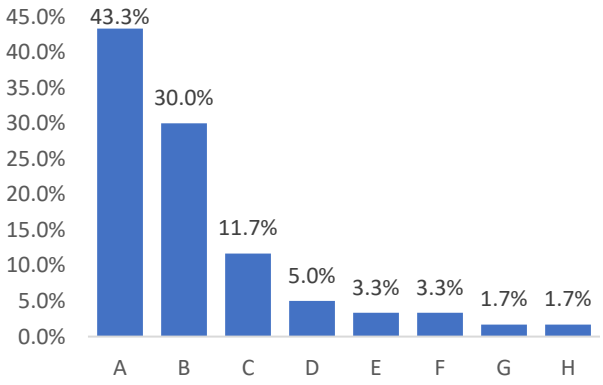


A. Con base en los requerimientos obtenidos en la fase de planificación del proyecto.
B. Con base en la experiencia del maestro de obra y de otros proyectos.
C. Teniendo en cuenta la cantidad de material y de equipos disponibles en el sitio de la obra.

Nota. Fuente: Ardila R, y Mejía G, 2021.

Figura 35

Método o herramienta usada para determinar la cantidad de integrantes de las cuadrillas de trabajo y su grado de capacitación.



A. Ninguna
B. Cartas de balance de cuadrillas de trabajo
C. Programación de sistemas
D. Ábacos de balanceo de cuadrillas
E. Experiencia

F. Algoritmos matemáticos
G. Regresión lineal
H. Cantidades de obra versus rendimientos y plazos

Nota. Fuente: Ardila R, y Mejía G, 2021.

En cumplimiento del objetivo específico #2, con preocupación se observa la informalidad en cuanto a la escogencia e implementación de marcos de referencia de gestión de proyectos por parte de las empresas constructoras participantes en el estudio, de las cuales un 50% manifiestan no emplear ninguno, solo 23.3% de ellas manifiestan emplear el PMBoK del PMI entre otros marcos de referencia, como se muestra en la **Figura 30**.

Uno de los principales hallazgos en la consecución del objetivo específico #2 es la ausencia de métodos para determinar la cantidad y el grado de formación de los integrantes de las cuadrilla de trabajo en procesos constructivos por parte de las empresas constructoras consultadas, donde 60% de ellas expresan que lo hacen basados en la experiencia de proyectos anteriores, el 21% apoyados en base de datos comerciales de rendimientos como se muestra en la **Figura 31**.

Otro fenómeno relevante se presenta cuando se indaga por el responsable de conformar dicha cuadrilla de trabajo en el sitio de la obra de construcción, pues 23.3% de los encuestados responden que nadie lo hace, que el mismo proceso constructivo autorregula la conformación de la cuadrilla de trabajo, otro 23.3% responde que el residente de obra, 13.3% que el maestro, 10.0% que el subcontratista, 3.3% el oficial de la cuadrilla, incluso 1.7% que el espacio disponible y finalmente 1.7% el presupuesto, como se observa en la **Figura 32**.

Finalmente, se indaga por el momento en que se debe determinar la conformación de la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo, de manera previsible el 48.3% responde que antes de iniciar el proyecto en la etapa de planificación, 20% al inicio de la obra, 16.7% al inicio de la semana, entre otros cómo se aprecia en la **Figura 33**.

5.3 Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en muros de mampostería H-12 de edificaciones.

Los resultados obtenidos en la consecución del tercer objetivo específico se muestran conforme al planteamiento metodológico que se muestra en el numeral 5.4.

5.3.1 Levantamiento del proceso constructivo de mampostería H-12 edificio EDID UIS

El levantamiento del proceso de mampostería tipo H-12 se realizó por medio de observación directa, acompañada de realización de videos en el sitio de la obra, y se pudieron establecer los siguientes resultados:

Cálculo de los ciclos de observación

El ciclo de producción se toma como el tiempo requerido por la cuadrilla de trabajo para realizar una unidad de medida del entregable, para este caso, la unidad de medida es el metro cuadrado (m^2) de muro en mampostería H-12 terminado; la cuadrilla está compuesta por un oficial y un ayudante ((Oficial x Ayudante) ó (1x1)). La productividad laboral en construcción fue fijada por el contratista de la mampostería en 24 m^2/día-cuadrilla, razón por la cual se trabajó con esta tasa para establecer el ciclo de observación. Empleando la ecuación (1) del numeral 3.5:

$$\boldsymbol{P} = \frac{24\ \text{m2} \qquad \text{x 1 día}}{\text{día}-\text{cuadrilla x 8 horas}} = \frac{3\ \text{m2}}{\text{Hora}-\text{cuadrilla}} \quad (1)$$

Despejando de la ecuación anterior, el tiempo de ciclo inicial (tci) para producir un metro cuadrado de esta cuadrilla (1x1) es:

$$\textbf{tci} = \frac{1\ \text{hora} - \text{cuadrilla x}\ 60\ \text{min}}{3\ \text{m2} \qquad \text{x} \quad 1\ \text{hora}} = 20\ minutos/m2$$

Datos observados

Las observaciones se dividen en 20 ciclos de 20 minutos cada una, a excepción de los ciclos 6, 14, 17 y 20, debido a los horarios de la obra de construcción y las restricciones del dispositivo de grabación de video. En dichas observaciones se realiza la identificación de las tareas y labores que componen el proceso de la producción de muros en mampostería de arcilla cocida de perforación horizontal tipo H-12, así como la toma de tiempos de instalación de los materiales que lo componen. En la **Tabla 15** se muestran los ciclos, su duración, las unidades de mampostería (ladrillos)y los metros cuadrados instalados. Para efectos de tener los mismos intervalos de tiempo se normalizan los datos realizando proporciones en las observaciones desiguales, como se muestra en la **Tabla 16**. Las métricas de estadística descriptiva aplicadas a los datos de metros cuadrados instalados se muestran en la **Tabla 17** y las de metros cuadrados acumulados en la **Tabla 18**, seguidamente, el comportamiento gráfico de los metros cuadrados instalados y de los metros cuadrados instalados acumulados respecto de los ciclos de observación se observan en la **Figura 36** y la **Figura 37** respectivamente.

Tabla 15

Ciclos de producción observados en el proceso de mampostería H-12, proyecto EDIC.

Ciclo	minutos	Ladrillos instalados	Ladrillos acumulados	metros cuadrados	metros acumulados
1	20.0	7.5	7.5	0.6	0.6
2	20.0	14.5	22	1.2	1.8
3	20.0	2	24	0.2	2.0
4	20.0	10	34	0.8	2.8
5	20.0	12	46	1.0	3.8
6	*13.8*	*2*	*48*	*0.2*	*4.0*
7	20.0	8	56	0.7	4.6
8	20.0	12	68	1.0	5.6
9	20.0	11	79	0.9	6.5

10	20.0	13	92	1.1	7.6
11	20.0	10.5	102.5	0.9	8.5
12	20.0	6	108.5	0.5	9.0
13	20.0	6.5	115	0.5	9.5
14	*17.0*	*6.5*	*121.5*	*0.5*	*10.1*
15	20.0	0	121.5	0.0	10.1
16	20.0	9	130.5	0.7	10.8
17	*26.4*	*14.5*	*145*	*1.2*	*12.0*
18	20.0	8.5	153.5	0.7	12.7
19	20.0	2.5	156	0.2	12.9
20	*30.3*	*0*	*156*	*0.0*	*12.9*
Totales	**407.5**	**156.0**	**156.0**	**12.9**	**12.9**

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Ciclos de producción observados en el proceso de mampostería H-12, proyecto EDIC (Tabla normalizada).

Ciclo	minutos normalizados	Ladrillos instalados normalizados	Ladrillos acumulados normalizados	metros cuadrados normalizados	metros acumulados normalizados
1	20.0	7.5	7.5	0.6	0.6
2	20.0	14.5	22.0	1.2	1.8
3	20.0	2.0	24.0	0.2	2.0
4	20.0	10.0	34.0	0.8	2.8
5	20.0	12.0	46.0	1.0	3.8
6	20.0	2.9	48.9	0.2	4.0
7	20.0	8.0	56.9	0.7	4.7
8	20.0	12.0	68.9	1.0	5.7
9	20.0	11.0	79.9	0.9	6.6
10	20.0	13.0	92.9	1.1	7.7
11	20.0	10.5	103.4	0.9	8.6
12	20.0	6.0	109.4	0.5	9.1
13	20.0	6.5	115.9	0.5	9.6
14	20.0	7.6	123.6	0.6	10.2
15	20.0	0.0	123.6	0.0	10.2
16	20.0	9.0	132.6	0.7	11.0
17	20.0	11.0	143.5	0.9	11.9

18	20.0	8.5	152.0	0.7	12.6
19	20.0	2.5	154.5	0.2	12.8
20	20.0	0.0	154.5	0.0	12.8
Totales	**400.0**	**154.5**	**154.5**	**12.8**	**12.8**

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17

Estadística descriptiva de los metros cuadrados instalados por ciclo.

Variable	N	N*	Media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
C2	20	0	0.64	0.36	0.128	55.86	0.0	0.68	1.2

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18

Estadística descriptiva de los metros cuadrados instalados acumulados.

Variable	N	N*	Media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
C3	20	0	7.43	4.008	16.066	53.97	0.62	8.13	12.8

Nota. Fuente: Elaboración propia

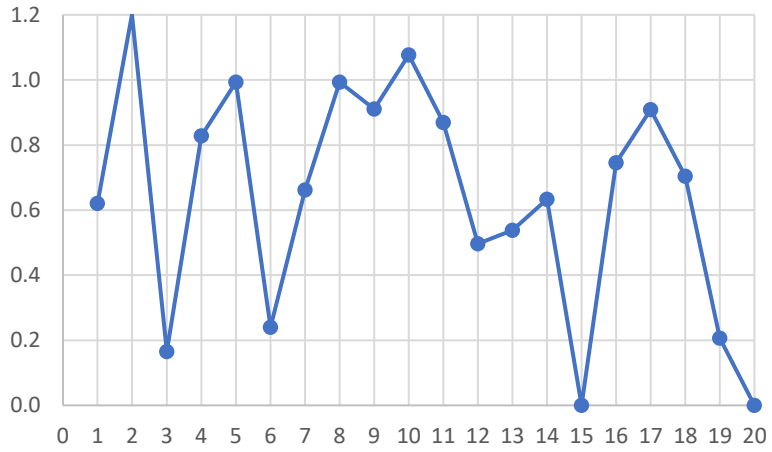
Cálculo del tiempo de ciclo real de producción (tcr)

Basados en la cantidad de metros cuadrados instalados y de las horas cuadrilla gastadas, se calcula el ciclo real para producir 1 metro cuadrado en el proceso de mampostería observado para el caso de estudio analizado.

$$\mathbf{tcr} = \frac{400\ \text{min}}{12.8\ \text{m2}} = \mathbf{31.26}\ \boldsymbol{minutos/m2}$$

Figura 36

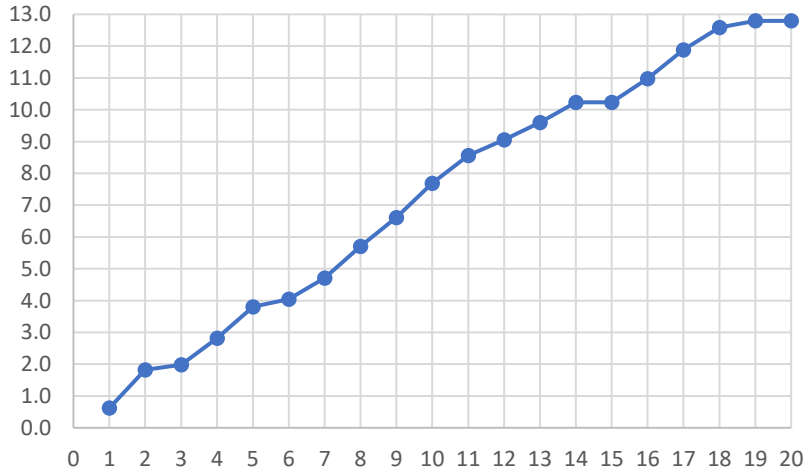
Gráfico de metros cuadrados instalados (eje vertical) por ciclo de observación (eje horizontal).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 37

Gráfico de metros cuadrados instalados acumulados (eje vertical) por ciclo de observación (eje horizontal).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza un análisis de regresión lineal ajustada de la variable metros cuadrados acumulados contra el número de ciclos observados se obtiene la ecuación (5). En la **Tabla 19** se muestra el resumen de la regresión lineal, y en la **Tabla 20** el análisis de varianza del mismo:

$$\mathbf{C3} = 0.3575 + 0.6733\ \mathbf{C1}\ \mathbf{(5)}$$

Donde:

C1=Cantidad de ciclos observados.
C2=Metros cuadrados instalados por cada ciclo observado.
C3=Metros cuadrados instalados acumulados por número de ciclos observados.

Tabla 19

Resumen del modelo de regresión lineal.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
0.458783	98.76%	98.69%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20

Análisis de varianza de la regresión lineal.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	301.461	301.461	1432.24	0.000
Error	18	3.789	0.210		
Total	19	305.249			

Nota. Fuente: Elaboración propia.

6.3.1.1 Tareas que componen el proceso constructivo de mampostería en ladrillo cocido de perforación horizontal tipo H-12.

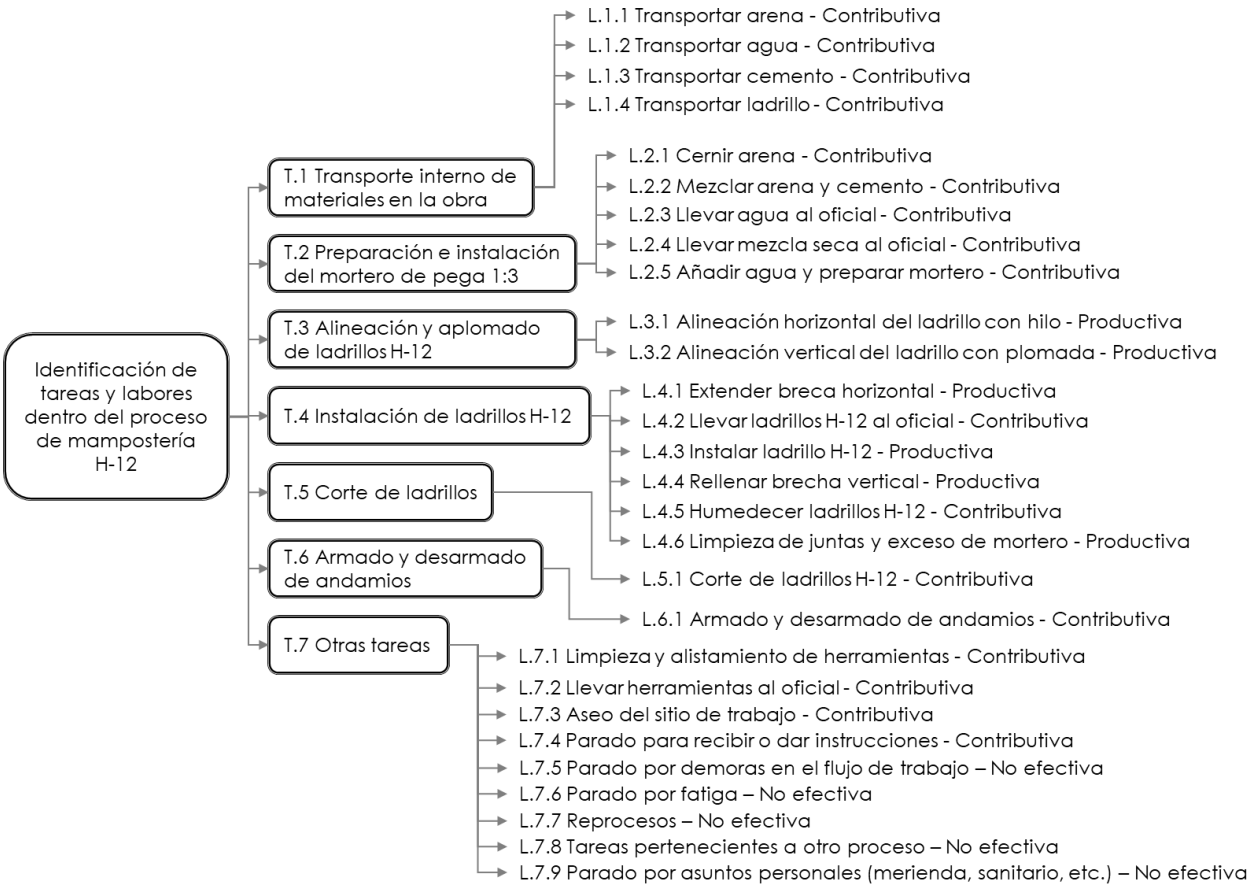
Uno de los móviles de este proyecto es ahondar en el estudio de los procesos constructivos, su caracterización, mejoramiento, así como en el posterior control y seguimiento en la obra. Por ello se hace necesario realizar la descomposición en las tareas y labores que componen el proceso en estudio; para ello se realizó la identificación mediante observación directa *insitu*, toma de

tiempos, para su posterior clasificación según el tipo de tarea de acuerdo a lo planteado en el numeral 3.1.1.1. como se observa en la **Figura 38**.

