UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2017

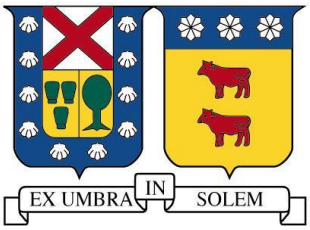
ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS EN LA OBRA GRUESA UTILIZANDO SIMULACIÓN MULTIPARADIGMA

VILLALOBOS HENRÍQUEZ, CRISTIAN MARCELO ADOLFO

http://hdl.handle.net/11673/23491

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS EN LA OBRA GRUESA UTILIZANDO SIMULACIÓN MULTIPARADIGMA

MEMORIA DE TITULACIÓN PRESENTADA POR

CRISTIAN MARCELO ADOLFO VILLALOBOS HENRÍQUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA

LEONHARD EMIL BERNOLD

ABRIL DE 2017

RESUMEN EJECUTIVO

El rubro de la construcción tiene un gran aporte en el Producto Interno Bruto Nacional que alcanza el 7,3%, genera el 8,7% del empleo nacional y concentra el 64,4% de la inversión (CChC, 2015). La Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), ha analizado este sector de la industria, detectando que solamente el 57% de los tiempos de obra son realmente productivos. Luego, para encontrar las causas de los problemas, es necesario analizar este sistema desde otro enfoque. La simulación hoy en día tiene el potencial de experimentar con sistemas complejos e incluir la interacción que ocurre entre personas, maquinarias y recursos. De esta forma, es posible entender cómo funciona el mundo real, con el fin de tomar las mejores decisiones.

El presente trabajo consiste en modelar y simular procesos de la construcción y analizar su comportamiento, con el objetivo de entender las variables claves que son causa de pérdidas. Es decir, diseñar, desarrollar, validar y probar una nueva herramienta de gestión, planificación y soporte a la toma de decisiones. Para ello, se emplea el software Anylogic, utilizado en otras áreas de la industria como: cadena de suministro, logística, manufactura, procesos de negocio, etc. Además, emplea los tres paradigmas de simulación de hoy en día: Sistemas Dinámicos, Eventos Discretos y Modelado Basado en Agentes; permitiendo combinar cualquiera de estos. Esta memoria se enfoca en la etapa de Obra Gruesa de proyectos de construcción, debido a que es una de las más críticas para la producción, por los costes y el impacto en la planificación del proyecto, además de ser interesante por el alto grado de dinamismo y variabilidad. El problema específico es entender las causas y efectos de las pérdidas en la Obra Gruesa y encontrar la forma de eliminarlas.

En primer lugar, se representa el sistema identificando los datos que describen su comportamiento, como las actividades y recursos. Las partidas de enfierradura, moldaje y hormigonado se modelan utilizando Sistemas Dinámicos, mientras que los recursos como cuadrillas y maquinarias, se modelan como Agentes. Luego, mediante un estudio del rubro, se recolectan las variables que definen las condiciones de entrada del modelo. Finalmente, se simulan diferentes escenarios para mostrar en tiempo real, las pérdidas del proceso. De esta forma, se analizan sus causas y se concluye sobre el patrón de comportamiento. Basado en esto, se han creado dos hipótesis: (1) Es posible simular de forma efectiva los procesos de la etapa de Obra Gruesa incluyendo sus 3 grandes pérdidas: desempeño, rendimiento y calidad (2) Un análisis de escenarios posibles permitirá identificar las variables más críticas de causa y efecto de pérdidas en la etapa de Obra Gruesa.

Cabe destacar que es importante aprovechar las tecnologías actuales, pues nos da la oportunidad de innovar ahora para ser competentes en el futuro.

Palabras Claves: Simulación multiparadigma, industria de la construcción, obra gruesa, pérdidas, Anylogic.

ABSTRACT

The construction sector has a large contribution in the National Gross Domestic Product, which reaches 7.3%, generates 8.7% of national employment and accounts for 64.4% of investment (CChC, 2015). The Technology Development Corporation (CDT) has analyzed this sector of the industry, detecting that only 57% of the work times are really productive. Then, to find the causes of the problems, it is necessary to analyze this system of another approach. Simulation today has the potential to experiment with complex systems and include the interaction that occurs between people, machinery and resources. In this way, it is possible to understand how the real world works, in order to make the best decisions.

The present work consists of modeling and simulating construction processes and analyzing their behavior, in order to understand the key variables that cause losses. That is, to design, develop, validate and test a new tool for management, planning and decision support. To do this, Anylogic software is used, which is used in other areas of industry, in systems such as: supply chain, logistics, manufacturing, business processes, etc. In addition, it employs the three simulation paradigms of today: Dynamic Systems, Discrete Events and Agent-Based Modeling; Allowing to combine any of these. This report focuses on the Structural Work stage of construction projects, because it is one of the most critical for production, costs and impact in project planning, in addition to being interesting because of the high degree of dynamism and variability. The specific problem is to understand the causes and effects of losses in the Structural Work and find a way to eliminate them.

First, the system is represented by identifying data describing its behavior, such as activities and resources. The framing, casting, and concreting sub-processes are modeled using Dynamic Systems, while resources such as crews and machineries are modeled as Agents. Then, through an industry study, the variables that define the conditions of entry of the model are collected. Finally, different scenarios are simulated to show real-time losses of the process. In this way, their causes are analyzed and the pattern of behavior is concluded. Based on this, two hypotheses have been created: (1) It is possible to simulate the Structural Work stage processes including its three large losses, availability, performance and quality (2) An analysis of possible scenarios will allow to identify the most critical cause and effect variables of losses in Structural Work stage.

It should be noted that it is important to take advantage of current technologies, as it gives us the opportunity to innovate now to be competent in the future.

Keywords: Multiparadigm simulation, construction industry, structural work, losses, Anylogic.

GLOSARIO

Anylogic	:	Programa de computación que incluye todos los métodos de simulación más comunes en práctica hoy.
Agentes	:	Entidades utilizadas en simulación, que tienen un comportamiento y toman decisiones de forma autónoma.
BIM	:	Building Information Modeling (Modelado de Información de la Construcción).
CAD	:	Computer-Aided Design (Diseño asistido por computadora).
Calibre	:	Área del CDT dedicada a la prestación de servicios y asesorías de optimización de procesos productivos e implementación de herramientas tecnológicas de apoyo a la gestión de proyectos y producción, en empresas de la industria de la construcción.
CChC	:	Cámara Chilena de la Construcción.
CYCLONE	:	CYCLic Operations Network. Metodología desarrollada por el Prof. Daniel W. Halpin, para representar las operaciones de construcción.
CDT	:	Corporación de Desarrollo Tecnológico.
Eventos Discretos	:	Acciones que ocurren en instantes de tiempo y que pueden ocasionar que el estado del sistema cambie.
HH	:	Horas-Hombre (unidad para cuantificar la utilización laboral).
HM	:	Horas-Máquina (unidad para cuantificar la utilización de maquinaria).
Lean-Construction	:	Modelo de gestión de la construcción basado en Lean Manufacturing.
Lean-Manufacturing	:	Modelo de gestión enfocado a entregar el máximo valor al cliente utilizando el mínimo de recursos.
MicroCYCLONE	:	Programa de simulación diseñado especialmente para modelar y analizar procesos a nivel de sitio que son de naturaleza cíclica. Puede ser utilizado para modelar operaciones de construcción.
Muda	:	Término de origen japonés que denota inutilidad e improductividad.
Muda-Waste	:	Expresión que denota pérdidas productivas.
Obra Gruesa	:	Etapa de un proyecto de construcción que incluye todas las actividades relacionadas con la construcción de la estructura portante, sin incluir las instalaciones, las terminaciones y cierres de vanos.
OEE	:	Overall Equipment Effectiveness, en español, Efectividad Global del Equipamiento. Es un indicador que mide en un solo valor, el porcentaje de efectividad de las máquinas y líneas con respecto a su máquina ideal equivalente.

Seis Sigma	:	Metodología de mejora de procesos centrada en la reducción de la cantidad de defectos mediante un control estadístico.
Simulación multiparadigma	:	Tipo de simulación que permite al modelador combinar más de un método de simulación dentro de un mismo modelo.
Sistemas Dinámicos	:	Sistemas cuyos estados evolucionan con el tiempo.
TPM	:	Total Productive Maintenance - Management, en español, Mantenimiento Productivo Total. Es un programa estándar de mejora de la producción, cuyo objetivo principal es la reducción de costos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO ..... **I**
ABSTRACT ..... **II**
GLOSARIO ..... **III**
ÍNDICE DE CONTENIDOS ..... **V**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **VII**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **VIII**
1. INTRODUCCIÓN **9**
2. ALCANCES **10**
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA **11**
3.1. LA SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE SISTEMAS 11
3.1.1. Camino a la representación digital de un sistema real. 11
3.1.2. Enfoques de simulación existentes hoy en día 12
3.1.3. Modelos de simulación digital en la construcción 16
3.1.4. Futuro desarrollo en simulación digital 17
3.1.5. CASO DE ESTUDIO: Simulación de operación de construcción integrada en BIM para la gestión de producción Just-in-Time 18
3.2. EL INDICADOR OEE Y SU FILOSOFÍA PARA LA MEJORA DE LOS PROCESOS 21
3.2.1. OEE y su relación con el TPM 22
3.2.2. Las seis grandes pérdidas 22
3.2.3. Objetivo del OEE 25
3.2.4. Fórmula y cálculo del OEE 25
3.2.5. CASO DE ESTUDIO: Sistema de Monitoreo del OEE para mejorar el Desempeño Ambiental de Operaciones de Construcción 26
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS **29**
4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 29
4.2. HIPÓTESIS 30
5. METODOLOGÍA **31**
6. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO **33**
6.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA 33
6.1.1. Procesos de la etapa de obra gruesa 34
6.1.2. Comportamiento de las cuadrillas y la grúa 34
6.2. SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN 36
6.3. ENFOQUES DE SIMULACIÓN ESCOGIDOS 36

7. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 36
7.1. DESARROLLO DEL MODELO 37
7.1.1. Modelando la partida de Enfierradura 37
7.1.2. Modelando la partida de Moldaje 39
7.1.3. Modelando la partida de Hormigonado 42
7.1.4. Modelando la Grúa 44
7.2. RECOLECCIÓN DE DATOS 48
7.2.1. Rendimiento de las partidas 48
7.2.2. Rendimiento de la Grúa 51
7.2.3. Plazos de desencofrado y descimbre 53
7.2.4. Resumen de valores (Valores Nominales) 54
8. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA 55
8.1. VALIDACIÓN ESTRUCTURAL O EXTERNA 56
8.2. VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO O INTERNA 57
9. ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS 57
9.1. SIMULACIÓN DEL SISTEMA CON VALORES NOMINALES 58
9.1.1. Resultado del sistema con valores nominales 58
9.2. ANÁLISIS COMPARATIVO 59
9.2.1. Evaluación comparativa de los comportamientos de la grúa 59
9.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 61
9.3.1. Variación de la cantidad de moldaje en obra 61
9.3.2. Variación del rendimiento máximo de la cuadrilla de enfierradura 62
9.4. RESUMEN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 62
10. CONCLUSIONES 63
10.1. SIMULACIÓN MULTIPARADIGMA PARA LA CONSTRUCCIÓN 63
10.2. UN CAMINO PARA LA GESTIÓN PREVENTIVA DE LA CALIDAD 64
10.3. CONTROL EN TIEMPO REAL 64
10.4. EVALUACIÓN 1º HIPÓTESIS 65
10.5. EVALUACIÓN 2º HIPÓTESIS 66
10.6. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES 66
11. REFERENCIAS 67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Representación clásica de los elementos y las relaciones de un modelo de Sistema Dinámico. (Borshchev & Filippov, 2004) 12
Figura 3.2. Representación de los elementos y las relaciones de un modelo de Eventos Discretos. (Borshchev & Filippov, 2004) 13
Figura 3.3. Representación de los elementos y las relaciones dentro de un modelo basado en agentes. (Borshchev & Filippov, 2004) 14
Figura 3.4. Representación de las arquitecturas de modelado multiparadigma. (Borshchev, 2013) 16
Figura 3.5. Marco de simulación BIM. (WoonSeong, Soowon, JeongWook, & June-Seon, 2016) 19
Figura 3.6. Diagrama del proceso de desarrollo de la simulación. (WoonSeong et al., 2016) 20
Figura 3.7. Resultados visuales del análisis de sensibilidad. (WoonSeong et al., 2016) 21
Figura 3.8. Definición de OEE de acuerdo al modelo TPM. (Sistemas OEE, 2016) 23
Figura 3.9. Señal de vibración en los ejes x,y,z. (Ahn, Lee, & Peña-Mora, 2012) 28
Figura 3.10. Comparación de los períodos de ocio entre la observación (cuadro de puntos) y el análisis energético de las señales de vibración (barras grises oscuro). (Ahn, Lee, & Peña-Mora, 2012) 28
Figura 5.1. Secuencia lógica de la Metodología de un proyecto de Simulación (Allende, 2000) 31
Figura 6.1. Secuencia de las partidas de la etapa de obra gruesa 33
Figura 6.2. Secuencia de la etapa de obra gruesa de una obra tipo 34
Figura 6.3. Diagrama de flujo del comportamiento de la grúa y de las cuadrillas de enfierradura, moldaje y hormigonado. 35
Figura 7.1. Diagrama Forrester del proceso de enfierradura y sus elementos. (en Anylogic) 38
Figura 7.2. Diagrama de estado de la cuadrilla de enfierradura. (en Anylogic) 39
Figura 7.3. Diagrama Forrester de la partida de moldaje y sus elementos. (en Anylogic) 40
Figura 7.4. Diagrama de estado de la cuadrilla de instalación de moldaje. (en Anylogic) 41
Figura 7.5. Diagrama de estado de la cuadrilla de descimbre de moldaje. (en Anylogic) 42
Figura 7.6. Diagrama Forrester de la partida de hormigonado. (en Anylogic) 43
Figura 7.7. Diagrama de estado de la cuadrilla de hormigonado. (en Anylogic) 44
Figura 7.8. Diagrama de estado del primer comportamiento de la grúa. (en Anylogic) 45
Figura 7.9. Diagrama de estado del segundo comportamiento de la grúa. Software Anylogic 46
Figura 7.10. Diagrama de estado del tercer comportamiento de la grúa. (en Anylogic) 47
Figura 7.11. Gráfico del rendimiento de la partida de moldaje por tipología. (CDT, 2013) 49
Figura 7.12. Gráfico del rendimiento de vaciado del hormigón según metodología. (CDT, 2013) 50
Figura 7.13. Gráfico del rendimiento real de vaciado del hormigón según metodología. (CDT, 2013) 50
Figura 7.14. Gráfico Benchmarking de rendimientos de la grúa para Edificación en Altura. (CALIBRE, 2013) 51
Figura 7.15. Gráfico rendimientos, según utilización de grúa. 55% en moldaje, 1 grúa. (CDT, 2013) 53
Figura 8.1. Principales aspectos de la validación de modelos. (Barlas, 1996) 55
Figura 8.3. Análisis de sensibilidad del OEE al variar la tasa de falla de la cuadrilla de Enfierradura 56
Figura 8.2. Gráfico del avance las distintas partidas de la etapa de obra gruesa simuladas en Anylogic. 57
Figura 9.1. Uso del tiempo en actividades que representan pérdidas para el sistema con valores nominales 58
Figura 9.2. Avance de las partidas de obra gruesa con valores nominales 59
Figura 9.3. OEE de las cuadrillas y grúa con valores nominales 59
Figura 9.4. Comparación de los desperdicios del proceso según el comportamiento que desempeña la grúa 60
Figura 9.5. Evaluación de los desperdicios del sistema al variar la cantidad de moldaje en obra 61
Figura 9.6. Evaluación de los desperdicios del sistema al variar el rendimiento máximo de la cuadrilla de enfierradura 62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 7.1. Rendimiento cuadrilla enfierradura según dependencia laboral. (CDT, 2013) 48
Tabla 7.2. Rendimiento cuadrilla enfierradura según tarea ejecutada. (CDT, 2013) 48
Tabla 7.3 . Plazos mínimos de desencofrado. (Montoya, 1991) 53
Tabla 7.4. Plazos mínimos de descimbre y desmolde. (NCh170, 2016) 54
Tabla 7.5. Valores nominales del horario de jornada y la velocidad de las partidas 54
Tabla 7.6. Valores nominales de la cantidad y capacidad de material de las partidas 54