Para mostrar las relaciones lógicas de precedencia entre las diferentes tareas y labores se realiza un modelo del proceso constructivo de mampostería H-12 observado, donde se muestra la representación gráfica de los flujos de trabajo e interacciones entre sí, además del carril de responsable al interior de la cuadrilla (oficial o ayudante); para ello se empleó el lenguaje estándar BPMN versión 2.0 (*Business Process Model and Notation*), como se muestra en la **Figura 39**.

Figura 38

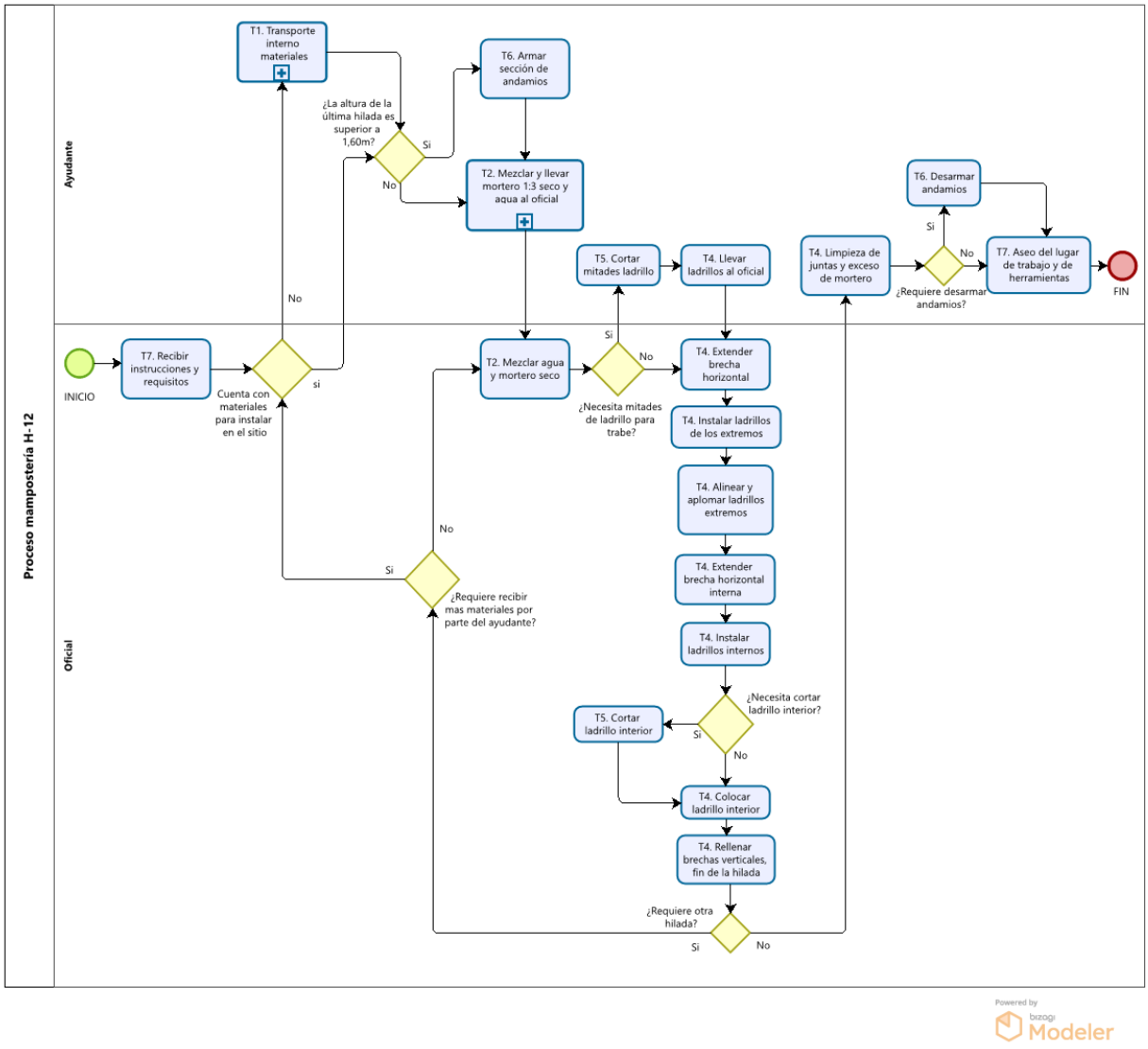
Tareas que componen el proceso de mampostería H-12 observado, proyecto EDIC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 39

Modelo del proceso constructivo de mampostería H-12 observado, lenguaje BPMN v 2.0.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.2 Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo

Conforme a lo planteado en el numeral 3.3, se realizó la clasificación de las tareas y labores de acuerdo al tipo de trabajo realizado (productivo, contributivo, no efectivo), adicionalmente se presentan los tiempos observados en cada una de estas tipologías como se muestra en la **Figura 40**. En la **Tabla 21** y la **Figura 41** se observa la comparación respecto de las mediciones presentadas por Thomas, Serpell y Botero.

Figura 40

Representación gráfica de los tipos de trabajo de acuerdo a las tareas del proceso constructivo de mampostería H-12 observado, proyecto EDIC.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21

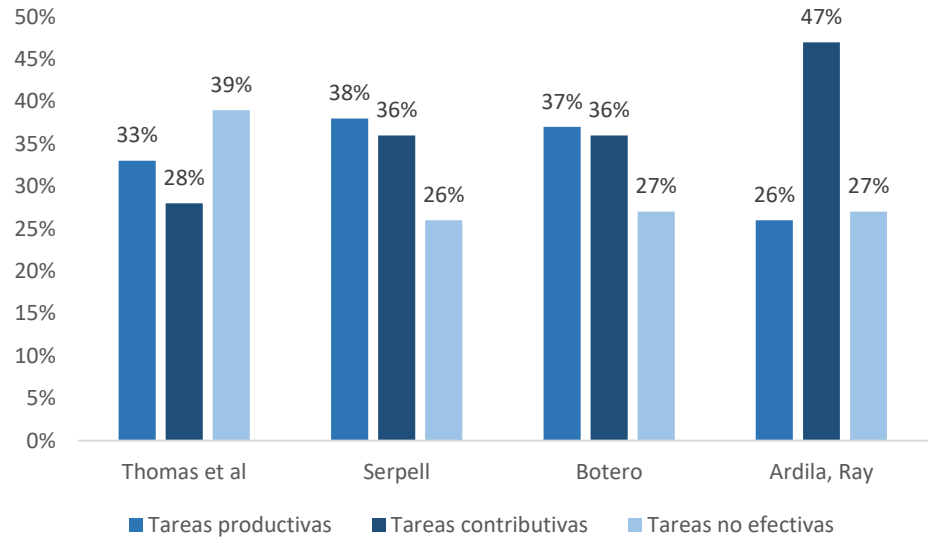
Porcentajes de tiempos según los tipos de tareas observadas en proyectos verticales.

Autor	Año	País	Tareas productivas	Tareas contributivas	Tareas no efectivas
Thomas et al	1983	Estados unidos	33%	28%	39%
Serpell, Alfredo	2002	Chile	38%	36%	26%
Botero y Álvarez	2003	Colombia	37%	36%	27%
Ardila, Ray	2022	Colombia	26%	47%	27%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 41

Comparación de tiempos según los tipos de tareas observadas en proyectos de construcción vertical.



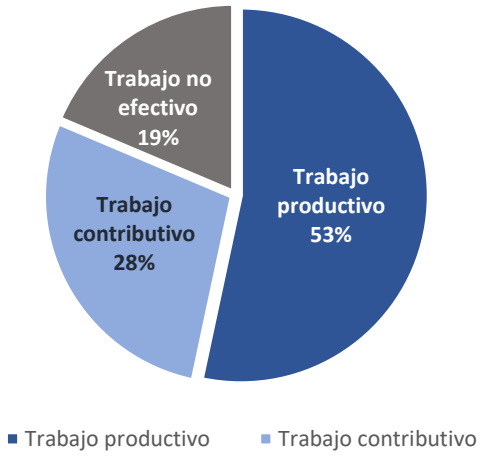
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Además, también se pudo determinar el tipo de trabajo según cada integrante de la cuadrilla de trabajo 1x1 del proceso observado, es decir del oficial y del ayudante, como se muestra en la **Figura 42** y la **Figura 43**, y el comportamiento del tipo de trabajo a lo largo de los ciclos observados como se muestra en la **Figura 44** y **Figura 45**. En estas gráficas se puede evidenciar

que el ayudante no ejecuta tareas de trabajo productivo. Por otra parte, también se muestra la duración relativa de las tareas identificadas en la Figura 47, y de desglosa el componente de "otras tareas" en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 42

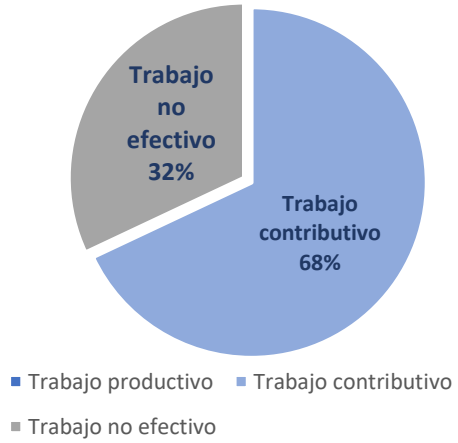
Tipo de trabajo realizado por el oficial en la cuadrilla de trabajo 1x1.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 43

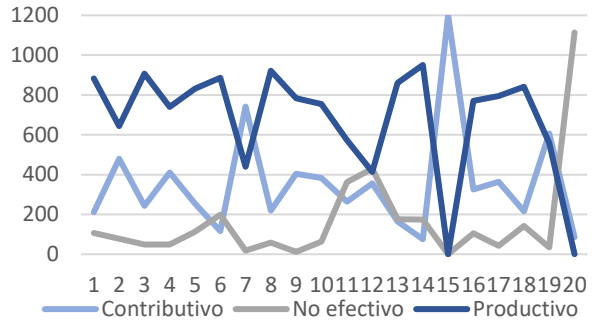
Tipo de trabajo realizado por el ayudante en la cuadrilla de trabajo 1x1.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 44

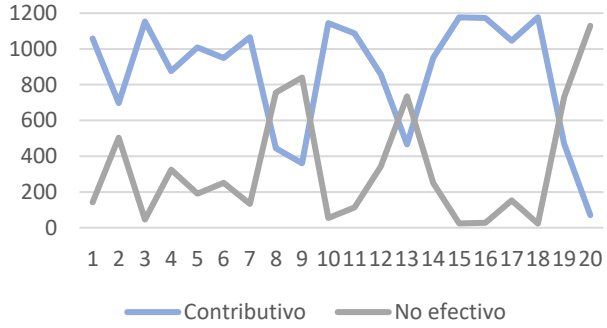
Tipos de trabajo realizado por el oficial de la cuadrilla a través de los ciclos de producción observados en segundos.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 45

Tipos de trabajo realizado por el ayudante de la cuadrilla a través de los ciclos de producción observados en segundos.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificadas las tareas, incluso las labores que las componen, se realiza ordenamiento respecto de su duración relativa al interior del proceso observado como se muestra en la **Tabla 22**, para posteriormente emplear un análisis de Pareto para identificar aquellas que representan el 80% del tiempo invertido (de color rojo), como se muestra en la **Figura 46**, también se muestran

las tareas de acuerdo a su duración en la **Figura 47**, y se muestra la descomposición de "otras tareas" en la **Figura 48**.

Tabla 22

Labores identificadas en el proceso de mampostería H-12 según su duración relativa.

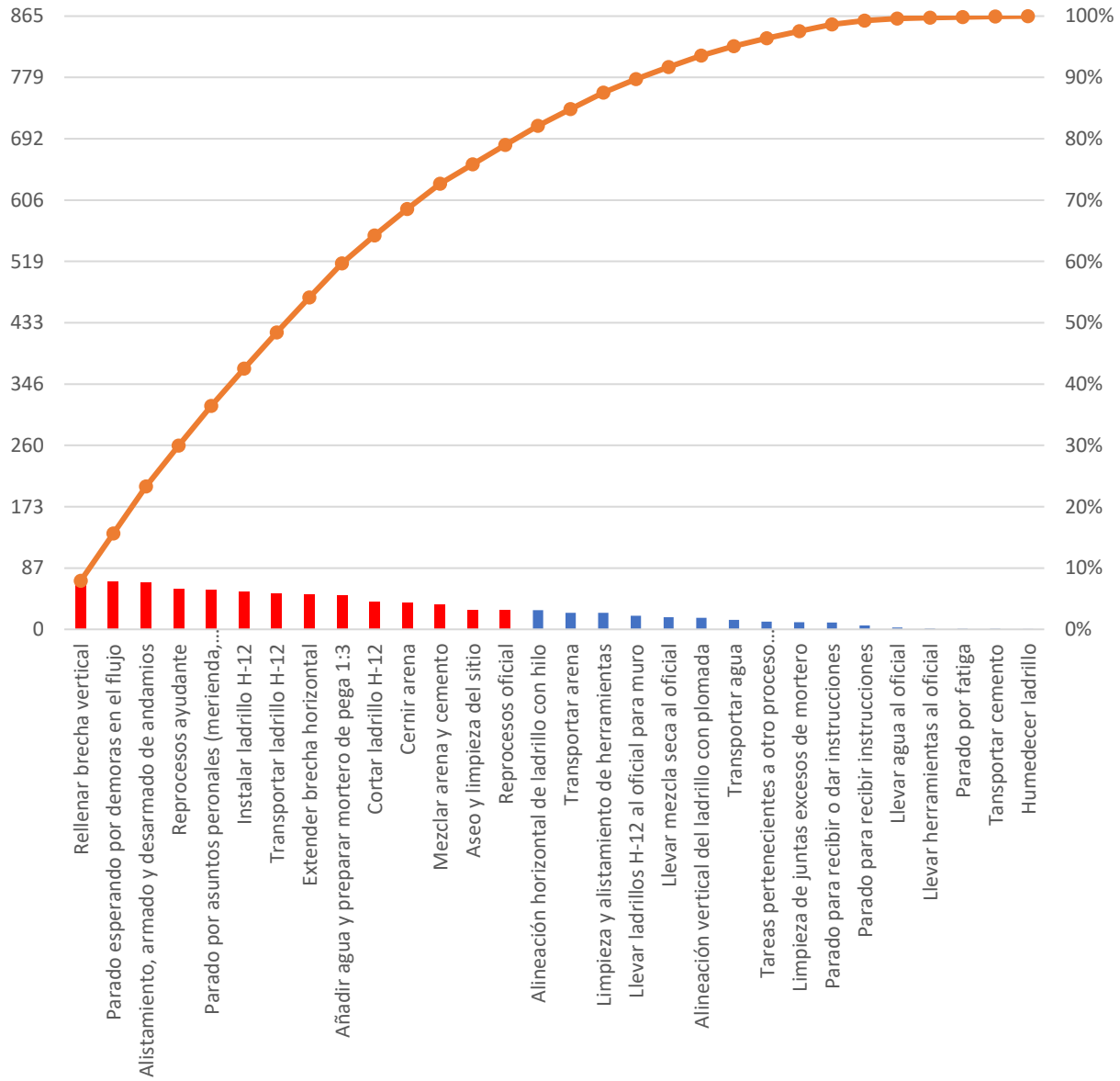
Labor	Duración min	Porcentaje %	Duración acum.	Porcentaje acum.
*Rellenar brecha vertical	68.3	7.9%	68.3	7.9%
*Parado esperando por demoras en el flujo	66.7	7.7%	135.0	15.6%
*Alistamiento, armado y desarmado de andamios	66.4	7.7%	201.3	23.3%
*Reprocesos ayudante	57.5	6.7%	258.8	30.0%
*Parado por asuntos personales (merienda, sanitario, etc.)	55.7	6.4%	314.5	36.4%
*Instalar ladrillo H-12	52.6	6.1%	367.1	42.5%
*Transportar ladrillo H-12	50.9	5.9%	418.0	48.4%
*Extender brecha horizontal	49.1	5.7%	467.2	54.1%
*Añadir agua y preparar mortero de pega 1:3	48.4	5.6%	515.5	59.7%
*Cortar ladrillo H-12	39.2	4.5%	554.7	64.2%
*Cernir arena	37.2	4.3%	591.9	68.6%
*Mezclar arena y cemento	35.4	4.1%	627.3	72.6%
*Aseo y limpieza del sitio	27.7	3.2%	654.9	75.9%
*Reprocesos oficial	27.1	3.1%	682.0	79.0%
Alineación horizontal de ladrillo con hilo	27.0	3.1%	709.0	82.1%
Transportar arena	23.4	2.7%	732.4	84.8%
Limpieza y alistamiento de herramientas	23.3	2.7%	755.7	87.5%
Llevar ladrillos H-12 al oficial para muro	19.0	2.2%	774.6	89.7%
Llevar mezcla seca al oficial	17.2	2.0%	791.8	91.7%
Alineación vertical del ladrillo con plomada	16.1	1.9%	807.9	93.6%
Transportar agua	13.5	1.6%	821.4	95.1%
Tareas pertenecientes a otro proceso constructivo	10.9	1.3%	832.2	96.4%
Limpieza de juntas excesos de mortero	10.1	1.2%	842.3	97.6%
Parado para recibir o dar instrucciones	9.6	1.1%	851.9	98.7%
Parado para recibir instrucciones	5.5	0.6%	857.4	99.3%
Llevar agua al oficial	2.8	0.3%	860.1	99.6%
Llevar herramientas al oficial	1.2	0.1%	861.3	99.7%
Parado por fatiga	0.8	0.1%	862.1	99.8%
Transportar cemento	0.8	0.1%	862.8	99.9%
Humedecer ladrillo	0.6	0.1%	863.5	100.0%
Totales	**863.5**	**100.0%**	**863.5**	**100.0%**

Nota. Fuente: Elaboración propia.

*Labores correspondientes al 80% de la duración del proceso observado.

Figura 46

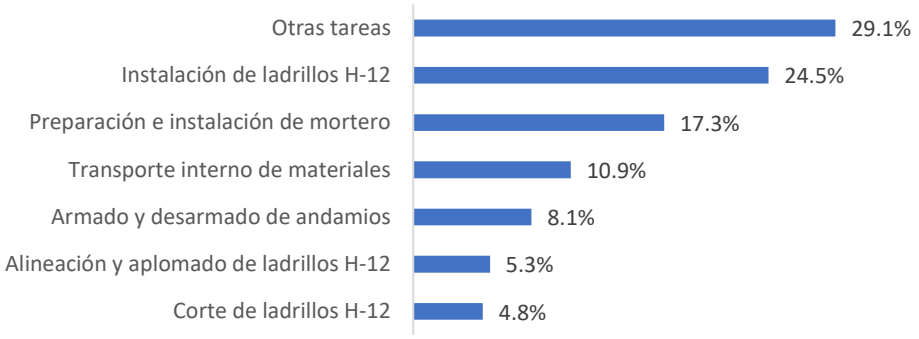
Análisis de Pareto a las labores identificadas en el proceso de mampostería H-12 según su duración relativa.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 47

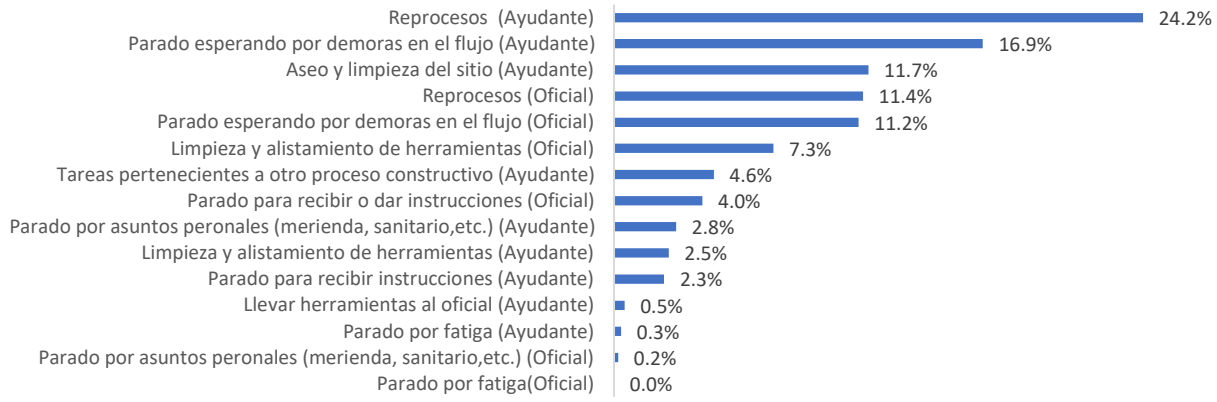
Duración relativa de las principales tareas identificadas al interior del proceso de mampostería H-12.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 48

Descomposición y duración relativa de "otras tareas" identificadas en el proceso de mampostería H-12 observado.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Implementación de la herramienta Lean "Mapa de flujo de valor" al caso de estudio

Dentro de la formulación de la metodología propuesta se emplearán no solo los principios y las metas *Lean*, sino adicionalmente se usará la herramienta de mapa de flujo de valor vista en el numeral 3.2.1, para analizar el proceso constructivo existente, facilitar la visualización de las tareas que lo componen, identificar cuellos de botella, tasas de productividad, pérdidas, y así posteriormente proponer mejoras en el proceso observado de mampostería H-12.

En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se observan los parámetros para la implementación del mapa de flujo de valor correspondientes al caso de estudio.

Tabla 23

Parámetros para la implementación del mapa de flujo de valor correspondientes al caso de estudio.

Descripción	Cantidad	Unidades
Familia de productos	Mampostería H-12	
Unidad de producción	metro cuadrado terminado (m2)	
Demanda del cliente	3.433	m2
Plazo cronograma	6	meses
Demanda diaria	24	m2
Tipo de cuadrilla empleada	1 oficial + 1 Ayudante: (1x1)	
Productividad esperada cuadrilla	24	m2/día
Cantidad de cuadrillas a emplear	1	cuadrillas
Horario de producción 7am - 5pm	9	horas
Tiempo de almuerzo	1	hora
Tiempo de merienda y descaso (2)	0.5	Horas
Turnos	1	turno
Tiempo disponible horas	7.5	horas
Tiempo disponible minutos	450	minutos
Tiempo TACK minutos	18.75	minutos/m2

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo TACK

En el contexto de la elaboración de un mapa de flujo de valor actual, es el tiempo de producción de una pieza para cumplir con los requerimientos de demanda del cliente, para el caso de la industria manufacturera se acostumbra a expresarlo en segundos, sin embargo en nuestro caso de estudio es conveniente expresarlo en minutos debido al ritmo de producción mucho más lento y como se muestra en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., cada 18,75 minutos debería producirse un metro cuadrado de mampostería H-12 para cumplir dichos requerimientos del proyecto.

Tiempo de ciclo T.C.

Sumatoria del tiempo real observado actualmente en obra para cada una de las diferentes tareas que componen el proceso estudiado de mampostería H-12, requerido para producir un metro cuadrado.

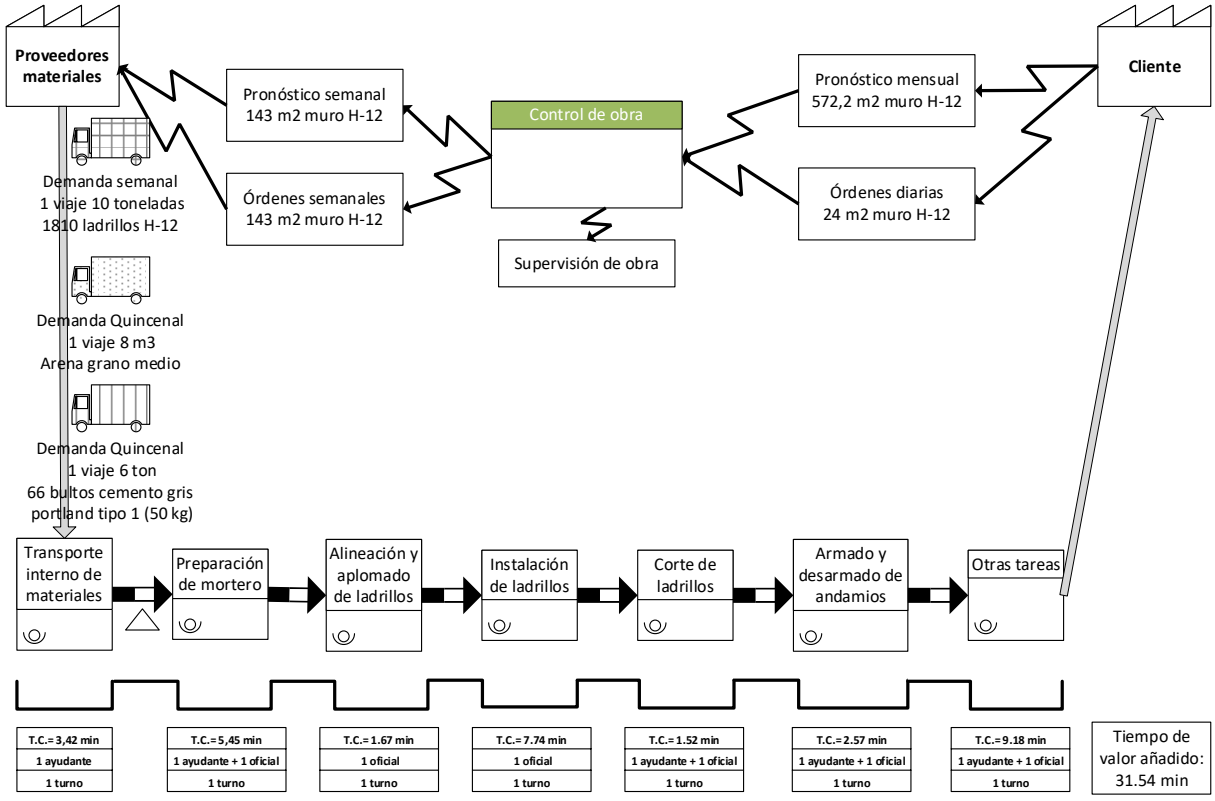
5.3.2.1 Mapa de Flujo de Valor actual

Se realiza la implementación de la herramienta *Lean* "Mapa de Flujo de Valor", descrita en el numeral 3.2.3, para el proceso de mampostería H-12 observado en el proyecto EDIC. En la **Figura 49** se muestran los elementos que componen el mapa de valor, en la parte superior los interesados, comenzando en la parte derecha por el cliente, seguido del supervisor y continuando hacia los proveedores de materiales; entre ellos se realiza una comunicación, que en este caso se representa por flechas en forma de rayo llamadas flujos de información, que contienen la cantidad de materiales requeridos por periodo de tiempo y la demanda diaria de unidades a producir por parte del cliente. En la parte inferior se encuentran las diferentes tareas identificadas y medidas, hacia las cuales parte una flecha de flujo de material desde el ícono del proveedor de materiales, donde se tiene en cuenta la demanda de material semanal o quincenal según el tipo de transporte.

Entre las diferentes tareas se va presentando flujo de material transformado, que finalmente será retornado al ícono del cliente como flujo de material en forma de unidades producidas terminadas.

Figura 49

Mapa de flujo de valor (estado actual) del proceso de muros de mampostería H-12 del proyecto EDIC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.1.1 Análisis del mapa de flujo de valor actual

Relación entre el tiempo TACK y el tiempo de ciclo T.C.

El desequilibrio de esta relación es uno de los hallazgos principales en la elaboración del mapa de flujo de valor actual, ya que para la cuadrilla 1x1 observada se encuentra un tiempo de ciclo T.C. de 31.54 minutos, parámetro que indica que bajo las condiciones documentadas se

produce un metro cuadrado de mampostería H-12 en ese periodo de tiempo; este valor dista ampliamente del tiempo TACK calculado según la demanda del cliente, que solicita producir dicho metro cuadrado en 18.75 minutos, y conlleva a establecer la productividad media de la cuadrilla en 14,27 metros cuadrados de muro en mampostería H-12 por jornada de trabajo, valor que solo cubre el 59,45% de los 24 metros cuadrados diarios demandados por el proyecto para cumplir con el tiempo de ejecución y los costos presupuestados en la etapa de planeación; de mantenerse estas condiciones se pronostica 4 meses de retraso en la ejecución del 100% de la cantidad requerida del entregable.

Flujo continuo a lo largo del proceso de mampostería H-12 observado

Conforme a lo planteado en el acápite 3.2, el flujo continuo en un proceso constructivo obedece a lograr en primer lugar, una producción en bloque y no por lotes, procurando para ello minimizar o eliminar las interrupciones y esperas a lo largo de la secuencia de producción, si estas condiciones se cumplen, la relación entre el tiempo TACK y el tiempo T.C. se acercará al valor de 1 por tanto, el sistema de producción obedecerá a uno de tracción o tipo *"pull"* y no a uno tipo empuje *o "push"*.

Para nuestro caso de estudio del proceso de muros de mampostería H-12, adicional al desequilibrio en la relación de los tiempos TACK y T.C. anteriormente mencionada, se evidencia producción por lotes y no por bloques, es decir flujo no continuo en el proceso, consecuencia que puede deberse a la ausencia de la aplicación de principios de la filosofía lean como:

- Alta proporción de actividades que no agregan valor.
- Variabilidad en la productividad.
- Pasos, partes y enlaces innecesarios.
- Falta de control.
- Ausencia de proceso de mejora continua.

En cuanto a las fuentes de pérdidas (Koskela, 1992) (Castaño-Jiménez et al., 2021), en el proceso observado se identificaron las siguientes:

- Esperas
- Transporte innecesario
- Movimientos innecesarios
- Defectos de calidad
- Subutilización de la mano de obra

Teniendo en cuenta los hallazgos obtenidos en la elaboración del estado actual del mapa de flujo de valor, se realizará el de un estado futuro, donde se plantean mejoras en el proceso constructivo de estudio a la luz de los principios y las fuentes de pérdidas según la filosofía *Lean Construction*.