1. INTRODUCCIÓN

La construcción como sector productivo del país, es de gran importancia en el desarrollo económico, ya que atraviesa transversalmente a casi todos los sectores económicos, pues provee la infraestructura física para el desarrollo y funcionamiento productivo, teniendo una participación muy relevante dentro del producto interno bruto nacional que alcanza el 7,3%, genera el 8,7% del empleo nacional y concentra el 64,4% de la inversión (CChC, 2015).

A pesar de su importancia, es una de las industrias que presenta un menor grado de desarrollo, convirtiéndose en una actividad caracterizada por grandes deficiencias y falta de efectividad. Lo que se traduce en la poca competitividad y coloca a las empresas constructoras en desventaja frente a los mercados de la economía internacional (Botero, 2004)

Actualmente en Chile, a través de mediciones de productividad realizadas por el sistema Calibre bajo el alero de la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), se ha detectado que solamente el 57% de los tiempos de obra son realmente productivos, mientras que el 21% corresponde a tiempos perdidos. El resto se distribuye entre charlas de inicio de jornada y tiempos de traslados de materiales o secuencias constructivas que son necesarios para ejecutar una faena. Al analizar las razones, se identifica la coordinación, abastecimientos de materiales y metodologías de trabajo como las principales causas, lo que indica claramente una deficiencia de los equipos de trabajo en ámbitos de la planificación y control de los proyectos (CDT, 2013). Específicamente, las diferencias entre la planificación y la ejecución implican pérdidas productivas que se traducen en exceso de costos, extensiones de duración y resultados de menor calidad.

La planificación tradicional de la construcción, depende de datos históricos y de modificaciones heurísticas, lo que impide la integración de detalles gerenciales como la dinámica de la productividad. Esta dinámica, surge por la existencia de múltiples procesos y las interacciones complejas de una amplia variedad de componentes que están conectados por relaciones no lineales (AbouRizk & Mohamed, 2002). Para minimizar las variaciones, esta investigación presenta un marco de simulación multiparadigma para entender la dinámica de las pérdidas productivas en la fase de ejecución de la construcción, específicamente en la etapa de obra gruesa

La simulación en la construcción, se ha utilizado desde que se creó CYCLONE en 1973, una técnica de modelado que permitía la representación gráfica y simulación de sistemas discretos utilizando variables determinísticas y estocásticas. Aunque las investigaciones establecen que la simulación puede ser una valiosa herramienta, esta no ha triunfado en la industria de la construcción por motivos como, excesivo tiempo de modelado, modelos no representativos y resultados imprecisos.

El objetivo de este trabajo es generar un modelo de simulación que represente el sistema de la construcción en un entorno virtual sin riesgos, incluyendo la interacción dinámica y compleja de los procesos, para determinar las verdaderas causas de las pérdidas productivas y poder tomar mejores decisiones.

2. ALCANCES

Esta memoria consiste en simular el proceso de Obra Gruesa de proyectos de construcción y analizar su comportamiento con el objetivo de entender las variables claves que son causa de pérdidas. El modelado se lleva a cabo en el software Anylogic, combinando más de un paradigma de simulación, específicamente Sistemas Dinámicos y Modelado Basado en Agentes.

Inicialmente, se busca representar el sistema identificando los datos que describen su comportamiento, como las actividades y recursos involucrados. Los subprocesos de enfierradura, moldaje y hormigonado se modelan utilizando Sistemas Dinámicos, mientras que los recursos como cuadrillas y maquinarias, se modelan como Agentes. Luego, mediante un estudio y observación en terreno se recolectan las variables que definen las condiciones de entrada del modelo. Finalmente se simulan diferentes escenarios para mostrar en tiempo real, las pérdidas del proceso. De esta forma se analizan sus causas y se determinan oportunidades de mejora. Como resultado se obtiene una nueva herramienta de gestión, planificación y soporte a la toma de decisiones.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En este capítulo se describe la teoría indispensable para comprender el trabajo desarrollado. Del mismo modo, para lograr una buena comprensión, esta sección se divide en dos temas principales: Simulación e indicador OEE.

Con el objetivo de exponer el conocimiento reciente y los aspectos más interesantes de los temas tratados, al término de cada uno, se presenta un correspondiente caso de estudio obtenido de la literatura.

3.1. LA SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE SISTEMAS

La simulación de sistemas surgió en el campo de la cibernética a fines de la década de 1940 cuando los conceptos de información, retroalimentación y regulación (Wiener, 1948) se generalizaron desde aplicaciones específicas en ingeniería hasta sistemas en general, incluyendo sistemas de organismos vivos, procesos inteligentes abstractos y lenguaje.

Las herramientas de simulación nos permiten la representación de problemas cotidianos, los cuales cuentan con cierto grado de incertidumbre en sus diferentes parámetros, lo que hace que la implementación de un modelo numérico de este problema se aleje de la realidad. Esto quiere decir que, en los modelos numéricos se necesita establecer con exactitud cada valor que se emplea a la hora de resolver el modelo, datos que en la realidad no conocemos, o que pueden variar dentro de un amplio margen, y es ahí donde las herramientas de simulación nos permiten abordar desde un punto de vista más realista estas situaciones. (Trujillo, 2016)

3.1.1. Camino a la representación digital de un sistema real.

Existen varias definiciones de simulación, una de las más relevantes es la de Banks (1999), que la define como la representación de la operación de algún proceso o sistema del mundo real a través del tiempo. Ya sea hecha manualmente o en una computadora, la simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema y su observación para obtener inferencias relacionadas con las características operativas del sistema real. Los modelos de simulación pueden ser utilizados como una herramienta de análisis para predecir los efectos de cambios en sistemas existentes, o como una herramienta de diseño para predecir el comportamiento de sistemas nuevos.

3.1.2. Enfoques de simulación existentes hoy en día

3.1.2.1. Simulación dinámica de sistemas

Creada a mediados de los años 1950 por el profesor Jay Forrester para representar toda clase de sistemas complejos de conceptos aplicados originalmente en ingeniería. Esta herramienta permite crear modelos donde el espacio y el tiempo pueden ser comprimidos y ralentizados ofreciendo una visión de los efectos, decisiones o desarrollos que aporten éxito (Sterman, 2000).

La metodología de simulación de sistemas dinámicos, según Sterman, es típicamente utilizada en el modelado de sistemas a largo término o estratégicos, dado que asume un alto nivel de agregación de los objetos modelados. Este tipo de modelos permite representar desde personas, productos, eventos, así como otros elementos con un alto nivel de abstracción.

En la Figura 3.1 Representación clásica de los elementos y las relaciones de un modelo de Sistema Dinámico. , se muestran los elementos principales de un sistema dinámico, estos son los diagramas de retroalimentación causal, los diagramas de flujo y las demoras y ecuaciones temporales. La mayoría de los modelos de dinámica de sistemas pueden expresarse como un conjunto de ecuaciones diferenciales cuyas variables son propiedades del sistema modelado. Uno de los objetivos de la dinámica de sistemas es, por tanto, encontrar las variables críticas del sistema complejo e identificar los vínculos causales que existen entre ellas.

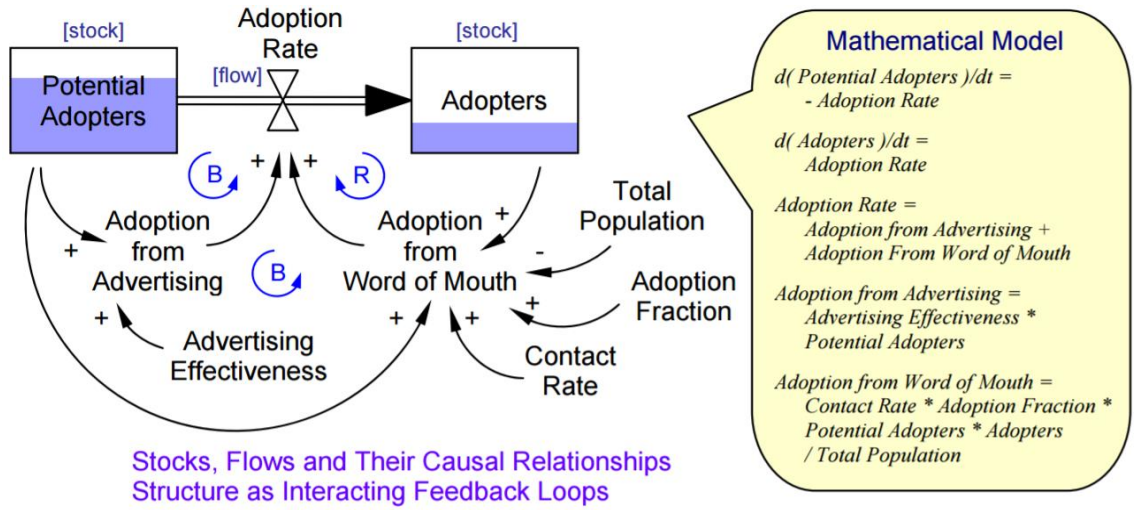


Figura 3.1 Representación clásica de los elementos y las relaciones de un modelo de Sistema Dinámico. (Borshchev & Filippov, 2004)

3.1.2.2. Simulación por eventos discretos

La simulación por eventos discretos, diseñada e implementada por Geoffrey Gordon de IBM en 1961, es una técnica informática de modelado dinámico de sistemas. Frente a su homóloga, la simulación de tiempo continuo, esta se caracteriza por un control en la variable del tiempo que permite avanzar a éste a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de tales eventos a un tiempo futuro. Un requisito para aplicar esta técnica es que las variables que definen el sistema no cambien su comportamiento durante el intervalo simulado. (Wikipedia, Simulación por eventos discretos, 2016)

Además, estos sistemas se caracterizan por mantener un estado interno global del sistema, que puede no obstante estar física o lógicamente distribuido, y que cambia parcialmente debido a la ocurrencia de un evento. El estado del sistema solo cambia mediante la ejecución de eventos, que se almacenan en un contenedor, y uno o varios procesos dedicados a su ejecución avanzan el tiempo de simulación a medida que se van ejecutando y eliminando los eventos pendientes para el valor de tiempo actual.

La ejecución de un evento puede desencadenar la generación de nuevos eventos futuros. Cada uno está marcado por su tiempo, por lo que el orden de generación puede no coincidir con el orden de ejecución. Un ejemplo de su representación, se muestra en la siguiente figura.