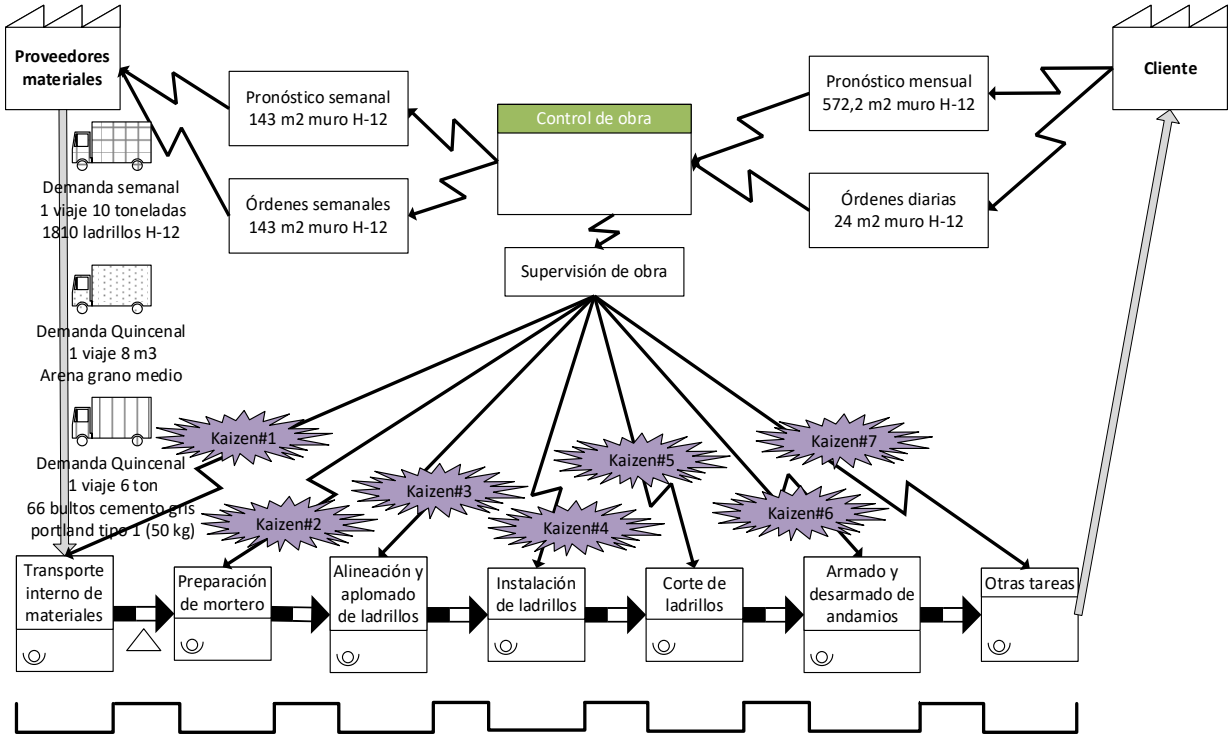
5.3.2.2 Mapa de Flujo de Valor futuro

Tipología contractual del proceso constructivo de mampostería H-12 observado, control de obra.

En una primera instancia, se identificó una tipología tipo subcontratación por precios unitarios del proceso de mampostería H-12 observado en el proyecto EDIC, que le son pagados al subcontratista por la cantidad de unidades de producción terminadas y recibidas a satisfacción en cada corte o pago parcial. Cabe anotar que tanto el subcontratista, como el personal a su cargo no hacen parte del personal de la empresa constructora o del personal por administración, es decir son terceros que actúan con autonomía respecto de horarios y tasas de producción, razón por la cual se ha observado poco o nulo control por parte de la supervisión de obra a sus labores diarias, por tanto el control y supervisión de obra es la primera acción de mejora respecto del proceso actual como se observa en **la Figura 50**.

Figura 50

Mapa de flujo de valor futuro propuesto para el proceso de muros de mampostería H-12 del proyecto EDIC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Control-supervisión de obra

Como se abordó en el fragmento anterior, la tipología contractual generalmente empleada para este tipo de procesos constructivos en edificaciones verticales, es decir la subcontratación de un tercero a precios unitarios ejecutados, favorece la falta de control y supervisión en la obra, para lo cual se plantea una mejora en el flujo de información, que se representa por flechas tipo rayo como conectores entre la supervisión de obra y las diferentes tareas del proceso de mampostería H-12, como se observa en la **Figura 50**. Dicho flujo de información implica intercambio de datos entre el supervisor del proceso y la cuadrilla de trabajo, se recomienda una periodicidad diaria de

este intercambio de información, preferiblemente al inicio y al finalizar la jornada, para lograr aplicar correctivos a tiempo, ante posibles desviaciones de las tasas de productividad, plazo de ejecución y estándares de calidad. A continuación, se describen los datos susceptibles de intercambio entre la cuadrilla de trabajo y la supervisión de obra:

- Cantidad de cada uno de los materiales disponibles para la producción diaria/semanal.
- Verificar la disponibilidad y el buen estado de herramientas, maquinaria y equipos necesarios para el transporte interno de materiales (Carretillas tipo "*boogie"*, estibadoras manuales, elevadores, grúas, manguera, canecas, baldes).
- Verificar las proporciones de arena-agua-cemento para lograr la resistencia y calidad del mortero de pega requerido, en este caso tipo N.
- Verificar que la alineación horizontal con los ejes del proyecto y el aplome vertical del muro de mampostería se encuentra en los rangos permitidos.
- Cuantificar la cantidad de unidades de mampostería instaladas, medir los metros cuadrados de muro de mampostería al final de la jornada, comparar con la tasa de productividad esperada para evidenciar desviaciones.
- Verificar la disponibilidad y el buen estado de herramientas y sus accesorios para corte de ladrillo (cortadoras eléctricas, pulidoras, discos de corte, extensiones eléctricas).
- Verificar la disponibilidad y el buen estado de las secciones completas de andamios y sus accesorios.
- Identificar que tareas ajenas al proceso de mampostería entorpecen la producción, tomar correctivos.

Estallido Kaizen #1 (mejoras en el transporte interno de materiales)

El tiempo relativo invertido en el transporte interno de materiales en el proyecto observado suma en total 10.2% del tiempo total del proceso de mampostería, lo que lo convierte en una fuente significativa de pérdidas y por tanto también de mejoras. Al realizar el desglose por materiales,

según lo expuesto en la **Tabla 22** y el análisis de Pareto realizado en la **Figura 46**, el transporte interno de ladrillo H-12 se encuentra como la séptima tarea que más consume tiempo relativo al interior del proceso con un 5.9%, por otra parte, el transporte de arena ocupa el puesto 16 con 2.7% y el transporte de agua el puesto 21 con 1.6%, cabe anotar que el transporte interno de cemento debido a las características y al cuidado de dicho material se realiza por el almacenista de la obra, quien es personal de administración del proyecto, por lo tanto no cuenta para los tiempos contabilizados de la cuadrilla de trabajo observada y analizada.

Las mejoras planteadas para estas tareas son las siguientes:

Embalaje de los ladrillos H-12 en "pallets" o estibas por parte del proveedor.

Para optimizar el conjunto de operaciones que componen tanto el transporte de las unidades de mampostería H-12 desde el proveedor hasta el proyecto, así como su descargue en el sitio, y el transporte interno, tanto vertical como horizontal hacia los sitios específicos de instalación en la obra, se propone pactar con el proveedor un embalaje en *"pallets"* o estibas de madera, tomando como referencia la Guía práctica sistema de empaque, envase, embalaje y etiquetas de la cámara de comercio de Bogotá actualizado en 2019 (Camara de comercio de Bogota, 2019).

Se opta por escoger el "pallet" tipo americano estándar de 120cm de largo por 100cm de ancho como el mostrado en **Figura 51**, debido a que se pueden modular filas de 30 unidades de mampostería H-12 dispuestas en estampa, dispuestas en 5 filas en altura, para lograr 150 unidades de ladrillos H-12 por "pallet" (unidad de transporte o de manipulación) con un peso aproximado de 750kg.

Adicionalmente se recomienda realizar un empaquetado de cada unidad de manipulación o "pallet" con plástico y zunchado, para garantizar su fácil manipulación sin sufrir averías y daños.

Figura 51

Tipos de "pallets" o estibas de madera estandarizadas más usadas en el país.

Nota. Fuente: Guía práctica sistema de empaque, envase, embalaje y etiquetas (Camara de comercio de Bogota, 2019).

Figura 52

Cargue y descargue de unidades de transporte con montacargas.

Nota. Fuente: https://gruasyaparejos.com/montacargas/operacion-segura-de-montacargas/

Cargue y descargue de unidades de manipulación de ladrillo H-12

Tanto las acciones de cargue y descargue de las unidades de transporte a los camiones se realizarán con montacargas como en la **Figura 52**, además, la zona de descarga en la obra se seleccionará de tal manera que genere transporte interno excesivo de ladrillo a los diferentes sitios de instalación.

Para este caso de estudio, se requiere aproximadamente 12 unidades de transporte semanales, que suman 1800 ladrillos H-12 y pesan aproximadamente 9 toneladas, que serán transportadas en un camión tipo “camabaja” de 10 toneladas de capacidad.

Transporte interno horizontal ladrillo H-12

Cuando la acción sea desplazar las unidades de transporte en el plano horizontal, en lo posible el montacarga las repartirá hacia los sitios cercanos a la instalación de la mampostería dentro de la obra, en su defecto se dispondrá en puntos de almacenamiento temporal de donde se realizará el desplazamiento horizontal por medio de estibadoras manuales como la que se muestra en la **Figura 53**, o posteriormente el desplazamiento vertical si es requerido.

Figura 53

Estibadora manual para transporte interno horizontal.

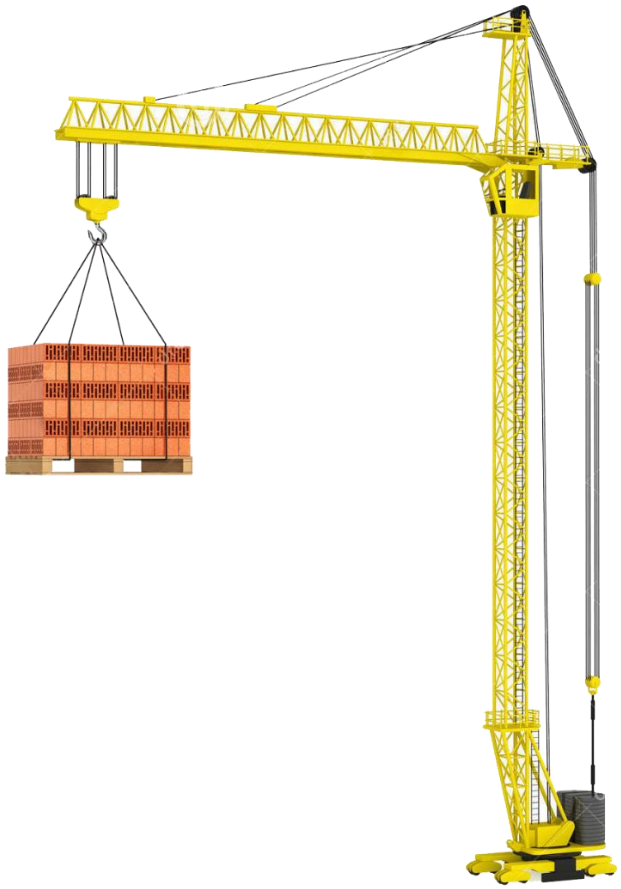
Nota. Fuente: https://sdindustrial.com.mx/wp-content/uploads/2021/12/92c8c39d-0bb8-4c76-8588-bf253bcc9419-768x388.jpeg.webp

Transporte interno vertical ladrillo H-12

Cuando la acción es desplazar las unidades de transporte de ladrillo H-12 en el eje vertical, cambiándolas de nivel o elevación, las unidades de transporte pueden ser trasladadas por medio de elevadores tipo polea, también por la misma torre grúa como se muestra en la **Figura 54,** o por elevadores si se dispone de ellos, para que posteriormente se realice el respectivo transporte horizontal en el nivel si se requiere.

Figura 54

Transporte interno vertical de unidades de manipulación de ladrillo H-12 con torre grúa.



Nota. Fuente: https://thumbs.dreamstime.com/z/gr%C3%BAa-con-los-ladrillos-rojos-apilados-sobre-la-plataforma-de-madera-65782126.jpg

Transporte interno de la arena

En la tarea de transporte interno de arena, también se observaron posibilidades de mejora, toda vez que no siempre se garantizaba la disponibilidad de carretillas en buen estado, lo que en ocasiones generó la situación de transportarlas en cuñetes que conlleva mayor esfuerzo del ayudante y menor volumen de arena transportada por viaje. Otro factor a mejorar es la distancia a la que se ubica almacenada la arena.

Transporte interno de agua

Se plantea el mejoramiento de esta tarea, simplemente proveyendo una manguera y una caneca de 55 ganones para evitar los viajes del ayudante para traer el agua en cuñetes, ya que esto genera fatiga y consume tiempo de este elemento que se refleja en el rendimiento de la cuadrilla de trabajo.

Estallido Kaizen #2 (Preparación e instalación del mortero de pega)

Como se observa en la **Figura 47**, la preparación e instalación del mortero de pega se ubica como la tercera en importancia respecto de su duración relativa con 17.3% del tiempo invertido por la cuadrilla de trabajo en el proceso de mampostería H-12, y es la segunda en importancia de las actividades productivas, condiciones hacen importante su optimización y mejora. A continuación, se proponen mejoras de las labores que componen esta tarea.

Mejora en el cernido de la arena para preparar el mortero de pega

Dentro del análisis de Pareto mostrado en la **Figura 46** esta labor está en el puesto 11 consumiendo un 4.3% del tiempo de la cuadrilla de trabajo, se observó el uso de un “harnero” o “zarando” manual artesanal operado por el ayudante, compuesto de un marco de madera con una malla metálica. Como mejora se plantea emplear un harnero mecánico con motor eléctrico como

el mostrado en la **Figura 55**, que ayude a disminuir el tiempo de cernido de arena. El fabricante garantiza un rendimiento de 3 metros cúbicos de sustrato por hora.

Figura 55

Harnero mecánico con motor eléctrico para cernir arena.

Nota. Fuente: https://www.tecondor.com/wp-content/uploads/2019/06/tromel2345.png

Estallido Kaizen #3 (Alineación y aplomado de ladrillos)

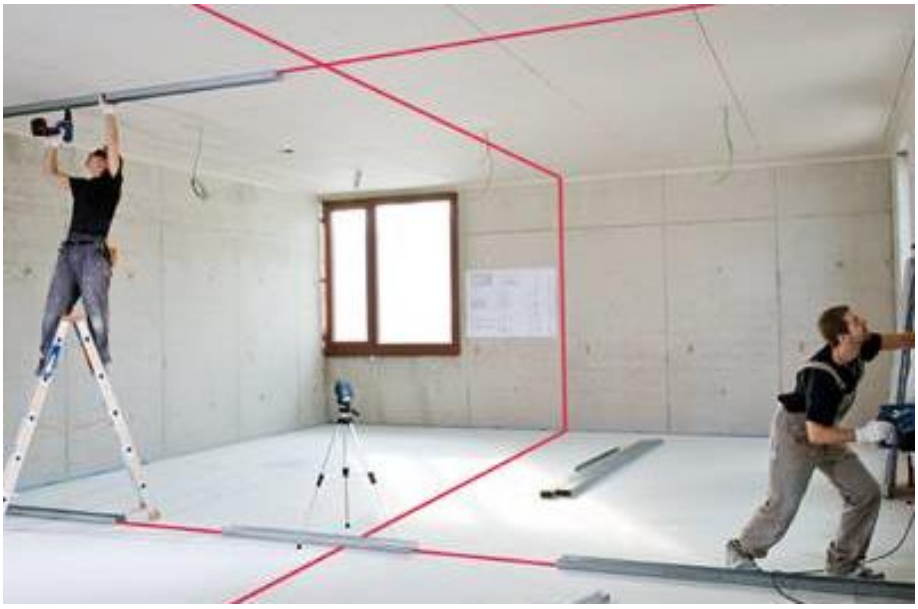
Aunque se observa la efectividad en el uso de las herramientas y métodos tradicionales, como la manguera de niveles que se muestra en la **Figura 20**, el hilo para alineación horizontal mostrado en la **Figura 21** y la plomada de la **Figura 22**; el nivel láser de tres ejes como el de la **Figura 56** aporta precisión y eficiencia en la alineación y nivelado, por tanto se recomienda su uso como mejora del proceso.