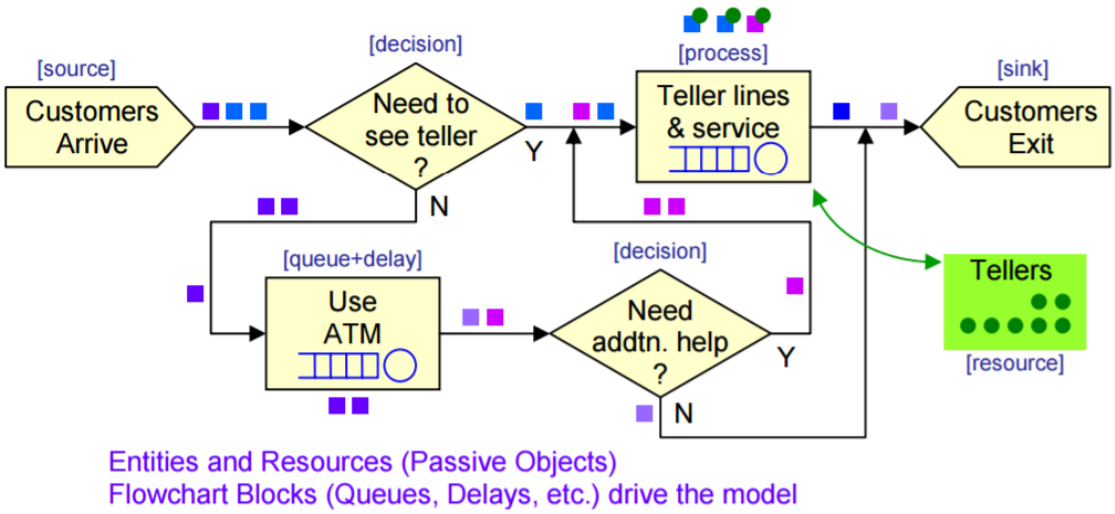


Figura 3.2. Representación de los elementos y las relaciones de un modelo de Eventos Discretos. (Borshchev & Filippov, 2004)

3.1.2.3. Simulación basada en agentes

La idea del modelado basado en agentes (ABM), se desarrolló como un concepto relativamente simple a finales de los años cuarenta. Dado que requiere procedimientos intensivos en computación, no se generalizó hasta los años noventa. (Wikipedia, Agent-based model, 2017)

En la simulación basada en agentes, como se muestra en la Figura 3.3. Representación de los elementos y las relaciones dentro de un modelo basado en agentes. un sistema es modelado como una colección de entidades de toma de decisiones autónoma llamadas agentes. Cada uno de estos agentes evalúa de manera individual su situación y toma decisiones teniendo como base un conjunto de reglas. (Cardoso, Bert, & Podestá, 2011)

Los agentes, pueden ejecutar diferentes comportamientos dependiendo del sistema que representan, por ejemplo, en una cadena de suministro pueden actuar como consumidores, productores o vendedores. Una característica importante en los modelos basados en agentes es la interacción entre estos agentes que permite explorar dinámicas o comportamiento fuera del alcance de métodos matemáticos. En conclusión, los agentes son unidades con diferentes características, capaces de tomar decisiones de forma autónoma. En este caso, la toma de decisiones de cada agente sigue un conjunto de reglas y atributos únicos definidas para cada una de las entidades.

Por lo tanto, en el nivel más simple, un modelo basado en agentes consiste en un sistema de agentes y las relaciones que se dan entre estos. No obstante, incluso un simple modelo basado en agentes, puede exhibir patrones de conducta completos y proporcionar información sobre la dinámica del sistema que se pretende emular. Además, los agentes pueden ser capaces de evolucionar, permitiendo comportamientos imprevistos. (Domínguez & Mújica, 2013)

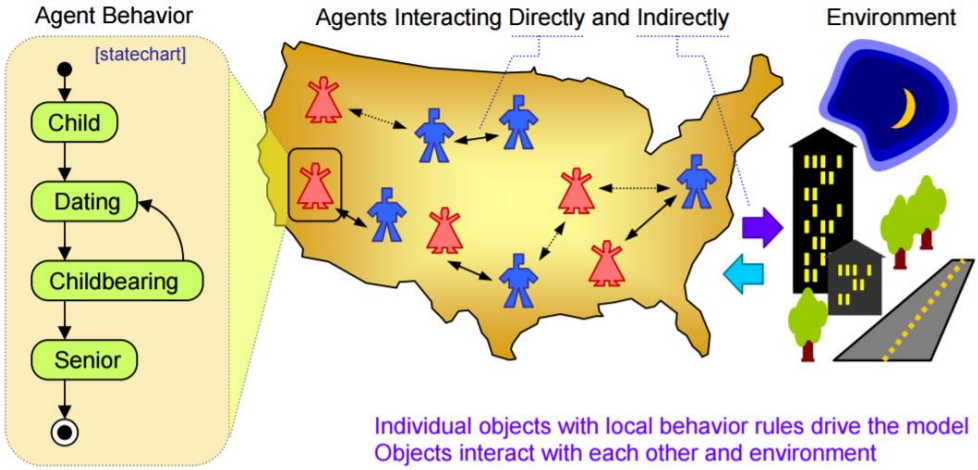


Figura 3.3. Representación de los elementos y las relaciones dentro de un modelo basado en agentes. (Borshchev & Filippov, 2004)

3.1.2.4. Simulación multiparadigma

Con frecuencia, el problema no puede ajustarse completamente a uno de los tres paradigmas de modelado existentes (evento discreto, dinámica de sistemas o modelado basado en agentes). Pensando en términos de un lenguaje de modelado de un solo método, el modelador inevitablemente comienza a usar soluciones alternativas (construcciones poco convencionales y engorrosas), o simplemente deja parte del problema fuera del alcance del modelo (lo trata como exógeno).

La simulación multiparadigma permite que el modelador combine estos métodos de simulación dentro de un mismo modelo. La elección de la arquitectura del modelo, por ejemplo, cómo dividir el modelo en componentes, qué agregar, qué granularidad utilizar, qué comportamiento se asigna mejor a un diagrama de proceso o estado; pertenece principalmente al dominio del arte e intuición del modelador (Wikipedia, AnyLogic, 2015). La siguiente figura indica ejemplos de arquitecturas de modelado multiparadigma.

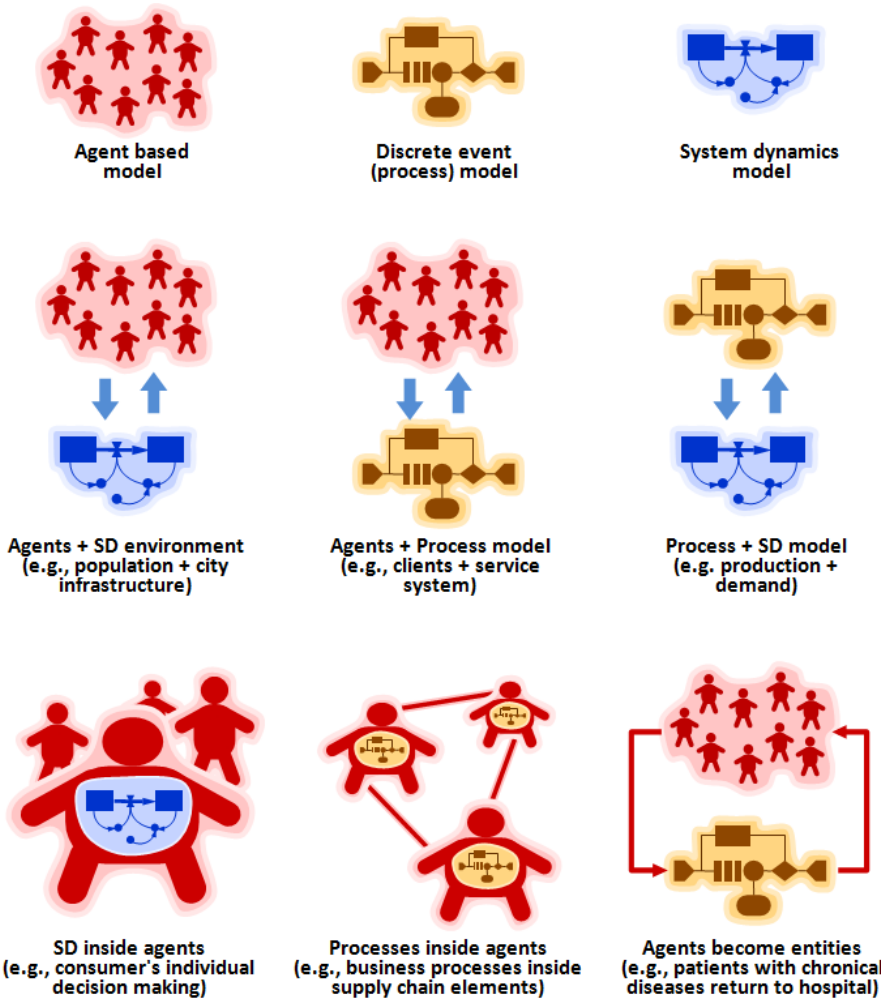


Figura 3.4. Representación de las arquitecturas de modelado multiparadigma. (Borshchev, The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6., 2013)

3.1.3. Modelos de simulación digital en la construcción

Cada vez más, los modelos de simulación se utilizan como herramientas de resolución de problemas y toma de decisiones en muchas industrias, especialmente en la manufactura. La simulación también ha sido durante mucho tiempo un método establecido para analizar tanto la producción como la logística. En particular, la industria manufacturera ha implementado con éxito simulaciones para mejorar los procesos de producción. La popularidad de la simulación se deriva de su capacidad para hacer modelos de sistemas complejos. Las simulaciones ofrecen representaciones realistas de las interacciones entre una variedad de sistemas de diversos componentes.

A pesar de estas ventajas, en la industria de la construcción, el uso de la simulación para fines de planificación se ha limitado en gran medida a la investigación académica. Esto se debe a que la simulación de modelado es un proceso largo y propenso a errores.

WoonSeong *et al.* (2016), afirman que en la actualidad, los esquemas utilizados para establecer modelos se crean a través de métodos tradicionales de planificación de la construcción, utilizando datos históricos y ajustes heurísticos. Así, los modelos no pueden ofrecer planes óptimos o confiables, permaneciendo en el nivel de visualización, no de planificación. Si los horarios no se desarrollan de manera confiable, los gerentes de construcción sólo pueden usar los modelos como herramientas de comunicación visual y no como facilitadores de planificación, análisis y toma de decisiones.

Ha habido un cuerpo sustancial de investigación sobre la aplicación de la tecnología de simulación por computadora al campo de la construcción. El primer enfoque de simulación desarrollado en esta área se llamó CYCLONE, que puede utilizarse para modelar redes cíclicas simples. Por ejemplo, simulaciones de micro-CYCLONE se utilizaron para analizar las operaciones de planta de hormigón por lotes de acuerdo a las combinaciones de recursos y distancias. Sin embargo, este sistema era demasiado simple para modelar con precisión los recursos, y por lo tanto tendía a manipularlos en el modelo. Luego, con el desarrollo de la simulación de procesos orientados a objetos, se mejoraron las herramientas de simulación para crear modelos más prácticos con mejores interfaces de usuario y la flexibilidad para ajustar el alcance del modelo. Posteriormente, los investigadores han intentado integrar la tecnología de simulación con otras herramientas. Un ejemplo fue la integración de 3D-CAD (Computer-Aided Design) con simulaciones por ordenador para apoyar la toma de decisiones durante la construcción. Otros investigadores utilizaron la simulación de eventos discretos para la planificación mediante el diseño de operaciones de construcción y luego visualizar las operaciones simuladas en 3D. (Halpin, 1977)

Con los avances que se han hecho con las herramientas de modelado, las aplicaciones potenciales de simulación por ordenador han aumentado. Por ejemplo, los modelos de simulación ahora pueden simular y analizar las operaciones de construcción, y luego apoyar la planificación de la construcción. En última instancia, pueden predecir la utilización de los recursos e identificar los cuellos de botella de la logística. Sin embargo, para utilizar simulaciones por computadora en la industria de la construcción, primero se debe resolver las limitaciones como las dificultades con el modelado de simulaciones y el uso no fiable de datos.

3.1.4. Futuro desarrollo en simulación digital

Hoy en día se utiliza la simulación para diseñar o rediseñar sistemas complejos, pero el siguiente paso será controlar el sistema real con la misma simulación. Domínguez & Mújica (2013) afirman que este avance obligará a mantener el modelo actualizado y no se utilizará una sola vez, sino que se convertirá en una parte crítica de la operación del sistema.

Con los rápidos avances que se están haciendo en hardware y software, es difícil predecir mucho sobre el futuro, pero se pueden imaginar avances como el análisis automático de datos, software con capacidad de decisión, simulaciones totalmente integradas en paquetes de control de producción e incluso con realidad virtual.

3.1.5. CASO DE ESTUDIO: Simulación de operación de construcción integrada en BIM para la gestión de producción Just-in-Time

WoonSeong, Soowon, JeongWook, & June-Seon (2016), desarrollaron una simulación integrada con BIM (Building Information Modeling) para predecir la dinámica de la productividad en la fase de planificación de la construcción. Consistió en los siguientes pasos: (1) preparación de un modelo BIM para producir datos de entrada; (2) composición de una simulación de construcción a nivel operativo; y (3) obtención dinámica de productividad a partir de la simulación integrada BIM. Para validar el marco propuesto, los autores lo aplicaron a un modelo de acero estructural. Al integrar BIM con simulaciones de operación de construcción, pudieron crear planes de construcción confiables que se adaptaron a los cambios del proyecto. Los resultados muestran que el marco desarrollado facilita la predicción confiable de la dinámica de la productividad y puede contribuir a mejorar la fiabilidad de los horarios, optimizar la asignación de recursos, ahorrar costes asociados a los amortiguadores y reducir el desperdicio de material. La simulación completa realizó la operación de construcción en un mundo virtual y generó pronósticos precisos de dinámicas de productividad que fueron más confiables que los desarrollados por métodos tradicionales.

3.1.5.1. Marco de simulación BIM

WoonSeong *et al.* (2016), desarrollaron una simulación integrada BIM para predecir la dinámica de la productividad y facilitar una gestión de producción confiable. BIM ofrece datos fiables para las simulaciones de procesos de construcción. Mediante el desarrollo de comandos utilizando la API BIM, se extrajo los datos BIM y se tradujeron a datos de construcción que podían ser introducidos en la simulación. Los autores afirman que el uso del BIM permitirá a los administradores de la construcción considerar las características únicas de los proyectos de construcción tales como materiales, geometría, y cantidad y calidad del trabajo requerido. Esto ahorrará tiempo y dinero a los gerentes de construcción. La siguiente figura muestra el desarrollo de este proceso.

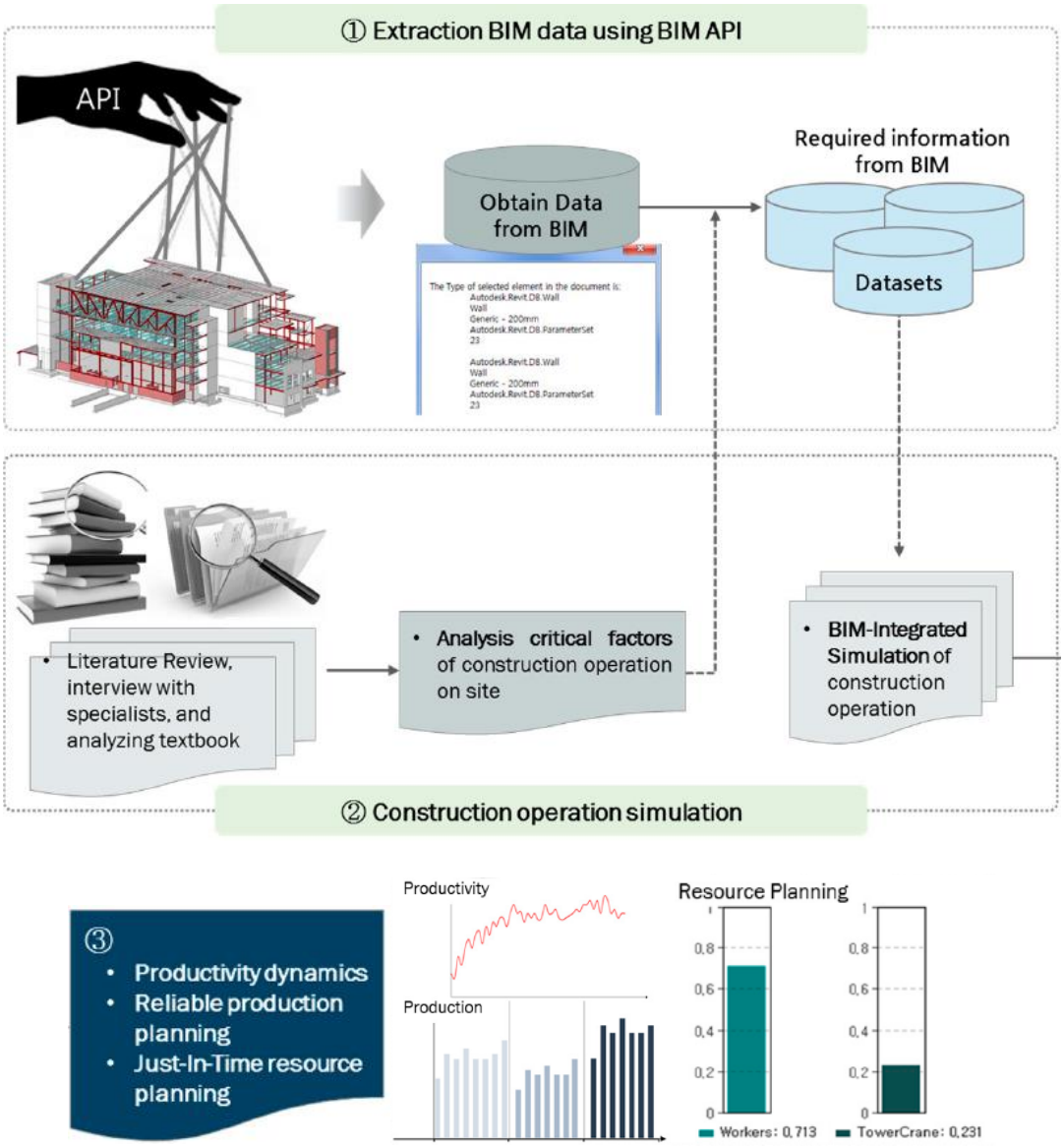


Figura 3.5. Marco de simulación BIM. (WoonSeong, Soowon, JeongWook, & June-Seon, 2016)

3.1.5.2. Simulación de la operación de construcción

Después de preparar un modelo BIM preconstruido y componer comandos usando el API de BIM, WoonSeong *et al.* (2016), desarrollaron una simulación operacional de construcción que se puede ver en la Figura 3.6. Para construir una simulación confiable, primero escudriñaron varios procesos de construcción realizando una revisión exhaustiva de la literatura, entrevistando a los profesionales y analizando libros de texto. Luego, identificaron los factores críticos que influyen en la productividad operativa del trabajo. Utilizando la información recogida de sus análisis, construyeron un modelo de simulación conceptual como un esquema, enumeraron los factores críticos de productividad y desarrollaron una simulación operacional utilizando el software

Anylogic. La herramienta de simulación utilizada es el primer y único instrumento para reunir eventos discretos, dinámica de sistemas y simulaciones basadas en agentes en un entorno de desarrollo de modelos. Usando la herramienta de simulación Anylogic, siguieron los pasos listados abajo para desarrollar y conducir finalmente a la simulación de la operación de construcción.

- Definición de los procedimientos de trabajo para la operación de construcción.
- Determinación de los factores críticos que afectan la productividad laboral.
- Desarrollo de la simulación.
- Extracción de los datos de construcción de BIM para realizar simulaciones.
- Implementación de la simulación de computadora.

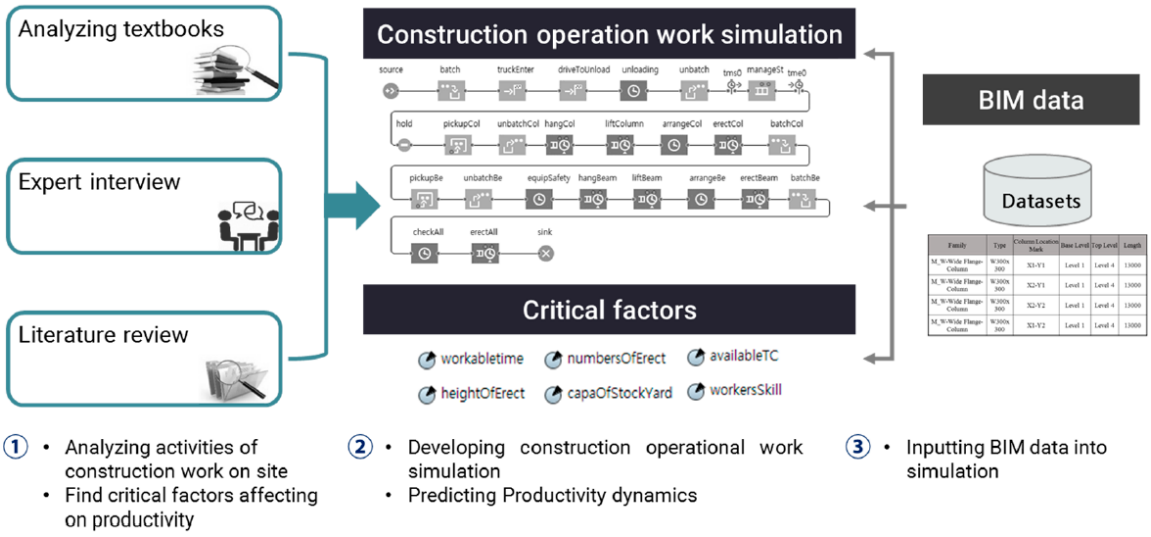


Figura 3.6. Diagrama del proceso de desarrollo de la simulación. (WoonSeong *et al.*, 2016)

3.1.5.3. Análisis de sensibilidad

Esta sección discute el análisis de sensibilidad que probó la reacción del modelo a los cambios en los parámetros de entrada. WoonSeong *et al.* (2016), analizaron cuatro factores críticos: la cantidad de materiales de erección, la capacidad del acopio, la altura de la erección y la disponibilidad de una grúa torre. Aunque hubo un total de seis factores que se consideraron críticos, los días operables y la habilidad de los trabajadores no se podían definir ni asumir antes de la simulación. Estos dos factores sólo pueden obtenerse por extrapolación a partir de resultados de simulación y/o análisis de investigaciones previas. Entre los cuatro factores de impacto, se analizó la cantidad de materiales de erección y capacidad del acopio, ya que podrían ser modificados por individuos involucrados en los participantes del proyecto de construcción. Por ejemplo, los materiales podrían ser reducidos por el diseño estructural estratégico de un diseñador estructural, y la capacidad de un acopio podría ser ajustado a nivel estratégico o de

planificación. Sus análisis de sensibilidad consideraron estos puntos de flexibilidad. La configuración y los resultados de este análisis se visualizan en la Figura 3.7siguiente figura.

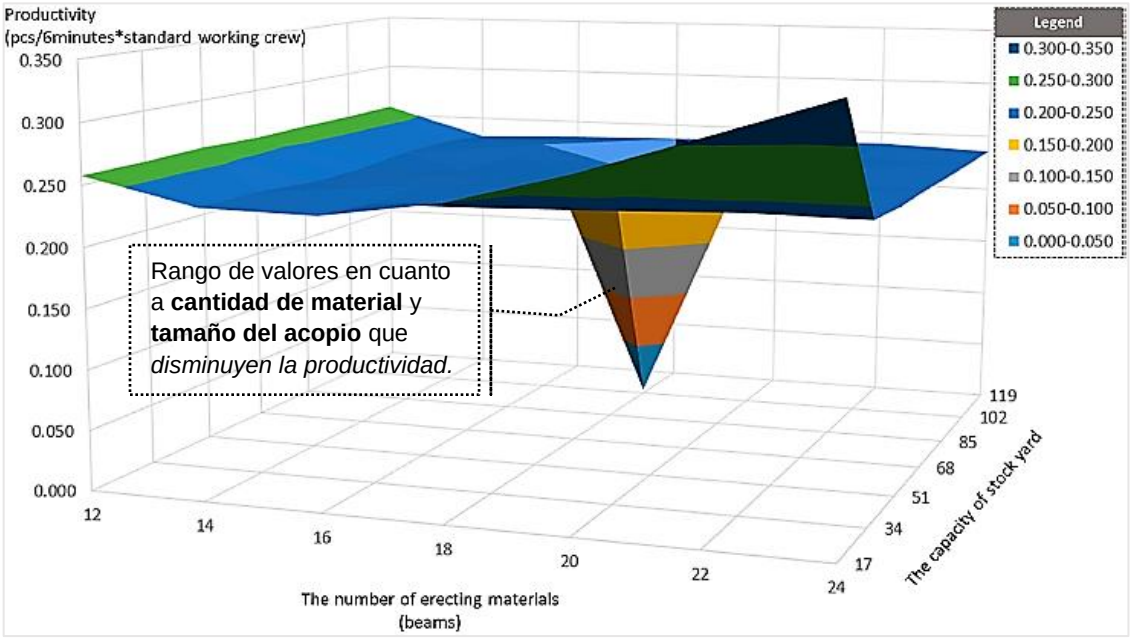


Figura 3.7. Resultados visuales del análisis de sensibilidad. (WoonSeong *et al.,* 2016)

Tradicionalmente, los administradores de la construcción han aceptado que la productividad disminuye cuando aumenta la cantidad de materiales de erección. Sin embargo, según el análisis de sensibilidad, la productividad disminuyó, pero luego se recuperó cuando la cantidad de materiales de erección aumentó regularmente. Por otra parte, cuando la cantidad era suficiente para perturbar la productividad, disminuyó junto con la extensión de la capacidad del acopio. Con respecto a la planificación de la construcción, este análisis se puede aplicar para determinar la cantidad adecuada de materiales de erección y el tamaño del acopio necesario.