Estallido Kaizen #4 (Instalación de ladrillos H-12)

Nos encontramos ante la tarea más importante del proceso de mampostería, no solo por su duración relativa del 24.5% como se aprecia en la **Figura 47**, sino además porque es la forma tangible en la que se materializa el entregable. En esta tarea se encuentra una mejora en la labor de extendido horizontal de la brecha de mortero de pega.

Figura 56

Nivel láser de tres ejes para propuesto para su uso en la alineación y aplomado del proceso de mampostería H-12.



Nota. Fuente: https://www.geotop.la/wp-content/uploads/2019/11/NIVEL-LASER-COMBINADO-BOSCH-GLL-3-80-P-GEOTOP-1.jpg

Mejora en el extendido de la brecha horizontal del mortero de pega de la mampostería

Se posiciona como la octava labor en importancia en el análisis de Pareto realizado con un 5.7% de la duración relativa. Se plantea una mejora empleando un "brechador" que ofrece la capacidad de 7 litros de mortero y un avance por recarga de hasta 7 metros. Este artefacto funciona con guías ajustables y una altura constante en su base para garantizar un mismo espesor de la brecha y reducir desperdicios de material hasta en un 60%. En la **Figura 57** se muestra el brechador sugerido a usar.

Figura 57

Herramienta tipo "brechador" propuesta para mejorar la labor de extendido de la brecha horizontal del mortero de pega.

Nota. Fuente: https://grabr.io/es/items/355631

Estallido Kaizen #5 (Corte de ladrillos H-12)

El corte de ladrillos, si bien es la tarea en la que menos se consume tiempo con 4.8% de la duración relativa, como se muestra en la **Figura 47**, presenta dos mejoras que reducirán el tiempo de ejecución, pero sobre todo disminuirán el desperdicio de material.

Mejora de proveer de ladrillos H-12 en mitades ya listos desde la fabrica

En la observación de esta labor, las mitades de los ladrillos para establecer el “trabe” o el desfase de medio ladrillo por hilada, se realiza con el palustre, desperdiciando medio ladrillo por mitad efectiva; este desperdicio de tiempo y de material se puede evitar comprando las mitades ya listas, como se parecía en la **Figura 58**.

Figura 58

Ladrillo en mitades listo desde la fábrica.

Nota. Fuente: https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/118840/1-2-bloque-4-estandar-10-x-20-x-15-cm-31u-m2/118840/

Mejora de proveer discos de corte para la pulidora del oficial

Existe un ladrillo que encaja al centro de la hilada, por lo general no tiene una medida definida y es el oficial quien lo corta, para ello también usa el palustre o la hachuela, cuando se le cuestiona porque no usaba una herramienta tipo pulidora más adecuada para ello, responde que él siempre dispone de su propia pulidora, pero que en la obra no le dan los discos de corte, razón por la cual no la usa. Se considera que es más caro el desperdicio de material y de tiempo del oficial, que el disco de corte, razón por la cual se recomienda suministrarlos.

Estallido Kaizen #6 (Armado y desarmado de andamios)

La tarea de armado y desarmado de andamios consume el 8.1% de duración relativa, donde básicamente se encuentra la problemática de no encontrar suficientes secciones completas de andamios para todas las cuadrillas de los diferentes frentes que cohabitan la obra de construcción.

Adicionalmente, se encuentran secciones de diferentes tamaños que no encajan entre sí, para ello se plantea la siguiente mejora.

Mejora de proveer suficientes andamios multidireccionales certificados para las diferentes cuadrillas de trabajo.

Los andamios tradicionales además de ser pesados, encontrarse en mal estado, no encajar por la vetustez del uso, requerir más tiempo de armado-desarmado, no ofrecen las condiciones de seguridad, por tanto, se propone implementar el uso de andamios livianos multidireccionales certificados como el mostrado en la **Figura 59**, en las cantidades requeridas por las diferentes cuadrillas de trabajo del sitio de la obra.

Figura 59

Andamios multidireccionales certificados.

Nota. Fuente: https://www.equiposarco.com/wp-content/uploads/amulti-600x593.jpg

Estallido Kaizen #7 (Otras actividades)

En el ítem "otras tareas" hace alusión a todas aquellas labores y esfuerzos que implican inversión de tiempo de los elementos de la cuadrilla de trabajo, pero que no están directamente relacionado con el entregable final o con uno de sus componentes. Paradójicamente la suma de estas tareas consume la mayor duración relativa con 29.1% del proceso como se observa en la **Figura 47**, donde los reprocesos tanto del oficial como del ayudante suman el 35.7%, estar parados esperando por demoras en el flujo 28.2%, aseo y limpieza del sitio 11.7%, Limpieza y alistamiento de herramientas 9.8%, parado para recibir o dar instrucciones 6.3%, tareas pertenecientes a otro proceso constructivo 4.6%, parado por asuntos personales 3.0%, llevar herramientas al oficial 0.5% y finalmente parado por fatiga 0.2% como se puede extraer de la **Figura 48**. Dentro de las mejoras se propone atacar las cuatro primeras actividades que representan el 85.4% del tiempo consumido en este ítem.

Mejora eliminar o minimizar el tiempo invertido en reprocesos.

Cuando en la producción de un entregable o parte de él, una vez inspeccionado se encuentran fallas en el cumplimiento de sus especificaciones, debe ser reparado total o parcialmente; estas acciones o esfuerzos adicionales a los iniciales en dicha reparación se llaman reprocesos. Las causas de reprocesos en el caso de estudio fueron:

- Cambios posteriores en la localización de los muros de mampostería H-12 debido a cambios en la red de ductos de aire acondicionado. Para esta mejora se recomienda realizar reuniones periódicas multidisciplinarias con los diseñadores de ductos, aires acondicionados, redes, arquitectos e ingenieros estructurales, para dar a conocer los cambios y tener en cuenta las opiniones y limitaciones de todos los componentes del proyecto.

- Muros defectuosos sueltos en la base por estar expuestos a empujes laterales y golpes mientras se fraguaba el mortero de pega, esto implicó reprocesos en forma de demolición y realizar de nuevo el muro. Para mitigar esta situación, se plantea realizar una delimitación temporal con cinta de señalización que indique y proteja los muros en proceso de fragüe. Además, capacitar al personal de la obra respecto de la importancia de no golpear ni someter a empujes laterales los muros en proceso de fragüe.
- Se presentó la desatención a las especificaciones técnicas respecto de la ubicación de los elementos de confinamiento de la mampostería (Actividad sucesora), para ello se recomienda realizar una reunión de control con la cuadrilla al iniciar la jornada, donde con base en los planos y documentos se observa y explican los alineamientos, ejes y especificaciones del entregable.

5.3.3 Elección de la cuadrilla de trabajo óptima para el proceso de mampostería H-12 observado en el proyecto EDIC.

Uno de los componentes principales de esta investigación, es encontrar la composición óptima de la cuadrilla de trabajo para el proceso de mampostería en ladrillo H-12 observado, y para ello se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

La producción de muros en mampostería H-12 es un proceso continuo, toda vez que la ejecución de las diferentes tareas que lo componen se pueden realizar de manera secuencial ininterrumpidamente de principio a fin e iterativamente volviendo a iniciar el proceso, logrando una cierta cantidad de unidades de producción en la jornada de trabajo. En contraste, observamos actividades no continuas, como por ejemplo la instalación de redes eléctricas, donde las tareas que componen el proceso se realizan de manera no secuencial y no cíclica, de tal manera que, por ejemplo las regatas e instalación de tuberías tipo “Conduit” se realizan en un lapso de tiempo, para después realizar tareas de otros procesos constructivos como el friso de muros, posteriormente

instalar el alambrado o cableado conductor, y sin embargo, seguidamente se debe esperar al estucado y pintura de muros, para así finalmente terminar de instalar los plafones, interruptores, tomacorrientes y demás aparatos de uso de las redes eléctricas.

Los muros en mampostería además de presentar un proceso constructivo continuo, su esquema de producción es a tracción y no de empuje, es decir, no se puede preparar una cantidad de mortero de pega superior a aquella a la que se pueda extender en forma de brecha horizontal mientras se instalan los ladrillos H-12, sin que el mortero fragüe y pierda sus propiedades.

Adicionalmente, se emplea el enfoque de la filosofía *Lean Construction*, específicamente lo expuesto en 2010 por Nerwal y Abdelhamid respecto del uso efectivo y proporcional de cada uno de los integrantes que componen la cuadrilla de trabajo, minimizando las pérdidas y se maximiza el valor agregado en el entregable final. A continuación, se enuncian los principios tenidos en cuenta para la determinación del tamaño y los elementos que componen la cuadrilla de diseño optima en el proceso constructivo de mampostería H-12 observado:

- La mampostería es un proceso constructivo continuo y cíclico.
- La mampostería es un proceso de producción a tracción (*pull*).
- Se debe procurar hacer uso efectivo y proporcional de cada uno de los elementos que componen la cuadrilla de trabajo del proceso constructivo.
- El trabajo total es la suma del trabajo efectivo, el contributivo y el no efectivo (ver numeral 3.3).
- La optimización se basa en mejorar el tiempo de trabajo efectivo, minimizar el tiempo de trabajo contributivo para convertirlo en efectivo y eliminar el trabajo no efectivo en lo posible. Esto se logra identificando las pérdidas en las diferentes labores del proceso y aplicando las respectivas mejoras en el flujo de trabajo para maximizar el valor agregado final.

- El valor agregado final se logra al conseguir la tasa de rendimiento requerida por el proyecto, terminando en el plazo establecido, con la mejor relación de costo, mientras se logra la calidad requerida.

5.3.3.1 Identificación y cuantificación de las pérdidas en cada uno de los elementos de la cuadrilla de trabajo

A continuación, se muestran los tiempos medidos de las labores pertenecientes al proceso constructivo de mampostería observado por cada componente de la cuadrilla (**Tabla 24** para el ayudante y **Tabla 25** para el oficial), donde, además se muestran los tiempos de mejora del desempeño y los que pueden eliminarse, para al final obtener el nuevo tiempo optimizado.

Analizando lo referente al oficial, realizar una planificación del trabajo y ejercer control periódico permitirá eliminar los reprocesos y las demoras por flujo, además de eliminar los tiempos de aquellas labores que debería realizar el ayudante de la cuadrilla de trabajo. Esta optimización elimina el trabajo no efectivo que depende del flujo de trabajo, disminuye el trabajo contributivo, y estos tiempos se suman al trabajo productivo que aumenta ligeramente, como se muestra en **Figura 60**.

Tabla 24

Identificación y aplicación de tiempos de mejora, eliminados y optimizados de las labores que componen el proceso de mampostería H-12, ejecutados por el ayudante de la cuadrilla de trabajo observada.

				Tiempo				
				Observado	mejorado	Eliminado	Optimizado	Ganado
ID	Labor	Responsable	Tipo	min	min	min	min	min
L.1.1	Transportar arena	Ayudante	Contributivo	23,4			23,4	0,0
L.1.2	Transportar agua	Ayudante	Contributivo	11,6		11,6	0,0	11,6
L.1.3	Transportar cemento	Ayudante	Contributivo	0,4			0,4	0,0
L.1.4	Transportar ladrillo H-12	Ayudante	Contributivo	50,9	10,2		10,2	40,7
L.2.1	Cernir arena	Ayudante	Contributivo	37,2	7,0		7,0	30,3

L.2.2	Mezclar arena y cemento	Ayudante	Contributivo	34,4			34,4	0,0
L.2.3	Llevar agua al oficial	Ayudante	Contributivo	2,8			2,8	0,0
L.2.4	Llevar mezcla seca al oficial	Ayudante	Contributivo	17,2			17,2	0,0
L.4.2	Llevar ladrillos H-12 al oficial	Ayudante	Contributivo	19,0			19,0	0,0
L.5.1	Cortar ladrillo H-12	Ayudante	Contributivo	17,9		17,9	0,0	17,9
L.6.1	Alistamiento andamios	Ayudante	Contributivo	36,6			36,6	0,0
L.7.1	Limpieza herramientas	Ayudante	Contributivo	6,0			6,0	0,0
L.7.2	Llevar herramientas al oficial	Ayudante	Contributivo	1,2			1,2	0,0
L.7.3	Aseo y limpieza del sitio	Ayudante	Contributivo	27,7			27,7	0,0
L.7.4	Parado para recibir instrucciones	Ayudante	No efectivo	5,5			5,5	0,0
L.7.5	Parado esperando por demoras	Ayudante	No efectivo	40,1		40,1	0,0	40,1
L.7.6	Parado por fatiga ayudante	Ayudante	No efectivo	0,8			0,8	0,0
L.7.7	Reprocesos ayudante	Ayudante	No efectivo	57,5		57,5	0,0	57,5
L.7.8	Tareas otro proceso constructivo	Ayudante	No efectivo	10,9		10,9	0,0	10,9
L.7.9	Parado por asuntos personales	Ayudante	No efectivo	30,7		6,8	24,0	6,8
				431,5	**17,2**	**144,7**	**215,8**	**215,7**

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Respecto del ayudante, el trabajo contributivo susceptible de mejora se optimiza, también se eliminan los reprocesos y las demoras por flujo no continuo, y estos tiempos se suman al trabajo contributivo que aumenta en gran medida, como se muestra en **Figura 61.**

Tabla 25

Identificación y aplicación de tiempos de mejora, eliminados y optimizados de las labores que componen el proceso de mampostería H-12, ejecutados por el oficial de la cuadrilla de trabajo observada.