3.2. EL INDICADOR OEE Y SU FILOSOFÍA PARA LA MEJORA DE LOS PROCESOS

A continuación, se definen los conceptos del Overall Equipment Effectiveness (OEE), en español, Efectividad Global del Equipamiento, como herramienta de mejora continua, enmarcado en la industria manufacturera actual y su relación con el Total Productive Maintenance – Management (TPM), en español Mantenimiento Productivo Total. Este indicador mide en un solo valor, a diferencia de otros indicadores, el porcentaje de efectividad de las máquinas y líneas con respecto a su máquina ideal equivalente, el cual es calculado combinando tres elementos asociados a cualquier proceso de producción: Disponibilidad, Rendimiento y Calidad. Esta clasificación proviene de la filosofía del TPM, en la que se definen “Seis Grandes Pérdidas”. Estas

pérdidas reducen el tiempo efectivo del proceso y la producción óptima; por lo tanto, elevan los costos de producción. (González, 2009)

3.2.1. OEE y su relación con el TPM

El OEE muestra el porcentaje de efectividad de una máquina con respecto a su máquina ideal equivalente. La diferencia la constituyen las pérdidas de tiempo, velocidad y calidad. Nace como un KPI (Key Performance Indicator, en español Indicador Clave de Desempeño) asociado a un programa estándar de mejora de la producción llamado TPM. El objetivo principal del programa TPM es la reducción de costos. Este indicador, mide la efectividad de las máquinas y líneas a través de un porcentaje, que es calculado combinando tres elementos asociados a cualquier proceso de producción:

- **Disponibilidad:** tiempo real de la máquina produciendo.
- **Rendimiento:** producción real de la máquina en un determinado periodo de tiempo.
- **Calidad:** producción sin defectos generada.

3.2.2. Las seis grandes pérdidas

Al mismo tiempo, el OEE analiza y califica los diferentes tipos de pérdidas que pueden producirse en un proceso productivo. Esta clasificación proviene de la misma manera del TPM, en el que se definen “Seis Grandes Pérdidas”. Estas pérdidas hacen reducir el tiempo efectivo de proceso y la producción óptima a alcanzar. (González, 2009)

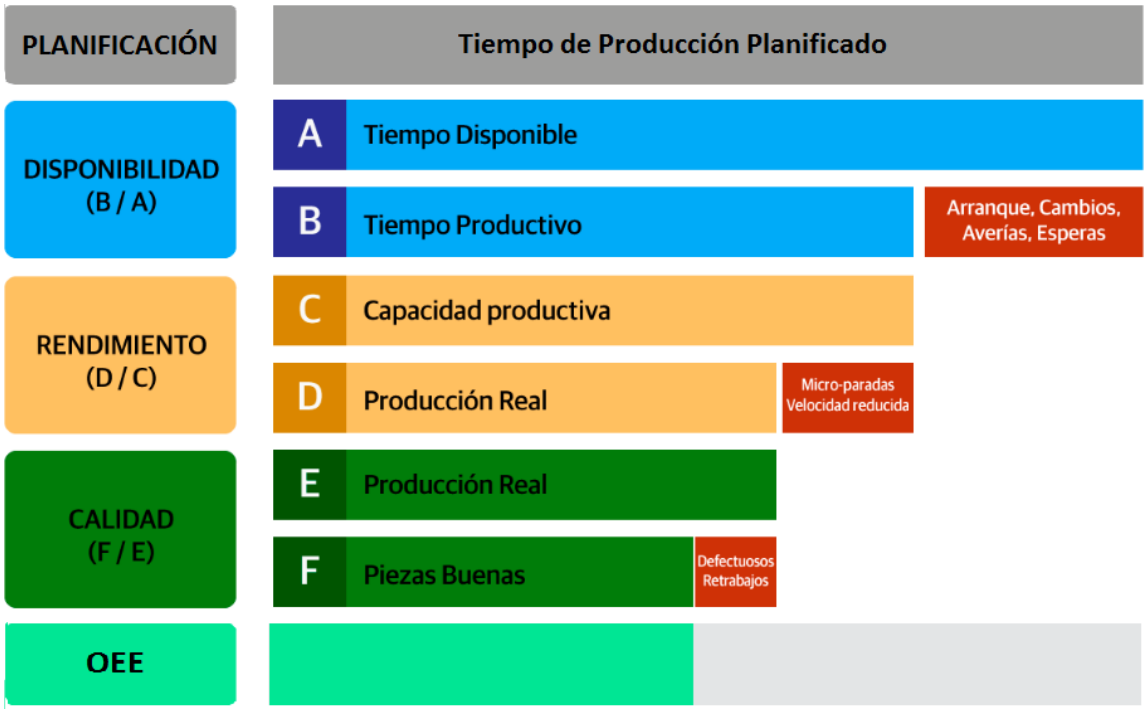


Figura 3.8. Definición de OEE de acuerdo al modelo TPM. (Sistemas OEE, 2016)

3.2.2.1. Disminución de Disponibilidad o Pérdidas de Tiempo

La pérdida de tiempo se define como el tiempo durante el cual la máquina debería haber estado produciendo, pero no lo ha estado. Ningún producto sale de la máquina. Las pérdidas son:

Averías (Primera Pérdida): Un repentino e inesperado fallo o avería genera una pérdida en el tiempo de producción. La causa de esta disfunción puede ser técnica u organizativa (por ejemplo; error al operar la máquina, mantenimiento pobre del equipo). El OEE considera este tipo de pérdida a partir del momento en el cual la avería aparece.

Esperas (Segunda Pérdida): El tiempo de producción se reduce también cuando la máquina está en espera. La máquina puede quedarse en estado de espera por varios motivos, por ejemplo; debido a un cambio, por mantenimiento, o por un paro para ir a merendar o almorzar. En el caso de un cambio, la máquina normalmente tiene que apagarse durante algún tiempo, cambiar herramientas, útiles u otras partes. La técnica de SMED (en inglés Single Minute Exchange of Die; en español técnica de paradas al estilo fórmula uno para realizar un abastecimiento/cambios necesarios) define el tiempo de cambio como el tiempo comprendido entre el último producto bueno del lote anterior y el primer producto bueno del nuevo lote. Para el OEE, el tiempo de cambio es el tiempo en el cual la máquina no fabrica ningún producto.

3.2.2.2. Disminución de Rendimiento o Pérdidas de Velocidad

Una pérdida de velocidad implica que la máquina está funcionando, pero no a su velocidad máxima. Existen dos tipos de pérdidas de velocidad:

Microparadas (Tercera Pérdida): Cuando una máquina tiene interrupciones cortas y no trabaja a velocidad constante, estas microparadas y las consecuentes pérdidas de velocidad son generalmente causadas por pequeños problemas tales como bloqueos producidos por sensores de presencia o agarrotamientos en las cintas transportadoras. Estos pequeños problemas pueden disminuir de forma drástica la efectividad de la máquina. En teoría las microparadas son un tipo de pérdida de tiempo. Sin embargo, al ser tan pequeñas (normalmente menores de 5 minutos) no se registran como una pérdida de tiempo.

Velocidad Reducida (Cuarta Pérdida): La velocidad reducida es la diferencia entre la velocidad fijada en la actualidad y la velocidad teórica o de diseño. En ocasiones hay una considerable diferencia entre lo que los tecnólogos consideran que es la velocidad máxima y la velocidad máxima teórica. En muchos casos, la velocidad de producción se ha rebajado para evitar otras pérdidas tales como defectos de calidad y averías. Las pérdidas debidas a velocidades reducidas son por tanto en la mayoría de los casos ignoradas o infravaloradas.

3.2.2.3. Pérdidas de Calidad o Disminución de Calidad

La pérdida de calidad ocurre cuando la máquina fabrica productos que no son buenos a la primera. Se pueden diferenciar dos tipos de pérdidas de calidad:

Deshechos (Scrap) (Quinta Pérdida): Deshechos son aquellos productos que no cumplen los requisitos establecidos por calidad, incluso aquellos que no habiendo cumplido dichas especificaciones inicialmente puedan ser vendidos como productos de calidad menor. El objetivo es “cero defectos”. Fabricar siempre productos de primera calidad desde la primera vez.

Un tipo específico de pérdida de calidad son las pérdidas en los arranques. Estas pérdidas ocurren cuando:

- Durante el arranque de la máquina, la producción no es estable inicialmente y los primeros productos no cumplen las especificaciones de calidad
- Los productos del final de la producción de un lote se vuelven inestables y no cumplen las especificaciones
- Aquellos productos que no se consideran como buenos para la orden de fabricación y, consecuentemente, se consideran una pérdida. Normalmente este tipo de pérdidas se consideran inevitables. Sin embargo, el volumen de estas puede ser sorprendentemente grande.

Retrabajo (Sexta Pérdida): Los productos retrabajados son también productos que no cumplen los requisitos de calidad desde la primera vez, pero pueden ser reprocesados y convertidos en productos de buena calidad. A primera vista, los productos retrabajados no parecen ser muy malos, incluso para el operario pueden parecer buenos. Sin embargo, el producto no cumple las especificaciones de calidad a la primera y supone por tanto un tipo de pérdida de calidad (al igual que ocurría con el scrap).

3.2.3. Objetivo del OEE

Medir el OEE es una herramienta simple pero poderosa con la que podemos obtener una valiosa información sobre lo que está ocurriendo en la actualidad. Además, ayuda a los operarios, ya que al reflejar en un documento la evolución de las pérdidas de la máquina, promueve las acciones hacia su eliminación. (González, 2009)

González (2009) señala que el cálculo del OEE genera información diaria sobre el nivel de efectividad de una máquina o conjunto de máquinas. Además, identifica en cuál o cuáles de las "Seis Grandes Pérdidas" se debe de centrar el análisis y solución en orden de prioridad. Sin embargo, no es sólo un indicador con el que medir el rendimiento de un sistema productivo, sino que es un instrumento importante para realizar mejoras específicas una vez que ya hemos priorizado las pérdidas.

3.2.4. Fórmula y cálculo del OEE

Elementos que conforman la fórmula del OEE:

OEE = Ratio de Disponibilidad (%) x Ratio de Rendimiento (%) x Ratio de Calidad (%)

$$\textbf{OEE (Cálculo)} = \frac{\text{Tiempo de Funcionamiento}}{\text{Tiempo Programado de Producción}} \times \frac{\text{Unidades producidas}}{\text{Unidades que teóricamente deberíamos haber producido}} \times \frac{\text{Unidades buenas}}{\text{Unidades producidas}}$$

$$\frac{\text{Tiempo Programado de Producción} - (\text{averías} + \text{esperas} + \text{restricción línea})}{\text{Tiempo Programado de Producción}} \qquad \frac{\text{Unidades producidas} - (\text{scrap} + \text{retrabajos})}{\text{Unidades producidas}}$$

El ratio de disponibilidad refleja el tiempo durante el cual la máquina está fabricando productos, comparado con el tiempo que podría haber estado fabricando productos. Un ratio de disponibilidad menos de un 100% indica que tenemos pérdidas de tiempo: averías, esperas y restricciones de línea.

El ratio de rendimiento refleja qué ha producido la máquina, comparado con lo que teóricamente podría haber producido (es decir, la producción que deberíamos obtener si la máquina funcionase a la velocidad máxima teórica durante el tiempo de funcionamiento actual). Un ratio de rendimiento menor de una 100% indica que tenemos pérdidas de velocidad: microparadas y velocidad reducida.

El ratio de calidad refleja los productos buenos que hemos obtenido, comparado con el total de productos que hemos fabricado. Un ratio de calidad menor de un 100% indica que tenemos pérdidas de calidad: scrap (deshecho) y retrabajos, así como pérdidas en el arranque de máquina.

Si no hay pérdidas el OEE sería del 100% (la máquina ideal). (González, 2009)

3.2.5. CASO DE ESTUDIO: Sistema de Monitoreo del OEE para mejorar el Desempeño Ambiental de Operaciones de Construcción

Las operaciones de construcción generan emisiones significativas de contaminantes del aire, incluidas las emisiones de carbono y otras emisiones de gases de escape como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), los hidrocarburos (HC) y las partículas (EPA 2008). La gestión del desempeño ambiental es, por tanto, uno de los objetivos clave de los proyectos de construcción, junto con la gestión del costo, el tiempo y la calidad. El desempeño ambiental de las operaciones de construcción está estrechamente relacionado con la eficiencia operativa (OEE) de cada recurso empleado, lo que indica el uso eficiente del equipo durante el proceso (Ahn y Lee 2011). Por lo tanto, monitorear y mejorar el OEE ofrece oportunidades para mejorar el desempeño ambiental. (Ahn, Lee, & Peña-Mora, 2012)

Sin embargo, Ahn *et al.* (2012), entre otros, señalan que los esfuerzos para mejorar el desempeño ambiental son limitados debido a la falta de un método práctico para monitorear el OEE de los equipos de construcción y el desempeño ambiental relacionado. Los métodos actualmente disponibles son costosos o tienen problemas de compatibilidad. En este contexto, este trabajo pretende desarrollar un sistema de monitoreo que asegure la viabilidad económica y la compatibilidad, y que utilice el análisis de señales de vibración. En primer lugar, se analiza la relación entre el OEE y el desempeño ambiental. A continuación, el documento presenta un método para utilizar el análisis de señales de vibración para supervisar el estado operativo del equipo. Por último, un estudio de caso de una excavadora demuestra la viabilidad del método presentado en una operación del mundo real.

3.2.5.1. Análisis de Señales de Vibración

El análisis de señales de vibración de vehículos ha sido ampliamente conducido con el objetivo de controlar un vehículo y mejorar la comodidad de los pasajeros. (Liu & Huston, 2011). Los motores de combustión interna (IC) de los vehículos generan, naturalmente, altos niveles de energía vibratoria durante su funcionamiento, lo que provoca efectos indeseables a través de perturbaciones acústicas y puede conducir eventualmente a fallas mecánicas debido a la fatiga. Sin embargo, una cierta cantidad de energía vibratoria es inevitable y, por lo tanto, se puede usar para monitorear las condiciones del motor (por ejemplo, mal funcionamiento) (Geng, Chen, & Hull, 2003). La idea subyacente básica de tales aplicaciones es que cada componente móvil o proceso físico implicado en el funcionamiento de un motor produce su propia señal de vibración única, que se conoce como la firma de vibración (Antoni, Daniere, & Guillet, 2002).

Esta idea también motiva la medición y el análisis de la vibración para monitorear el OEE de los equipos de construcción. Si bien la monitorización de la condición de los motores IC mediante el análisis de la señal de vibración sigue siendo difícil debido a la complejidad de las señales de vibración (Antoni *et al.,* 2002), la detección de modos de actividad de los equipos (por ejemplo, apagado del motor, ocio, trabajo) es una aplicación más sencilla. Esto se debe a que diferentes modos de actividad presentan una clara diferencia en las firmas de vibración, mientras que la supervisión de la condición de los motores IC (por ejemplo, fallo del motor) se basa en una diferencia más sutil. El resto de este artículo presenta el experimento para medir y analizar las vibraciones de los equipos de construcción, con el fin de evaluar la viabilidad del análisis de vibraciones como monitor de OEE.

3.2.5.2. Medición de Vibraciones en una maquinaria de construcción

Las condiciones del experimento son las siguientes:

- Se eligió una excavadora de tamaño mediano (CAT 321C LCR).
- Un acelerómetro de 3 ejes (± 2g de salida digital) fue montado dentro de la cabina.
- La frecuencia de muestreo se ajustó a 100Hz.
- La operación del equipo durante el experimento fue filmada.

La Figura 3.9. muestra las señales de vibración capturadas por el acelerómetro montado de 3 ejes.

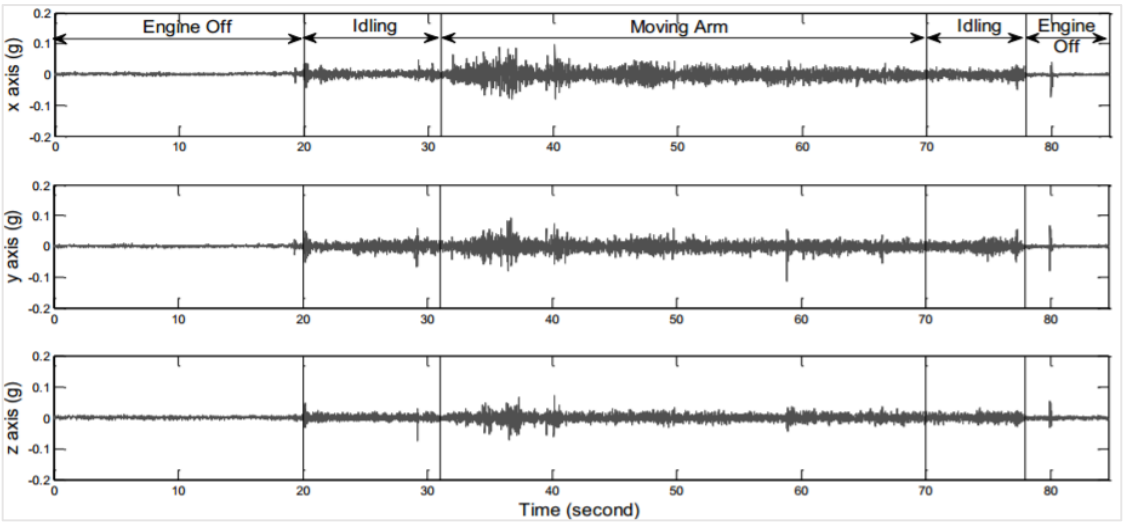


Figura 3.9. Señal de vibración en los ejes x,y,z. (Ahn, Lee, & Peña-Mora, 2012)

Los intervalos de tiempo de ocio entre la duración total de la operación del excavador se determinan basándose en el umbral de la energía de señal. Estos cuadros están marcados como barras de color gris oscuro en la Figura 3.10. A continuación, esos intervalos de tiempo se comparan con una observación manual basada en un registro de vídeo. La observación determina un período de tiempo como ocio cuando la excavadora no se mueve durante al menos tres segundos consecutivos. Estos marcos se especifican como cuadros de puntos en la figura.

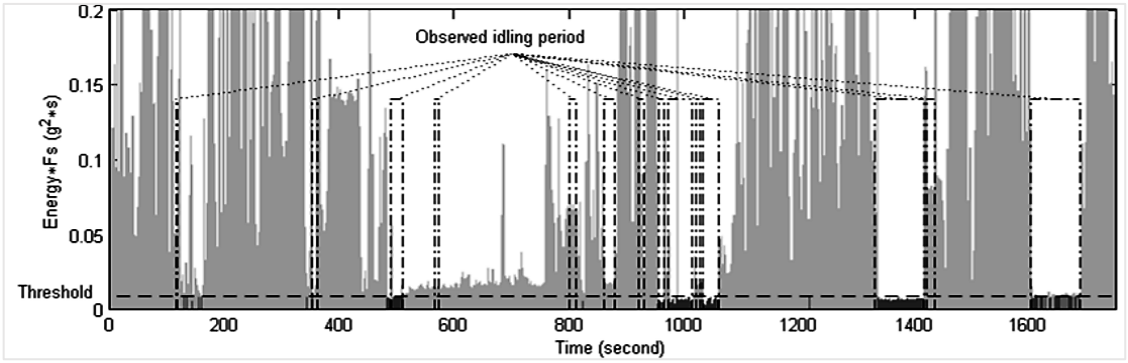


Figura 3.10. Comparación de los períodos de ocio entre la observación (cuadro de puntos) y el análisis energético de las señales de vibración (barras grises oscuro). (Ahn, Lee, & Peña-Mora, 2012)

3.2.5.3. Análisis de Señales de Vibración

La dirección futura de esta investigación, indica Ahn *et al.* (2012), es desarrollar más el algoritmo que asegura una clasificación exacta y automatizada, basada en el aprendizaje de la máquina y teorías del proceso de la señal. Además, la investigación futura pondrá a prueba la viabilidad del enfoque propuesto en diversos tipos de equipos de construcción y explorará también el desarrollo de una red de sensores inalámbricos para la construcción de un sistema de monitoreo integral.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS

4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la construcción presenta un bajo nivel de productividad y es importante destacar que, a pesar de las mediciones realizadas por el CDT, se desconoce la magnitud y detalle del problema, debido a que no hay mediciones confiables, tanto a nivel de tarea, proyecto y sector, a diferencias de otras industrias. Es un desafío pendiente (CDT, 2013). Estas mediciones se han realizado en obras reales, limitando el poder experimentar a cabalidad con el sistema, ya que construir y hacer cambios puede ser muy costoso, peligroso o simplemente imposible.

La visualización de la información se ha convertido en un elemento central del proceso de construcción general, pero la mayoría de las veces no es la indicada para determinar las causas de las pérdidas productivas o simplemente no se mide. En este contexto, el indicador OEE facilitaría la gestión, permitiendo eliminar las pérdidas productivas en tiempo real.

Hoy en día, existen herramientas de simulación que se han desarrollado de tal forma que se han vuelto más flexibles y detalladas, pero se han limitado a ser utilizadas en otras industrias, como la manufacturera.

Es mejor construir un modelo que simule el sistema real, en el cual se incluya los detalles importantes. Luego, es posible comenzar a explorar y entender la estructura y comportamiento del sistema original, analizar cómo se comportaría bajo ciertas condiciones, comparar diferentes escenarios, optimizar. Y así, al encontrar la solución que se necesita, poder aplicarla en el mundo real.

En Chile, al ser los edificios principalmente de hormigón armado, se ha logrado estandarizar la forma en que estos se construyen, existiendo metodologías y procesos bien definidos que permiten optimizar todas las variables involucradas en su proceso de construcción. En términos generales, la construcción de un edificio se puede dividir en tres grandes etapas: la de obra gruesa, la de terminaciones y la de instalaciones. Una de las etapas más críticas para la producción, es la Obra Gruesa, por los costes y el impacto en la planificación del proyecto. Además, desde el punto de vista de la simulación, posee un alto grado de dinamismo y variabilidad.

Por lo tanto, el problema específico es entender las verdaderas causas de las pérdidas productivas de la etapa de Obra Gruesa y encontrar la forma de eliminarlas. Apoyándose tanto en la filosofía TPM, para incluir las pérdidas de Desempeño, Rendimiento y Calidad; como en las herramientas de simulación, para transferir el comportamiento del sistema real al modelo. De esta forma, es posible desempeñar experimentos en orden de verificar las hipótesis, lo que permitirá finalmente, diseñar, desarrollar, validar y probar una nueva herramienta de gestión, planificación y soporte a la toma de decisiones.

4.2. HIPÓTESIS

Basado en la revisión de la literatura y el planteamiento del problema, se han formulado las siguientes hipótesis:

1. Es posible simular de forma efectiva los procesos de la etapa de Obra Gruesa incluyendo sus tres grandes pérdidas: (1) Desempeño (2) Rendimiento y (3) Calidad.
2. Un análisis de posibles escenarios permitirá identificar las variables más críticas de causa y efecto de pérdidas en la etapa de Obra Gruesa.

5. METODOLOGÍA

A continuación, se presentan el conjunto de etapas correspondientes a un proyecto de simulación. Si bien las etapas siguen un proceso secuencial, en el que una etapa no comienza hasta que la anterior no ha finalizado, es posible que ciertas etapas, como la de verificación y validación obliguen a retroceder a etapas anteriores con el objetivo de modificar aspectos conceptuales del modelo. La secuencia lógica que sigue la metodología aplicada a esta memoria se obtiene del siguiente diagrama de flujo:

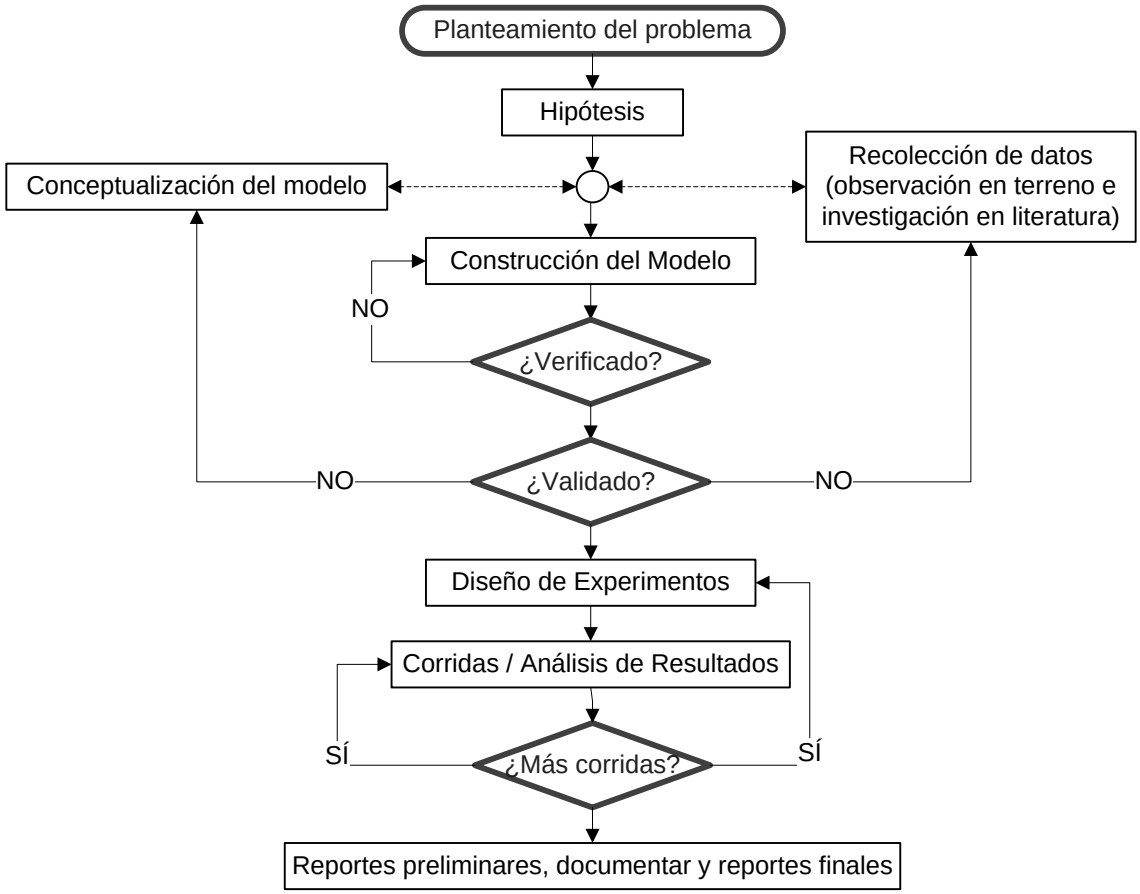


Figura 5.1. Secuencia lógica de la Metodología de un proyecto de Simulación (Allende, 2000)

En la etapa de conceptualización del modelo, se escogió la forma de representar el sistema en estudio mediante los paradigmas de simulación disponibles hoy en día: Eventos Discretos, Sistemas Dinámicos y/o Modelado Basado en Agentes. Se establecieron las simplificaciones que pudieron hacerse según los objetivos del modelo, como también se definieron los componentes que constituirán el modelo, individualizando las interacciones que existen entre ellos. También se identifican los datos requeridos por el modelo y se escoge el software de simulación a emplear.

En la etapa de construcción del modelo se generó el programa computacional de acuerdo a como fue concebido el modelo en la etapa anterior. Esta etapa consistió de tres actividades: el desarrollo del modelo, la recolección de datos y la definición de las experimentaciones.