				Tiempo				
				Observado	mejorado	Eliminado	Optimizado	Ganado
ID	Labor	Responsable	Tipo	min	min	min	min	min
L.1.2	Transportar agua	Oficial	Contributivo	1,9		1,9	1,9	0,0
L.1.3	transportar cemento	Oficial	Contributivo	0,4		0,4	0,0	0,4
L.2.2	Mezclar arena y cemento	Oficial	Contributivo	1,0		1,0	0,0	1,0
L.2.5	Añadir agua mortero	Oficial	Contributivo	48,4			48,4	0,0
L.4.5	Humedecer ladrillo	Oficial	Contributivo	0,6			0,6	0,0
L.5.1	Cortar ladrillo H-12	Oficial	Contributivo	21,3	11,1		11,1	10,2
L.6.1	Alistamiento de andamios	Oficial	Contributivo	29,8			29,8	0,0
L.7.1	Limpieza y de herramientas	Oficial	Contributivo	17,3			17,3	0,0

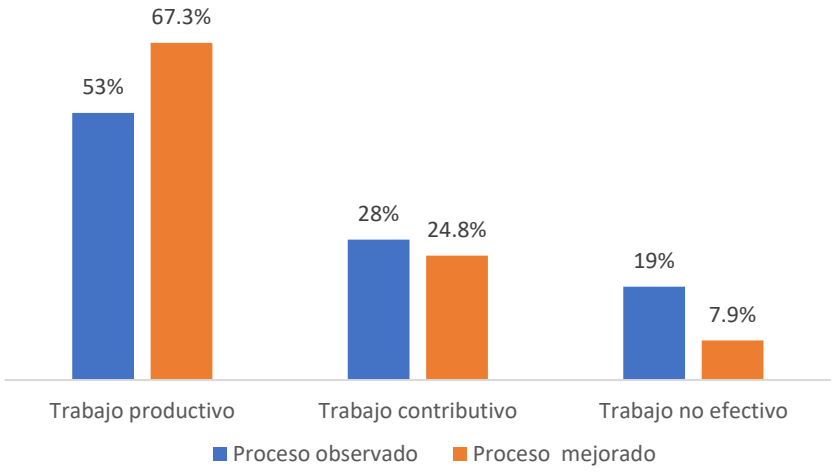
L.7.4	Parado dar instrucciones	Oficial	No efectivo	9,6			9,6	0,0
L.7.5	Parado esperando demoras	Oficial	No efectivo	26,6		26,6	0,0	26,6
L.7.6	Parado por fatiga oficial	Oficial	No efectivo	0,0			0,0	0,0
L.7.7	Reprocesos oficial	oficial	No efectivo	27,1		27,1	0,0	27,1
L.7.9	Parado por asuntos personales	Oficial	No efectivo	24,4			24,4	0,0
L.3.1	Alineación horizontal con hilo	Oficial	Productivo	27,0			27,0	0,0
L.3.2	Alineación vertical plomada	Oficial	Productivo	16,1			16,1	0,0
L.4.1	Extender brecha horizontal	Oficial	Productivo	49,1	18,0		18,0	31,1
L.4.3	Instalar ladrillo H-12	Oficial	Productivo	52,6			52,6	0,0
L.4.4	Rellenar brecha vertical	Oficial	Productivo	68,3			68,3	0,0
L.4.6	Limpieza de juntas excesos	Oficial	Productivo	10,1			10,1	0,0
				431,5	**29,1**	**57,0**	**335,1**	**96,4**

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En el análisis del tiempo total de la cuadrilla 1x1, el trabajo productivo se incremente levemente, el trabajo contributivo es el que se ve crece mayoritariamente, el trabajo no efectivo baja considerablemente debido a la optimización realizada, como se muestra en la **Figura 62.**

Figura 60

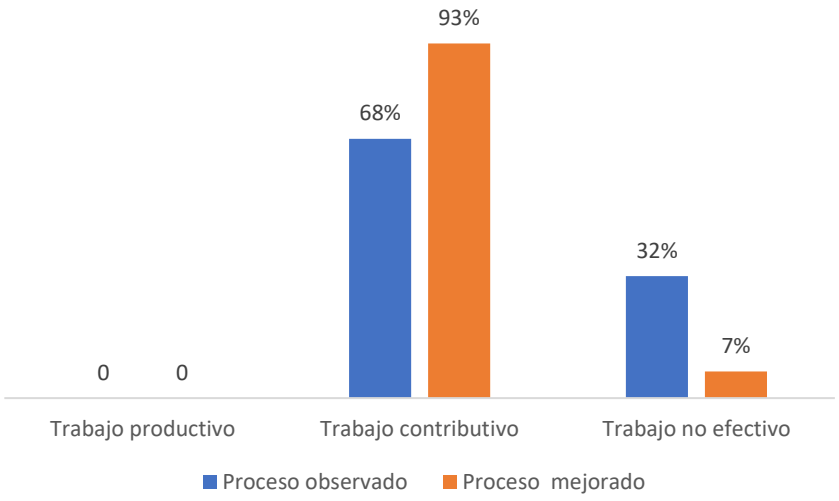
Comparación del tiempo observado en el proceso vs. El tiempo con mejoras (solo el oficial).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 61

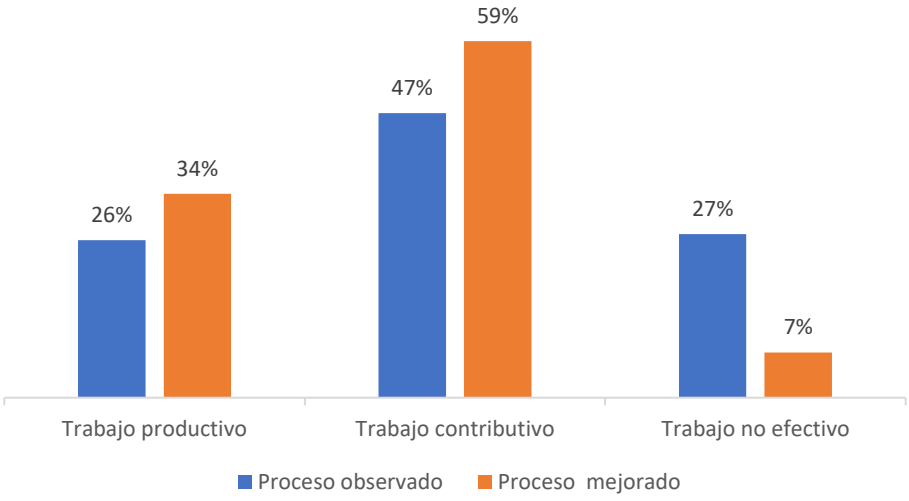
Comparación del tiempo observado en el proceso vs. El tiempo con mejoras (solo el ayudante).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 62

Comparación del tiempo observado en el proceso vs. El tiempo con mejoras (cuadrilla 1x1).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del valor de la hora-cuadrilla de trabajo

Uno de los parámetros a tener en cuenta en la obtención de la configuración óptima de la cuadrilla de trabajo es el valor de la hora-cuadrilla, para su cálculo se tendrá en cuenta el valor de remuneración de cada uno de los elementos que la componen, afectado por un factor de ajuste salarial total que tiene en cuenta las cargas prestacionales vigentes en la legislación colombiana, así como el tiempo efectivo trabajado descontando domingos, festivos y otros según lo planteado por Mejía en 2019, como se muestra en la **Tabla 26**.

Tabla 26

Valor de la hora-cuadrilla según sus diferentes configuraciones.

Descripción	Valor
Salario Mínimo Mensual Legal Vigente SMMLV año 2022	$1.000.000
Salario mensual oficial	1,4 SMMLV
Salario mensual ayudante	1,0 SMMLV
Factor prestacional ayudante (F.P.) (Mejía, G. 2019)	1,80
Factor tiempo efectivo ayudante (F.T.E.) (Mejía, G. 2019)	1,27
Factor de ajuste salarial ayudante (F.A.S.) (Mejía, G. 2019)	2,28
Valor hora SMMLV ayudante	$9.502
Factor prestacional oficial (F.P.) (Mejía, G. 2019)	1,73
Factor tiempo efectivo oficial (F.T.E.) (Mejía, G. 2019)	1,27
Factor de ajuste salarial oficial (F.A.S.) (Mejía, G. 2019)	2,20
Valor hora SMMLV oficial	$12.853
Valor hora cuadrilla 1x1 (OxA)	$22.356
Valor hora cuadrilla 2x1 (2OxA)	$35.209
Valor hora cuadrilla 3x2 (3Ox2A)	$57.564

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el número de horas efectivas de trabajo en el mes se realizó un conteo de los días entre semana, de los sábados y domingos, adicionalmente, se tuvieron en cuenta los días festivos oficiales, diferenciando si eran entre semana, sábados o domingos. De esta manera se obtuvieron los promedios mensuales, a quienes se les restó los respectivos promedios de días

festivos entre semana y sábados. Teniendo en cuenta las 48 horas laborales ordinarias contempladas en la legislación nacional, distribuidas en 9 horas diarias entre 5 días de la semana y 3 horas los sábados; evidentemente se pueden presentar horas "extras" por fuera de los horarios normales de trabajo, incluso los días domingos y festivos, pero no serán tenidas en cuenta al no haber sido observadas en el caso de estudio y a la naturaleza impredecible de su ocurrencia. En la **Tabla 27** se puede apreciar un resumen del análisis mencionado.

Tabla 27

Estimación de las horas efectivas mensuales (año 2022).

	Días no festivos			Días festivos			Días por
Año 2022	**Entre semana**	**Sábados**	**Domingos**	**Entre semana**	**Sábados**	**Domingos**	**mes**
Enero	21	5	5	1	1	0	31
Febrero	20	4	4	0	0	0	28
Marzo	23	4	4	1	0	0	31
Abril	21	5	4	2	1	0	30
Mayo	22	4	5	1	0	1	31
Junio	22	4	4	2	0	0	30
julio	21	5	5	2	0	0	31
Agosto	23	4	4	2	0	0	31
Septiembre	22	4	4	0	0	0	30
Octubre	21	5	5	1	0	0	31
Noviembre	22	4	4	2	0	0	30
Diciembre	22	5	4	1	0	1	31
Total	**260**	**53**	**52**	**15**	**2.0**	**2**	**365**
Días promedio	***21.7***	***4.4***	4.3	***1.3***	***0.2***	0.2	30.4
Días laborales	20.4	4.3					
Días laborales	24.7						
Horas diarias	9	3					
Horas efectivas mes	183.75	12.75					
Horas totales efectivas mes	**196.5**						

Nota. Fuente: Elaboración propia.

5.3.4 Modelo

Para realizar la representación del comportamiento de la cuadrilla de trabajo en el proceso constructivo de los muros de mampostería H-12 en el caso de estudio del proyecto EDIC, se emplean las siguientes conceptualizaciones teóricas:

- Enfoque jerárquico enfocado en las operaciones de producción y tareas, cómo se muestra en la **Figura 1** (Halpin y Senior, 1981).
- Modelos basados en tareas y tipo de trabajo, como se observa en la **Figura 4**, (Thomas et al. 1983).
- La productividad parcial de los factores, (productividad laboral)(Thomas y Matheus, 1986).
- Estado de "ajuste" y "balance" de las operaciones de producción, (Howell, 1993).
- Metas principales de la filosofía *Lean Construction* ((Ballard and Zabelle, 2000):
  - Producir el entregable de la manera más eficiente (Gestión de las tareas)
  - Eliminar las pérdidas (Gestión del flujo)
  - Maximizar el valor (Gestión del valor)

Se identifican las variables que intervienen en el fenómeno de producción, así como su relación, se empleará la programación lineal de restricciones en el planteamiento y solución de los diferentes escenarios.

5.3.4.1 Identificación de variables y su relación:

$$P = \frac{C}{T} \quad (1)$$

C= Cantidad total de metros cuadrados de mampostería a instalar.

T= Tiempo de trabajo total requerido.

P= Productividad laboral total.

N= Número de cuadrillas de trabajo requeridas (frentes de trabajo).

$$T = N * Tc \text{ (6)}$$

Variables de decisión:

no= Número de oficiales en la cuadrilla de trabajo.

na= Número de ayudantes en la cuadrilla de trabajo.

nc= Número total de integrantes de la cuadrilla de trabajo.

$$nc = no + na \quad (7)$$

Relación de las variables independientes y dependientes:

$$Tc = \frac{(no*To)+(na*Ta)}{nc} \quad (8)$$

Tc = Tiempo de trabajo total de cada cuadrilla de trabajo.

To= Tiempo de trabajo total del oficial en la cuadrilla de trabajo.

Ta= Tiempo de trabajo total del ayudante en la cuadrilla de trabajo.

Tiempos según el tipo de trabajo:

Oficial de la cuadrilla de trabajo:

Tefo= Tiempo efectivo total del oficial de la cuadrilla de trabajo.

Tcoo= Tiempo contributivo total del oficial de la cuadrilla de trabajo.

Tneo= Tiempo no efectivo total del oficial de la cuadrilla de trabajo.

$$To = Tefo + Tcoo + Tneo \quad (9)$$

Ayudante de la cuadrilla de trabajo:

Tefa= Tiempo efectivo total del ayudante de la cuadrilla de trabajo.

Tcoa= Tiempo contributivo total del ayudante de la cuadrilla de trabajo.

Tnea= Tiempo no efectivo total del ayudante de la cuadrilla de trabajo.

$$Ta = Tefa + Tcoa + Tnea \quad (10)$$

$$P = \frac{C}{N * \frac{(no * (Tefo + Tcoo + Tneo) + (na * (Tefa + Tcoa + Tnea)}{nc}} \quad (11)$$

5.3.4.2 Función objetivo

Una vez establecidas las diferentes variables y su relación mutua por medio de las ecuaciones planteadas anteriormente, se define la función a optimizar como sigue:

La cantidad total de unidades a instalar C es un dato conocido en los documentos del proyecto, por tanto, es tratado como un parámetro constante.

La productividad laboral de los recursos de la cuadrilla de trabajo también es conocida, pues en el caso de estudio fue observada y cuantificada.

La variable tiempo T, aunque tiene un plazo límite de ejecución suministrado en el cronograma del proyecto, será el parámetro a optimizar, para el caso minimizar el tiempo de ejecución de tal manera que no sobrepase la entrega a tiempo de las unidades instaladas, para los parámetros a variar son el número de oficiales (no) y el número de ayudantes (na), cuya suma totaliza el número de integrantes de la cuadrilla de trabajo tipo (nc).

Despejando en la ecuación (1) la variable T se obtiene la función objetivo, ecuación (12):

$$T = \frac{C}{P} \quad (12)$$

5.3.4.3 Restricciones

Conocidas las variables y sus respectivas relaciones, se procederá a enunciar las restricciones a tener en cuenta en el modelado de la producción de unidades de mampostería H-12 a cargo de las cuadrillas de trabajo:

Teniendo en cuenta que la estimación de parámetros tiene un cierto grado de variación e incertidumbre, se plantea poder introducir en el modelo un rango de variación en el cumplimiento del plazo de ejecución (que también es un parámetro constante del proyecto) que puede ser definido por el usuario, incluso si así lo desea puede ser cero (0%) dada en la ecuación (13)

$$Z * (1 - e) \leq \boldsymbol{T} \leq Z * (1 + e) \quad (13)$$

T= Tiempo de trabajo total requerido.

Z= Plazo de ejecución dado en el cronograma de obra del proyecto.

e= Variación de tiempo permitida dada en porcentaje.

Ya que el único integrante de la cuadrilla que puede realizar trabajo efectivo es el oficial y este trabajo será el que se materializará en unidades de entregable final, la productividad de la cuadrilla será la suma de la productividad observada (optimizada o promedio según sea el escenario) de la cantidad de estos integrantes en la misma.

$$\boldsymbol{Pc} = no * Po * Fe \ (14)$$

Pc= Productividad de la cuadrilla.

no= Número de oficiales en la cuadrilla de trabajo.

Po= Productividad observada, optimizada o promedio del oficial.

Fe= Factor de equilibrio de la cuadrilla de trabajo dependiente de la relación de equilibrio.

Además, la productividad lograda debe ser igual o superior a la productividad mínima esperada:

$$Pmin \leq \boldsymbol{P} \quad (15)$$

$$Pmin = \frac{C}{Z} \quad (16)$$

P= Productividad laboral total.

Pmin= Productividad laboral mínima requerida.

C= Cantidad total de metros cuadrados de mampostería a instalar.

Z= Plazo de ejecución dado en el cronograma de obra del proyecto.

Para encontrar un equilibrio en el uso de los recursos de mano de obra al interior de la cuadrilla de trabajo, se busca que el porcentaje de trabajo efectivo de los oficiales sea proporcional al del trabajo colaborativo de los ayudantes, para ello se propone una relación de equilibrio

$$\mathrm{Re} = \frac{no * \mathrm{Tefo}}{na * Tcoa} \quad (17)$$

El comportamiento de dicha relación de equilibrio respecto del factor de equilibrio en la ecuación (15) está dada por las siguientes restricciones:

Si $no * Tefo \leq na * Tcoa$ entonces Fe = 1

Si $no * Tefo > na * Tcoa$ entonces $\mathrm{Fe} = \frac{na * \mathrm{Tcoa}}{no * Tefo}$

5.3.4.4 Análisis del caso de estudio en las condiciones observadas

A continuación, se realiza el análisis del caso de estudio observado en cuatro escenarios diferenciales:

El primer escenario constituye la cuadrilla observada de un oficial y un ayudante (OxA), sin mejoramiento de procesos, sin optimización, en las condiciones medidas como se observa en la **Tabla 28**.

Tabla 28

Cuadrilla observada sin mejoramiento de procesos.