En la primera actividad se construyó el modelo en los paradigmas de simulación escogidos, que contiene los elementos estructurales propios de los paradigmas y los procesos que existen en el sistema. En la segunda actividad se obtuvieron los datos de todas aquellas variables que definen las condiciones de entrada del modelo. Se debió disponer de los datos que describen el sistema, que representen su comportamiento y su eficiencia actual. Los datos que describen el sistema son aquellos que están vinculados con la estructura del sistema, con los componentes individuales, con la interacción entre ellos, y con las operaciones que se realizan en el sistema. Con esta información se generó la descripción de los estados del sistema. En la actividad de experimentación se describieron las variables que se modificaron en cada corrida de simulación y así se analizó cada una de estas situaciones. Se usó el término de escenario para referirse a una combinación particular de datos de la simulación.

La simulación del modelo está muy relacionada con la etapa anterior, construcción del modelo, ya que se requirió que el modelo se haya completado para obtener los indicadores que orientaron a la comprensión del funcionamiento del sistema en estudio. A la luz de los resultados que se obtuvieron, fue necesaria una verificación del cálculo de los indicadores, se comprobó la validez que tienen estos resultados obtenidos con el modelo, y luego se probaron distintas alternativas de funcionamiento. En resumen, se realizaron tres acciones: verificación, validación y simulación de interacciones del modelo.

La etapa de diseño de experimentos y análisis fue de uso intensivo en métodos estadísticos para probar las hipótesis que se plantean para resolver el problema formulado, ingresando al simulador la configuración del sistema con las que se deseó evaluar su funcionamiento hipotético.

6. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO

Una vez definidos correctamente los objetivos del proyecto y previamente a iniciar la construcción del modelo de simulación es importante formular el modelo de simulación de la etapa de Obra Gruesa empleando un nivel de abstracción elevado, con el objetivo de conseguir un modelo conceptual del sistema. Este debe especificar las relaciones estructurales más importantes que se den en el sistema. En esta etapa también, se identifican y especifican los resultados que se esperan obtener del modelo, dando respuesta a los objetivos planteados en el planteamiento del problema.

6.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA

La etapa de obra gruesa contempla los procesos de enfierradura, moldaje y hormigonado. Como se muestra en la Figura 6.1, estos ocurren de forma secuencial y cíclica, ya que el avance de uno, permite el inicio del siguiente.

En cada proceso, participan sus respectivas cuadrillas de mano de obra encargadas de agregar valor a los insumos para transformarlos finalmente en el sistema portante de la estructura en construcción. Además, incluye la grúa como maquinaria encargada de transportar y acercar los insumos de enfierradura y moldaje a las zonas de acopio para ser utilizados por las cuadrillas.

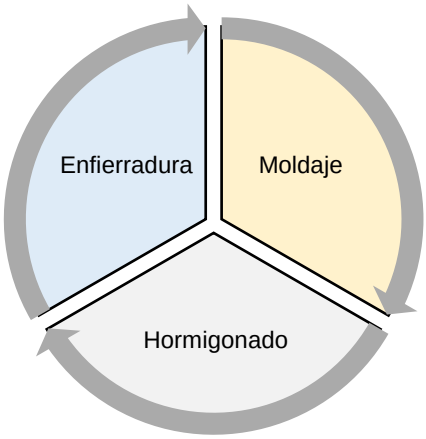


Figura 6.1. Secuencia de las partidas de la etapa de obra gruesa

6.1.1. Procesos de la etapa de obra gruesa

Un levantamiento de la secuencia de los procesos de la etapa de obra gruesa es requerido para construir el modelo y así integrarlo al lenguaje de simulación a utilizar posteriormente. El siguiente diagrama de flujo funcional describe la secuencia lógica mencionada.

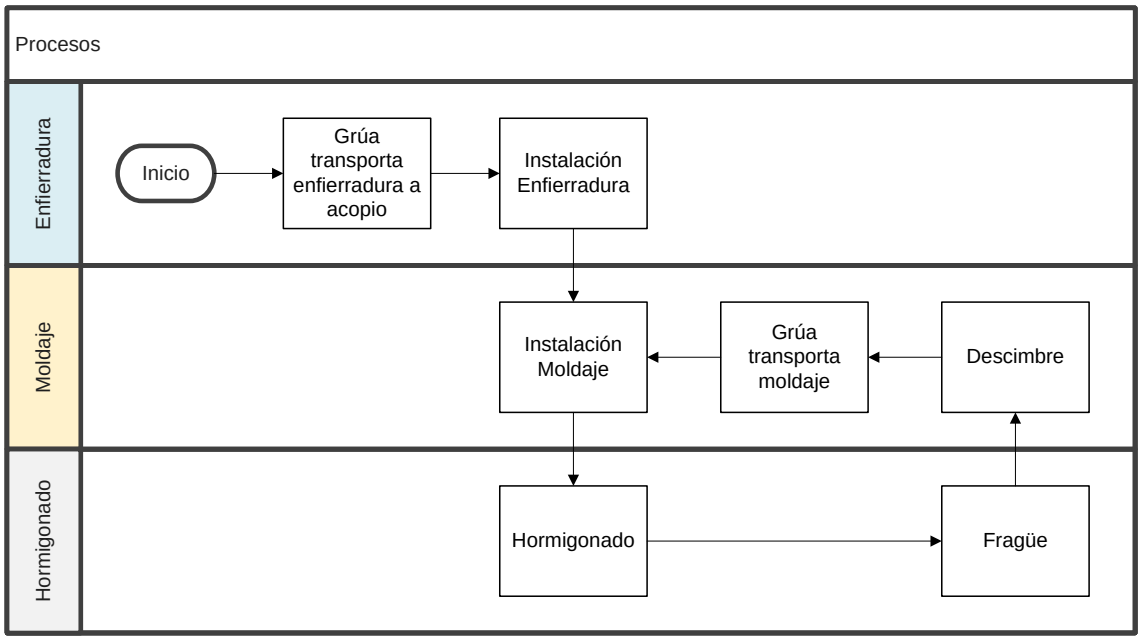


Figura 6.2. Secuencia de la etapa de obra gruesa de una obra tipo

Es importante destacar que, al truncar los límites de los procesos, se ha efectuado la primera simplificación del modelo. Esta simplificación es necesaria para cumplir los objetivos de la simulación. Ya que, de no ser así, se debería considerar hasta la logística de cada uno de los insumos de los procesos, escapándose de los alcances de esta memoria.

6.1.2. Comportamiento de las cuadrillas y la grúa

Tanto las cuadrillas como la grúa pueden considerarse como entidades que toman decisiones de forma autónoma, teniendo como base un conjunto de reglas. Como ayuda para comprender el comportamiento de estas entidades, se decide desarrollar un modelo conceptual mediante diagramas de flujo.

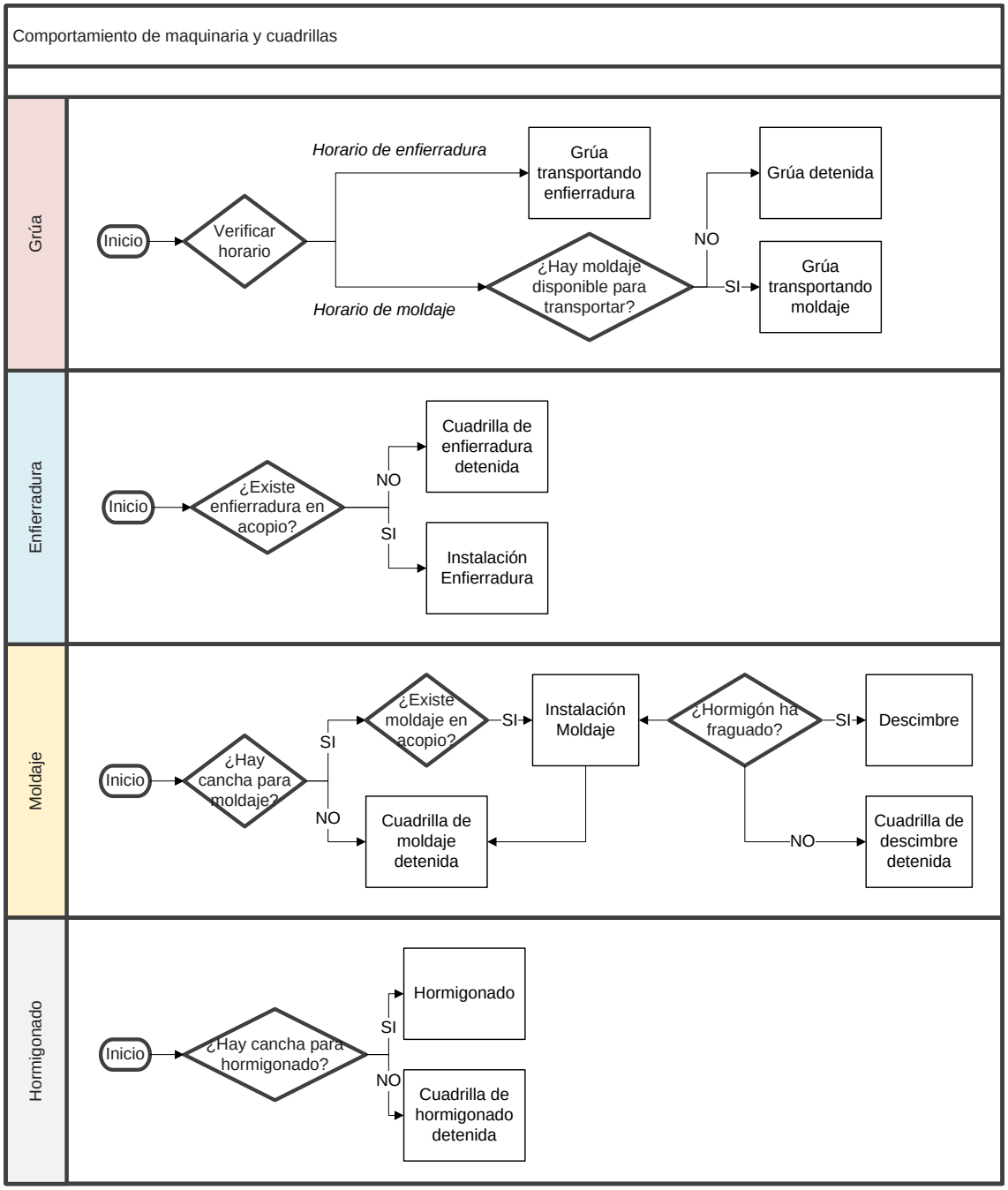


Figura 6.3. Diagrama de flujo del comportamiento de la grúa y de las cuadrillas de enfierradura, moldaje y hormigonado.

Las cuadrillas de mano de obra de enfierradura, moldaje y hormigonado, interactúan en sus respectivos procesos permitiendo que funcionen a una determinada velocidad. Por otro lado, la grúa pluma interactúa en los procesos de enfierradura y moldaje, abasteciéndolos de sus insumos.

6.2. SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

Para llevar a cabo el modelado de la Obra Gruesa, se decide emplear el software Anylogic, porque es utilizado con éxito en complejos sistemas en otras áreas de la industria, como: cadena de suministro, logística, manufactura, procesos de negocio, etc. Además, es un software libre para estudiantes y utiliza los tres enfoques de modelos complejos de hoy en día: Sistemas Dinámicos, Eventos Discretos y Modelado Basado en Agentes; permitiendo la simulación multiparadigma, es decir, permite combinar cualquiera de estos métodos.

6.3. ENFOQUES DE SIMULACIÓN ESCOGIDOS

Después de conocer las características del sistema, se escogen los enfoques de simulación que representen de mejor manera cada componente.

Los procesos de la etapa de la obra gruesa son adaptables a la Simulación Dinámica por tener las siguientes características: (1) Son dinámicos y su comportamiento varía a través del tiempo (2) Hay interactividad entre sus procesos, lo que muestra contacto entre sus partes, entidades o agentes (3) Poseen un grado de complejidad, debido a que las operaciones dentro de esta etapa son el resultado de un gran número de variables que poseen un fuerte vínculo.

Las entidades como la grúa y las cuadrillas de mano de obra se representan como Agentes por los siguientes motivos: (1) Tienen un comportamiento propio (2) Interactúan con los procesos modificando sus propiedades.

De este modo, la simulación resulta en un modelo multiparadigma, ya que se utiliza más de un enfoque de modelado: Sistemas Dinámicos y Modelado Basado en Agentes.

7. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Esta etapa corresponde a la generación del programa computacional que representará el sistema, de acuerdo a como se ha concebido el modelo en la etapa anterior. Consiste en dos actividades: el desarrollo del modelo y la recolección de datos. En la primera actividad se construye el modelo en lenguaje del programa Anylogic, el que contiene los elementos estructurales propios del lenguaje y los procesos que existen en el sistema. En la actividad de recolección de datos, se obtiene la información del sistema real necesaria para describir las variables de la simulación.

7.1. DESARROLLO DEL MODELO

En esta primera actividad se construyó el modelo según los enfoques de simulación escogidos anteriormente, que contiene los elementos estructurales propios de los paradigmas y los procesos que existen en el sistema, usando como guía los diagramas de flujo creados en la etapa de conceptualización.

En primer lugar, se modela cada partida de la etapa de obra gruesa utilizando diagramas Forrester, que es el diagrama característico de la Dinámica de Sistemas. Es una traducción del diagrama causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad.