Descripción	unidad	cantidad	restricción
Plazo cronograma (Z)	mes	6	
Cantidad unidades totales (C)	m2	3433	
Frentes de trabajo requeridos (N)	cuadrilla	1	
Horas mensuales de trabajo (tabla 26)	hr	196.5	
Productividad mínima requerida (Pmin)	m2/hr	2.9	
Número de oficiales en la cuadrilla (no)	oficial	1	
Número de ayudantes en la cuadrilla (na)	ayudante	1	
Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tefo)	%	53.3%	
Tiempo de trabajo contributivo oficial (Tcoo)	%	28.0%	
Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tneo)	%	18.6%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tefa)	%	0.0%	
Tiempo de trabajo contributivo ayudante (Tcoa)	%	67.8%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tnea)	%	32.2%	
Productividad observada de la cuadrilla	m2/hr	1.71	
Relación de equilibrio de la cuadrilla	%	78.6%	
Tipo de cuadrilla		Desajustada-colaborativa	
Factor de equilibrio		1.00	
Productividad de la cuadrilla de trabajo observada (Pc)	m2/hr	1.71	
Productividad total de las cuadrillas P	m2/hr	1.71	No cumple
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	hr	2007.6	
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	mes	10.2	No cumple
Retraso en el cronograma	mes	4.2	
Porcentaje de retaso en el cronograma %	%	70%	No cumple
Precio mano de obra por unidad de entregable	$/m2	$13,073.7	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Al momento de la observación, el profesional encargado del seguimiento de la obra expresó que se presentaba un retraso de 2 meses en la actividad de muros de mampostería H-15 sin haberse acabado el proyecto, situación que tiene concordancia con los resultados obtenidos en el modelo planteado ingresando los parámetros del caso de estudio, donde se cuantifica 4.2 meses el retraso en dicha actividad, situación preocupante, ya que constituye un 70% de desviación en el cronograma inicial del proyecto.

Existe una descompensación entre el trabajo efectivo del oficial y el trabajo colaborativo del ayudante, situación que se refleja en la relación de equilibrio de la cuadrilla de 78.6% y expresa una cuadrilla de trabajo desajustada en cuestión de flujo continuo de trabajo, y tendiente a ser colaborativa por estar este tipo de trabajo en mayor proporción que el efectivo, es decir una cuadrilla "desajustada-colaborativa". No se logra la productividad mínima solicitada para cumplir con los requerimientos del proyecto, lo que produce retraso en el tiempo de producción y las desviaciones asociadas. En este escenario no se han mejorado procesos, por lo cual el tiempo de trabajo no efectivo es alto y también afecta la productividad laboral.

El segundo escenario contempla la cuadrilla observada de un oficial y un ayudante (OxA), y contemplando el mejoramiento de procesos, como se observa en la **Tabla 29**.

Tabla 29

Cuadrilla observada con mejoramiento de procesos.

Descripción	unidad	cantidad	restricción
Plazo cronograma (Z)	mes	6	
Cantidad unidades totales (C)	m2	3433	
Frentes de trabajo requeridos (N)	cuadrilla	1	
Horas mensuales de trabajo (tabla 26)	hr	196.5	
Productividad mínima requerida (Pmin)	m2/hr	2.9	
Número de oficiales en la cuadrilla (no)	oficial	1	
Número de ayudantes en la cuadrilla (na)	ayudante	1	
Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tefo)	%	67.3%	
Tiempo de trabajo contributivo oficial (Tcoo)	%	24.8%	
Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tneo)	%	7.9%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tefa)	%	0.0%	
Tiempo de trabajo contributivo ayudante (Tcoa)	%	93.0%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tnea)	%	7.0%	
Productividad observada de la cuadrilla	m2/hr	2.16	
Relación de equilibrio de la cuadrilla	%	72.4%	
Tipo de cuadrilla		Desajustada-colaborativa	
Factor de equilibrio		1.00	

Productividad de la cuadrilla de trabajo observada (Pc)	m2/hr	2.16	
Productividad total de las cuadrillas P	m2/hr	2.16	No cumple
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	hr	1590.0	
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	mes	8.1	No cumple
Retraso en el cronograma	mes	2.1	
Porcentaje de retaso en el cronograma %	%	35%	No cumple
Precio mano de obra por unidad de entregable	$/m2	$10,353.6	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Es este escenario, el mejoramiento de los procesos permitió disminuir el trabajo no efectivo de los elementos de la cuadrilla aproximadamente en 50%, y convertirlo en trabajo efectivo en caso del oficial, y en trabajo contributivo en el del ayudante, esto incrementó la productividad laboral de la cuadrilla de trabajo en 26.3%, sin embargo, hubo más descompensación en la relación de equilibrio que disminuyó 7.9% llegando a 72.4%, lo que quiere decir que se tornó aún más colaborativa que el caso anterior, por tanto sigue siendo una cuadrilla del caso "desajustada-colaborativa". Aunque la productividad laboral se incrementa, no logra la productividad mínima requerida para lograr el plazo trazado en la fase de planificación del proyecto, el retraso obtenido es de 2.1 meses, correspondientes a un 35% adicional al plazo original.

En el tercer escenario se aplican las restricciones plantadas al modelo, de productividad mínima, de variación en el tiempo de ejecución, de no superar el plazo y se obtienen los valores de la **Tabla 30**Tabla 30.

Tabla 30

Cuadrilla óptima con mejoramiento de procesos.

Descripción	**unidad**	**cantidad**	**restricción**
Plazo cronograma (Z)	mes	6	
Cantidad unidades totales (C)	m2	3433	
Frentes de trabajo requeridos (N)	cuadrilla	1	
Horas mensuales de trabajo (tabla 26)	hr	196.5	
Productividad mínima requerida (Pmin)	m2/hr	2.9	
Número de oficiales en la cuadrilla (no)	oficial	2	
Número de ayudantes en la cuadrilla (na)	ayudante	1	

Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tefo)	%	67.3%	
Tiempo de trabajo contributivo oficial (Tcoo)	%	24.8%	
Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tneo)	%	7.9%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tefa)	%	0.0%	
Tiempo de trabajo contributivo ayudante (Tcoa)	%	93.0%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tnea)	%	7.0%	
Productividad observada de la cuadrilla	m2/hr	2.16	
Relación de equilibrio de la cuadrilla	%	144.7%	
Tipo de cuadrilla		Desajustada-sobre efectiva	
Factor de equilibrio		0.69	
Productividad de la cuadrilla de trabajo observada (Pc)	m2/hr	2.98	
Productividad total de las cuadrillas P	m2/hr	2.98	Cumple
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	hr	1150.6	
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	mes	5.9	Cumple
Retraso en el cronograma	mes	0.0	
Porcentaje de retaso en el cronograma %	%	0%	
Adelanto en el cronograma	mes	0.14	
Porcentaje de adelanto en el cronograma %	%	2%	Cumple
Precio mano de obra por unidad de entregable	$/m2	$11,800.2	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La solución encontrada para la cuadrilla óptima en este proyecto bajo los parámetros dados, y una vez mejorados los procesos, está en incrementar un elemento tipo oficial en la cuadrilla de trabajo, para un total de dos oficiales y un ayudante (2OxA). La restricción de productividad mínima se cumple, con un incremento de 38.2% respecto de la cuadrilla observada con procesos mejorados y de 74.5% respecto de la cuadrilla observada sin mejoramiento de procesos. Respecto de su relación de equilibrio, sigue siendo una cuadrilla desajustada pero esta vez, debido a que se presenta más trabajo efectivo de los dos oficiales que trabajo contributivo de un ayudante, lo que provoca un factor de equilibrio de 0.69 que disminuye la productividad de la cuadrilla en un 69%. Respecto de su estado, es una cuadrilla del tipo “desajustada-sobre efectiva” por lo anteriormente mencionado, sin embargo, es la solución óptima pues cumple con las restricciones planteadas,

sobre todo la del plazo, con un tiempo total de ejecución de 5.9 meses, con un adelanto en el cronograma de solo 2%.

Para contrastar se plantea un cuarto escenario con mayor cantidad de trabajadores buscando encontrar una compensación en la relación de equilibrio de la cuadrilla, como se muestra en la **Tabla 31.**

Tabla 31

Cuadrilla sobredimensionada con mejoramiento de procesos.

Descripción	unidad	cantidad	restricción
Plazo cronograma (Z)	mes	6	
Cantidad unidades totales (C)	m2	3433	
Frentes de trabajo requeridos (N)	cuadrilla	1	
Horas mensuales de trabajo (tabla 26)	hr	196.5	
Productividad mínima requerida (Pmin)	m2/hr	2.9	
Número de oficiales en la cuadrilla (no)	oficial	3	
Número de ayudantes en la cuadrilla (na)	ayudante	2	
Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tefo)	%	67.3%	
Tiempo de trabajo contributivo oficial (Tcoo)	%	24.8%	
Tiempo de trabajo efectivo oficial (Tneo)	%	7.9%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tefa)	%	0.0%	
Tiempo de trabajo contributivo ayudante (Tcoa)	%	93.0%	
Tiempo de trabajo efectivo ayudante (Tnea)	%	7.0%	
Productividad observada de la cuadrilla	m2/hr	2.16	
Relación de equilibrio de la cuadrilla	%	108.5%	
Tipo de cuadrilla		Ajustada - equilibrada	
Factor de equilibrio		0.92	
Productividad de la cuadrilla de trabajo observada (Pc)	m2/hr	5.97	
Productividad total de las cuadrillas P	m2/hr	5.97	Cumple
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	hr	575.3	
Tiempo requerido por la cuadrilla observada (T)	mes	2.9	No cumple
Retraso en el cronograma	mes	0.0	
Porcentaje de retaso en el cronograma %	%	0%	
Adelanto en el cronograma	mes	3.07	
Porcentaje de adelanto en el cronograma %	%	51%	No cumple
Precio mano de obra por unidad de entregable	$/m2	$9,646.3	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Esta configuración de cuadrilla de tres oficiales y dos ayudantes (3Ox2A), aparentemente es la más balanceada debido a su relación de equilibrio cercana al 100% (108.5%) y por su factor de equilibrio de también cercano a 1 (0.92), lo que la clasifica en una cuadrilla del tipo "ajustada-equilibrada", pero no es la cuadrilla óptima debido a los parámetros del proyecto y a su tendencia a tener poca cantidad de muros de mampostería, adicionalmente a mayoritariamente tener divisiones en otro tipo de materiales. Esta cuadrilla mostraría una productividad demasiado elevada y presentaría un 51% de adelanto en el cronograma, lo cual generaría conflicto con las actividades predecesora y sucesora, generando además inventarios de unidades que aún no se requieren y además cruces y pendientes elevadas en las líneas de balance de actividades, todo ello contrario a lo planteado en las metas y principios de *Lean Construction.*

Esta configuración de cuadrilla se recomienda para proyectos con grandes cantidades de muros divisorios en mampostería de arcilla con perforación horizontal, por ende, con grandes cantidades de unidades a producir, y que además cuenten con plazos ajustados de ejecución en el cronograma de obra.

En la **Tabla 32** se presentan los valores del precio de la mano de obra si las cuadrillas trabajasen por administración, es decir con contrato laboral, contrastadas con el precio pagado al subcontratista por unidad producida (metro cuadrado).

Tabla 32

Precio de la mano de obra, contrato laboral vs. subcontrato.

Descripción	cuadrilla	solución	productividad	horas de trabajo	Precio hr-cuadrilla	Precio mano de obra	Precio/m2
Sub-contrato	*OxA*	*No óptima*				$25,747,500.0	$7,500.0
Escenario 1	OxA	no óptima	1.71	2007.6	$22,355.0	$44,879,950.3	$13,073.1
Escenario 2	OxA	no óptima	2.16	1590.0	$22,355.0	$35,543,853.6	$10,353.6
Escenario 3	*2OxA*	*óptima*	*2.98*	*1150.6*	$35,208.0	$40,510,099.4	$11,800.2
Escenario 4	3Ox2A	no óptima	5.97	575.3	$57,563.0	$33,115,809.7	$9,646.3

Nota. Fuente: Elaboración propia.

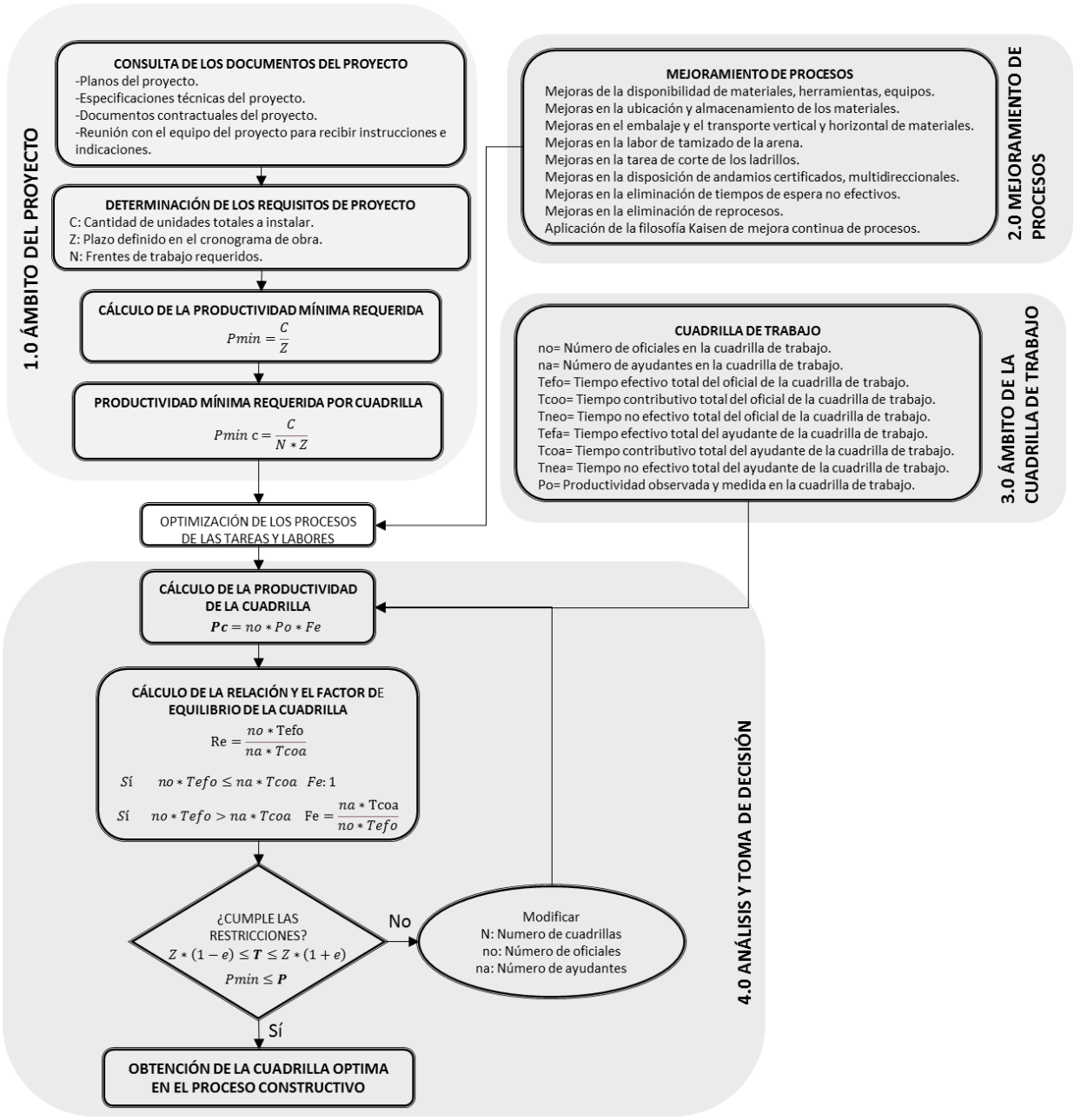
Como se aprecia en la tabla anterior, para el subcontratista el precio pagado por metro cuadrado de entregable ($7,500) es muy inferior (42.6%) al obtenido con la cuadrilla sin optimizar observada en obra, lo cual se refleja en la alto ausentismo y rotación laboral. Incluso con una cuadrilla optimizada, el valor pagado se encuentra 36.4% por debajo del salario correspondiente lo cual causa desmotivación, retrasos en el plazo de ejecución y otras desviaciones asociadas.

Esta última tabla nos muestra la problemática de la subcontratación en la industria de la construcción con salarios bajos, evasión del régimen completo de prestaciones sociales, desmotivación de la mano de obra, delegación de la gestión de las operaciones de construcción, todos fenómenos que tiene efectos negativos en la productividad laboral y en la consecución exitosa de los objetivos iniciales de los proyectos de construcción.

En la **Figura 63** se muestra la metodología propuesta, agrupada en cuatro sectores principales, en primer lugar lo relativo al ámbito del proyecto, en segundo lo relativo al mejoramiento de los procesos constructivos en las labores y tareas que componen la actividad de mampostería, en tercero lo relativo a la cuadrilla de trabajo y finalmente el análisis y la toma de decisiones frente a los parámetros y restricciones del proyecto.

Figura 63

Metodología para determinar la cuadrilla de trabajo óptima en procesos de mampostería H-12.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

Este apartado se desarrollará respecto de la consecución de los objetivos propuestos en el estudio.

Respecto del manejo de las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos en la literatura científica, se encuentran estudios enfocados en la nivelación de recursos desde el paradigma de la cadena crítica o ruta crítica, donde se ahonda en el número de cuadrillas y su entrada y salida a lo largo del desarrollo del cronograma, por una parte, y por otra los muchos factores que modifican la productividad de dichas cuadrillas de trabajo impactando así el desempeño del proyecto. En este sentido, la tendencia se encuentra en desarrollar e implementar herramientas de cálculo y computo robustas que tengan en cuenta todas estas variables en la nivelación de recursos. Así las cosas, la teoría para determinar la composición interna de la cuadrilla ha tenido interés casi nulo, y se encuentra más en el desarrollo de industrias de manufacturas y del esquema *Lean* de producción.

Al indagar por los métodos empleados en la industria, se encuentra por una parte la mayoría manifiesta desconocimiento y falta de implementación de marcos de referencia de gestión de proyectos en las empresas constructoras participantes del estudio, por otra parte más de la mitad de ellas manifiestan no emplear métodos para determinar la cantidad y la capacitación de los integrantes de las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos, basándose en la experiencia o en el mejor de los casos en bases de datos comerciales de otros proyectos, todo ello indicativo de informalidad en el sector, y justifica los indicadores bajos de productividad encontrados en las últimas décadas en la industria de la construcción local y global.

Otra parte fundamental en este estudio está compuesta por el mejoramiento de los procesos, donde se observó la delegación y falta de gestión de las cuadrillas de trabajo y de sus procesos productivos por parte de la dirección del proyecto, donde la mayoría de esta toma de decisiones

respecto del manejo y disponibilidad de equipos, herramientas y materiales quedan en manos del maestro o del líder de la cuadrilla, impactando negativamente la productividad laboral, y por ende el desempeño y la consecución exitosa de los objetivos del proyecto.

Es importante recalcar que emplear el enfoque *Lean Construction* ofrece una oportunidad de mejora de la productividad laboral al mejorar los procesos productivos, optimizar el tiempo de trabajo efectivo y contributivo, minimización del no efectivo, y buscar equilibrarlos mediante la teoría del flujo continuo, que fue empleada en este estudio.

Con preocupación se observa que la subcontratación o tercerización laboral es una práctica recurrente actualmente en la industria, pero en este estudio se nota que la falta de gestión de los procesos y las cuadrillas no garantiza la obtención de salarios compensados, y por el contrario contribuyen a la evasión del régimen de prestaciones sociales, generando esto malestar, desmotivación, ausentismo y rotación laboral, que finalmente también impacta negativamente en la calidad y la productividad de los proyectos de construcción.

Se recomienda continuar el estudio de la productividad laboral en procesos constructivos, no solo en actividades continuas y con un ítem dominante como es el caso de la mampostería, y apoyándose en el planteamiento teórico para el diseño de las cuadrillas expuesto, se recomienda el desarrollo y posterior implementación de una herramienta de cálculo robusta que tenga en cuenta otros factores que disminuyen la productividad laboral en escenarios complejos.

7. Referencias Bibliográficas

AACE. (2015). *Total Cost Management Framework, 2 nd Edition, Total Cost Management Framework An Integrated Approach to Portfolio, Program, and Project Management Second Edition Total Cost Management Framework Second Edition*.

Abdelhamid, T., & Salem, O. (2005). LEAN CONSTRUCTION: A NEW PARADIGM FOR MANAGING CONSTRUCTION PROJECTS. *International Wrkshop on Innovations in Materials and Design of Civil Infraestructure*, 1–23. https://www.researchgate.net/publication/242085758

Alves, T., Milberg, C., Walsh, K. D., & Walsh. (2010). EXPLORING LEAN CONSTRUCTION PRACTICE, RESEARCH, AND EDUCATION. *People, Culture and Change*, 435–444. www.iglc.net

Arbulu, R., Ballard, G., & Harper, N. (2003). Kanban in construction. *International Group for Lean Construction, September*, 1–12. http://leanconstruction.dk/media/17574/Kanban in Construction.pdf

Ardila, R., & Mejía, G. (2021). Fundamentos conceptuales y métodos para determinar la conformaciónde cuadrillas de trabajo en procesos constructivos. In E. Serna (Ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería: Vol. Vol.I* (Edición 6, pp. 528–544). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación. http://fundacioniai.org/index.php/editorial.html

Azhar, S., Ahmad, I., & Sein, M. K. (2010). Action Research as a Proactive Research Method for Construction Engineering and Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, *136*(1), 87–98. https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000081

Aziz, R. F., & Hafez, S. M. (2013). Applying lean thinking in construction and performance improvement. *Alexandria Engineering Journal*, *52*(4), 679–695.

https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.008

Bajjou, M. S., Chafi, A., & En-Nadi, A. (2017). A comparative study between lean construction and the traditional production system. *International Journal of Engineering Research in Africa*, *29*, 118–132. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.29.118

Ballard, G., & Zabelle, T. (2000). Project DefinitionWhite Paper #9Lean Construction Institute. *Lean Construction Institute*, 1–10.

Blanco, C. (2011). *Encuesta y Esantitativa en Ciencias Sociales y Comunicación*.

Botero, L. (2012). Análisis de Rendimientosy consumos de mano de obra en actividades deconstrucción. *REVISTA Universidad EAFIT*, *38*(128), 9–12. https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/843

Botero, L. F. B., & Álvarez, M. E. V. (2004). Guía De Mejoramiento Continuo Para La Productividad En La Construcción De Proyectos De Vivienda (Lean Construction Como Estrategia De Mejoramiento). *Revista Universidad EAFIT*, *40*(136), 15. https://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Ingenieria Sistemas/9.pdf%0Arevista@eafit.edu.co

Cámara Colombiana de la Construcción. (2018). *Informe de Productividad, sector construcción de edificaciones 2018*. “Informe de Productividad, Sector Construcción de Edificaciones,” 2018. [Online]. Available: Https://Camacol.Co/Sites/Default/Files/Documentosinteres/INFORME PRODUCTIVIDAD VF.Pdf.

Camara de comercio de Bogota. (2019). Guía práctica sistema de empaque, envase, embalaje y etiquetas. *Camara de Comercio de Bogotá*, 22. https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/14388#:~:text=La Dirección Internacional

de Negocios,exportar bienes desde nuestro país.

Castaño-Jiménez, P., Sánchez-Jurado, J., & García-Londoño, J. (2021). Revisión bibliográfica sobre el estudio de pérdidas en la construcción bajo principios Lean. *Revista UIS Ingenierías*, *20*(4). https://doi.org/10.18273/revuin.v20n4-2021003

Chee Houa, S., Haslinda, M., Muliati, S., Mariam Miri, A., & Rahim, A. F. (2018). Implementation of 5S in Manufacturing Industry: A Case of Foreign Workers in Melaka. *MATEC Web of Conferences*, *150*. https://doi.org/10.1051/matecconf/201815005034

Cohen, S. G., & Bailey, D. E. (1997). What makes teams work: Group effectiveness research from the shop floor to the executive suite. In *Journal of Management* (Vol. 23, Issue 3). https://doi.org/10.1177/014920639702300303

Crawford, L., & Pollack, J. (2004). Hard and soft projects: A framework for analysis. *International Journal of Project Management*, *22*(8), 645–653. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.04.004

Fitchett, A., & Hartmann, D. (2017). The application of lean design to space planning and construction. *Transactions of the Royal Society of South Africa*, *72*(3), 255–265. https://doi.org/10.1080/0035919X.2017.1315984

Flórez, L., & Castro-Lacouture, D. (2014). Labor Management in Masonry Construction: A Sustainable Approach. *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014)*, 529–536. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Ftoc.proceedings.com%2F23346webtoc.pdf&clen=50540&chunk=true

Florez, L., & Cortissoz, J. C. (2016). Defining a Mathematical Function for Labor Productivity in Masonry Construction: A Case Study. *Procedia Engineering*, *164*(June), 42–48.

https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.590

Florez, L., & Cortissoz, J. C. (2017). Using Workers Compatibility to Predict Labor Productivity through Cluster Analysis. *Procedia Engineering*, *196*(June), 359–365. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.211

Frias, C. (2017). *Aplicación del Mapa de Flujo de Valor para mejora de la eficiencia de losprocesos de una empresa constructora en Varsovia (Polonia)*. Universitat Politecnica de Valencia.

Gupta, M., Hasan, A., Jain, A. ., & Jha, K. . (2019). *Impact of Crew Composition on Productivity and Unit Labour Cost in Construction Projects-A Case Study*.

Halpin, W., & Senior, B. (1981). *Construction-management..halpin* (VP&Executive publisher (ed.)).

Hassanein, A., & Melin, J. (1997). Crew Design Methodology for Construction Contractors. *Journal of Construction Engineering and Management*, *123*(3), 203–207. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1997)123:3(203)

Holmström, J., Ketokivi, M., & Hameri, A. P. (2009). Bridging practice and theory: A design science approach. *Decision Sciences*, *40*(1), 65–87. https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00221.x

Howell, G. (1999). What is Lean Construction. In I. Tommelein (Ed.), *Seventh Conference of the International Group for Lean Construction* (pp. 1–10).

Howell, Greg, & Ballard, G. (1994). Lean production theory : Moving beyond " Can- Do " Lean Production Theory : Moving beyond “ Can-Do ” Presented at the 2nd Annual Conference on Lean Construction at Catolica Universidad de Chile Santiago , Chile. *Annual Conference on Lean Construction, 2nd*, 10.

Jongeling, A. B. R. (2016). Application of line-of-balance and 4D CAD for lean planning. *Construction Innovation*, *7*(1), 1–5.

Kasanen, E., Lukka, K., & Siitonen, A. (1993). The Constructive Approach in Management Accounting Research. *Journal of Management Accounting Researc*, *5*(June 1991), 243–264.

Koskela, L. (1992). *CIFECENTER FOR INTEGRATED FACILITY ENGINEERING APPLICATION OF THE NEW PRODUCTION PHILOSOPHY TO CONSTRUCTION*.

Lacerda, A., Xambre, A., & Alvelos, H. (2016). Applying Value Stream Mapping to eliminate waste: a case study of an original equipment manufacturer for the automotive industry. *International Journal of Production Research*, *54*(6), 1708–1720.

Maradzano, I., Dondofema, R. A., & Matope, S. (2019). Application of lean principles in the south african construction industry. *South African Journal of Industrial Engineering*, *30*(3), 210–223. https://doi.org/10.7166/30-3-2240

McKinsey Global Institute. (2017). *REINVENTING CONSTRUCTION:A ROUTE TO HIGHERPRODUCTIVITY*. https://doi.org/10.1080/19320248.2010.527275

Mejía A. Guillermo, & Hernández C. Triny. (2007). Se g u i m i e n t od el a Pr o d u c t i v i d a de n ob r a:té c n i c aSd e me d i c i ó nd e re n d i m i e n t oSd e ma n od e ob r a. *Revista De La Facultad De Ingenierías Físico Mecánicas*, *2*, 1–15.

Miron, G., Gomes Miron, L. I., Kaushik, A., & Koskela, L. (2015). *Target Value Design: The Challenge of Value Generation*.

Montes-Guerra, M. I., Ramos, F. N. G., & Mauricio Díez-Silva, H. (2013). *Estándares y metodologías: Instrumentos esenciales para la aplicación de la dirección de proyectos Methods and standars: Essentials tools in the application of proyect managment*.

Navas, R. F., Ridl, M. R., & Torés, L. (2012). Mano de obra en la construcción : determinación de

la cuadrilla óptima por medio de una herramienta de simulación Workforce in construction : determination of the optimal team through a simulation tool. *Ingeniería*, *16*(2), 151–163.

Nerwal, N. (2012). *CONSTRUCTION CREW DESIGN: A LEAN APPROACH*. Michigan State University.

Nerwal, N., & Abdelhamid, T. S. (2010). Work structuring of construction crews: Installation of light fixtures case study. *Challenging Lean Construction Thinking: What Do We Think and What Do We Know? - 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 18*, *July*, 316–325.

Observatori de Drets Humans i Empreses a la Mediterrania. (2018, March). *El sector de la construcción y las infraestructuras*. Http://Www.Odhe.Cat/Es/El-Sector-de-La-Construccion-y-Las-Infraestructuras/.

Park, H.-S., Thomas, S. R., & Tucker, R. L. (2005). Benchmarking of Construction Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, *131*(7), 772–778. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:7(772)

Pasqualini, F., & Zawislak, P. A. (2005). Value stream mapping in construction: A case study in a Brazilian construction company. *13th International Group for Lean Construction Conference: Proceedings*, 117–125.

PMI. (2017). *PMBOK guide + Agile practice guide : Agile practice guide bundle.*

Saenz, A. (2012). *El Éxito de la Gestión de Proyectos*.

Salvatore T. March *, G. F. S. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, *15*, 251–266.

Sarhan, J. G., Xia, B., Fawzia, S., & Karim, A. (2017). Lean construction implementation in the Saudi Arabian construction industry. *Construction Economics and Building*, *17*(1), 46–69.

https://doi.org/10.5130/AJCEB.v17i1.5098

Serpell, A., De Solminihac, H., & Figari, C. (2002). Quality in construction: The situation of the Chilean construction industry. *Total Quality Management*, *13*(5), 579–587. https://doi.org/10.1080/0954412022000001992

Shree, T. G., Gopal, R., & Murali, K. (2015). A Critical Review on Factors Influencing Labour Productivity in Construction Ground Water Monitoring using Smart Sensors View project Societal Value Dynamics on Climatic Change View project Murali K Sri Ramakrishna Institute of Technology A Critical Review on Factors Influencing Labour Productivity in Construction. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN*, *12*(5), 47–51. https://doi.org/10.9790/1684-12544751

Thomas, H. R., Asce, M., & Ellis, R. D. (2007). Contractor Prebid Planning Principles. *JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT © ASCE*. https://doi.org/10.1061/ASCE0733-93642007133:8542

Thomas, H. R., & Daily, J. (1983). Crew Performance Measurement Via Activity Sampling. *Journal of Construction Engineering and Management*, *109*(3), 309–320. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1983)109:3(309)

Wirth, I., & Tryloff, D. E. (1995). Preliminary comparison of six efforts to document the project-management body of knowledge. *International Journal of Project Management*, *13*(2), 109–118.

Zhang, L., & Chen, X. (2016). Role of lean tools in supporting knowledge creation and performance in lena construction. In ScienceDirect (Ed.), *International conference on sustainable design, engineering and construction* (pp. 1267–1274). ScienceDirect.