Luego, se traspasa al programa, el modelo conceptual del comportamiento de las cuadrillas y maquinarias, identificadas como Agentes en la etapa anterior. Para ello, se utilizan los diagramas de estado, que son el lenguaje utilizado en el Modelado Basado en Agentes. Son gráficos de estados y transiciones que describen la respuesta de un agente en consecuencia de la recepción de un estímulo externo. Al modelar el comportamiento, se reflejan en el sistema las pérdidas de disponibilidad y rendimiento.

Finalmente, se modelan las pérdidas de calidad del sistema, que están intrínsecas en el comportamiento de cada Agente y que se ven reflejadas en los diagramas Forrester, como la producción de unidades defectuosas que conllevan a desechos o retrabajos.

7.1.1. Modelando la partida de Enfierradura

A continuación, se explica el desarrollo del modelado de la partida de enfierradura, efectuado en el software Anylogic.

7.1.1.1. Diagrama Forrester de la partida de Enfierradura

En esta partida el insumo es la enfierradura que pasa por dos transformaciones principales: (1) Enfierradura apilada en la zona de acopio (2) Enfierradura instalada y armada. El diagrama de Forrester creado en de esta partida y sus elementos se explican en la Figura 7.1. La cantidad se representa en [kg] de enfierradura; y el rendimiento en [kg/min].

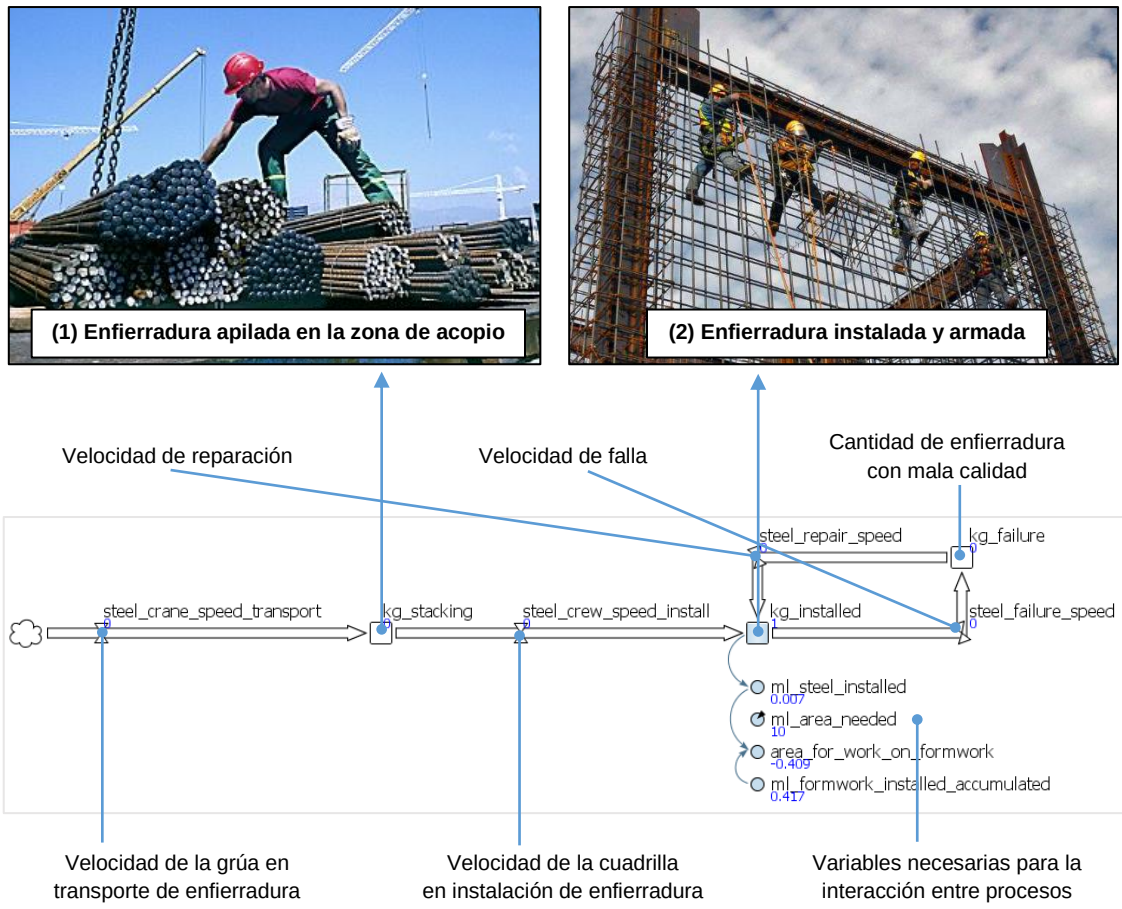


Figura 7.1. Diagrama Forrester del proceso de enfierradura y sus elementos. (en Anylogic)

Las pérdidas por calidad para la partida de enfierradura, ocurren cuando la disposición de fierros instalada es distinta a la especificada en planos. Esta inconsistencia se detecta luego de una inspección e implica rehacer el trabajo, por lo que al proceso se le incorpora la actividad de reparación.

7.1.1.2. Diagrama de estado de la cuadrilla de Enfierradura

Esta cuadrilla se encuentra en el estado "trabajando" si se cumplen todas las siguientes condiciones: (1) Se está en horario de trabajo (2) Existe disponibilidad de material. Si solo una condición no se cumple, la cuadrilla pasará al estado "desocupado". Este comportamiento se indica en el diagrama de estado de la Figura 7.2. Además, se puede notar que la cuadrilla de enfierradura contiene dos estados relacionados con la calidad, uno que corresponde a la falla de calidad, y el otro, al momento de reparar o rehacer el trabajo.

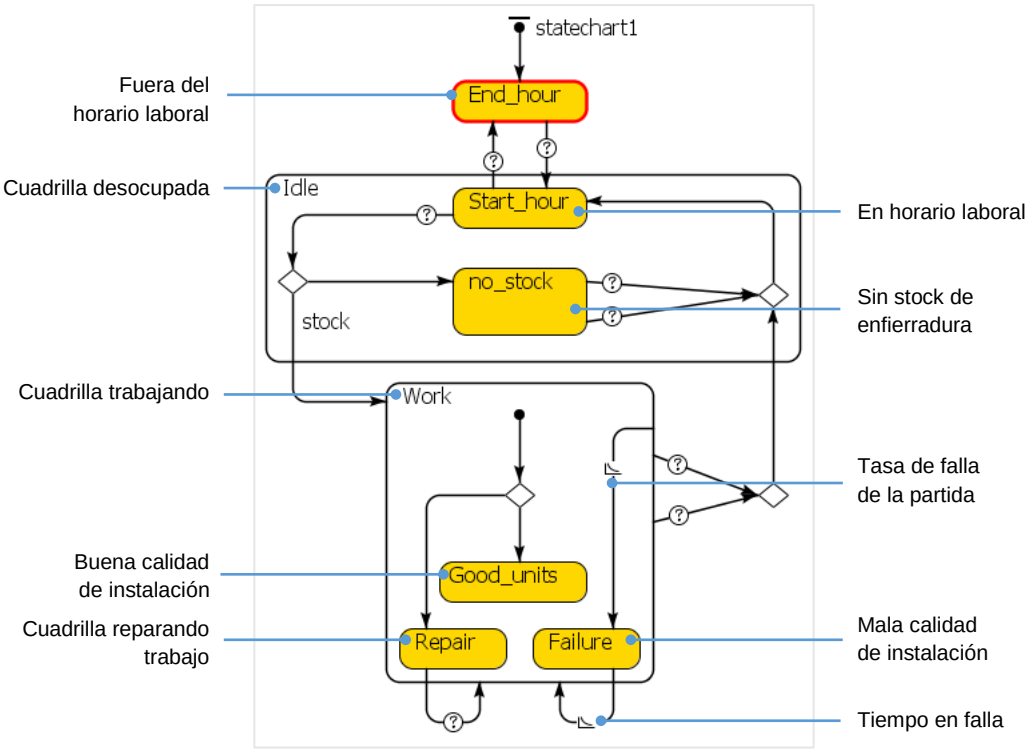


Figura 7.2. Diagrama de estado de la cuadrilla de enfierradura. (en Anylogic)

7.1.2. Modelando la partida de Moldaje

A continuación, se explica el desarrollo del modelado de la partida de moldaje, efectuado en el software Anylogic.

7.1.2.1. Diagrama Forrester de la partida de Moldaje

En esta partida, el insumo es el moldaje, cuyas transformaciones principales son: (1) Moldaje apilado en la zona de acopio (2) Instalación y (3) Descimbre. El diagrama de Forrester creado en de esta partida y sus elementos se explican en la Figura 7.3. Las unidades de cantidad y rendimiento se representan en [m2] y [m2/min] de moldaje respectivamente.

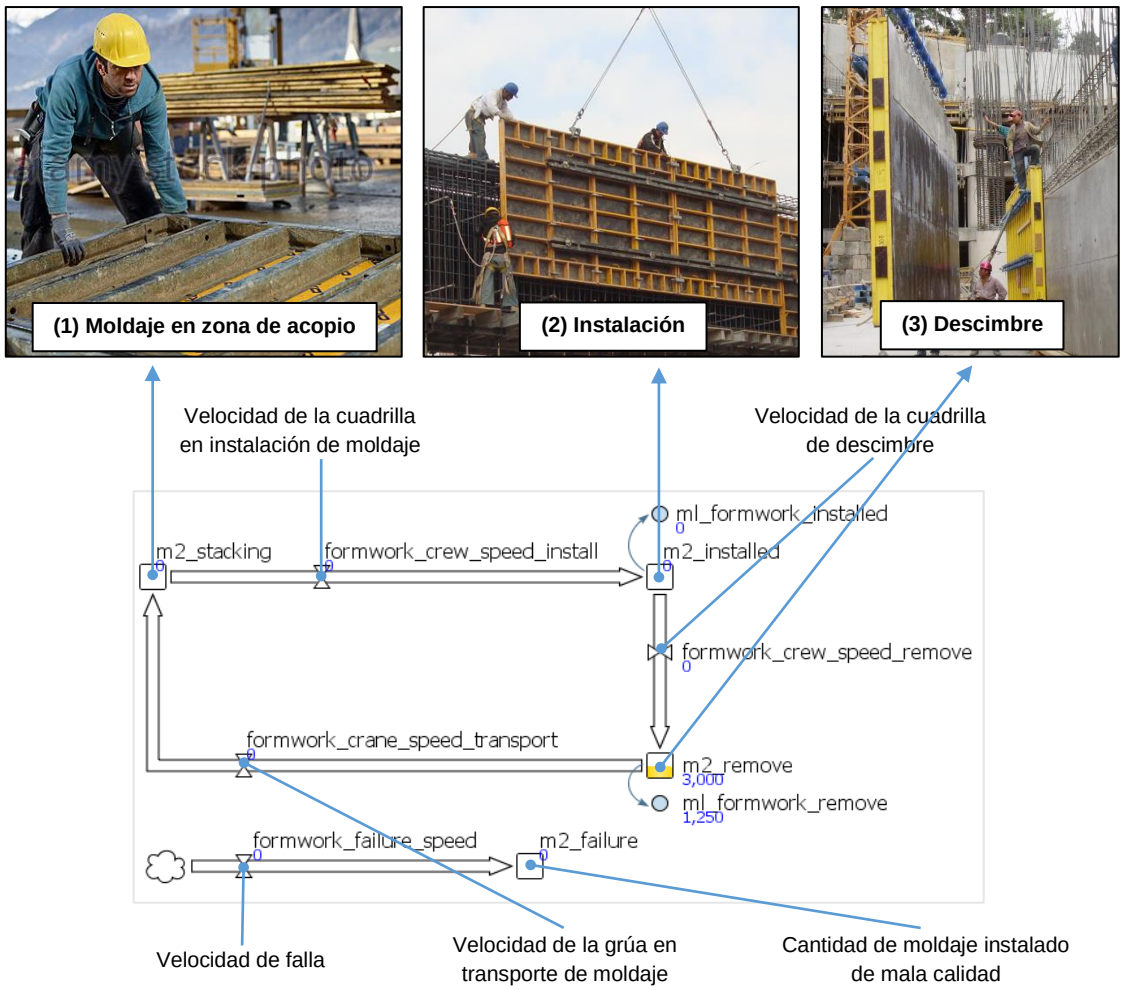


Figura 7.3. Diagrama Forrester de la partida de moldaje y sus elementos. (en Anylogic)

Es importante destacar la naturaleza cíclica de este proceso, ya que el moldaje es un insumo limitado, que debe ser reutilizado en obra.

Por otro lado, una pérdida de calidad en la partida de moldaje, sucede cuando existe una incorrecta instalación del moldaje que puede implicar una baja calidad en las terminaciones superficiales del hormigón, necesitando ser reparadas posteriormente, en la etapa de terminaciones. Por lo tanto, al proceso sólo se le incorpora la posibilidad de falla en la instalación del moldaje y no la reparación, ya que esta se efectúa en la etapa de terminaciones, quedando fuera de los alcances de la etapa de obra gruesa y del sistema. Este comportamiento se indica en el diagrama de estado de la Figura 7.4.

7.1.2.2. Diagrama de estado de la cuadrilla de Instalación de Moldaje

Las condiciones necesarias para que esta cuadrilla se encuentre en el estado "trabajando" son: (1) Se está en horario de instalación de moldaje (2) Existe disponibilidad de moldaje (3) Existe disponibilidad de cancha para moldaje.

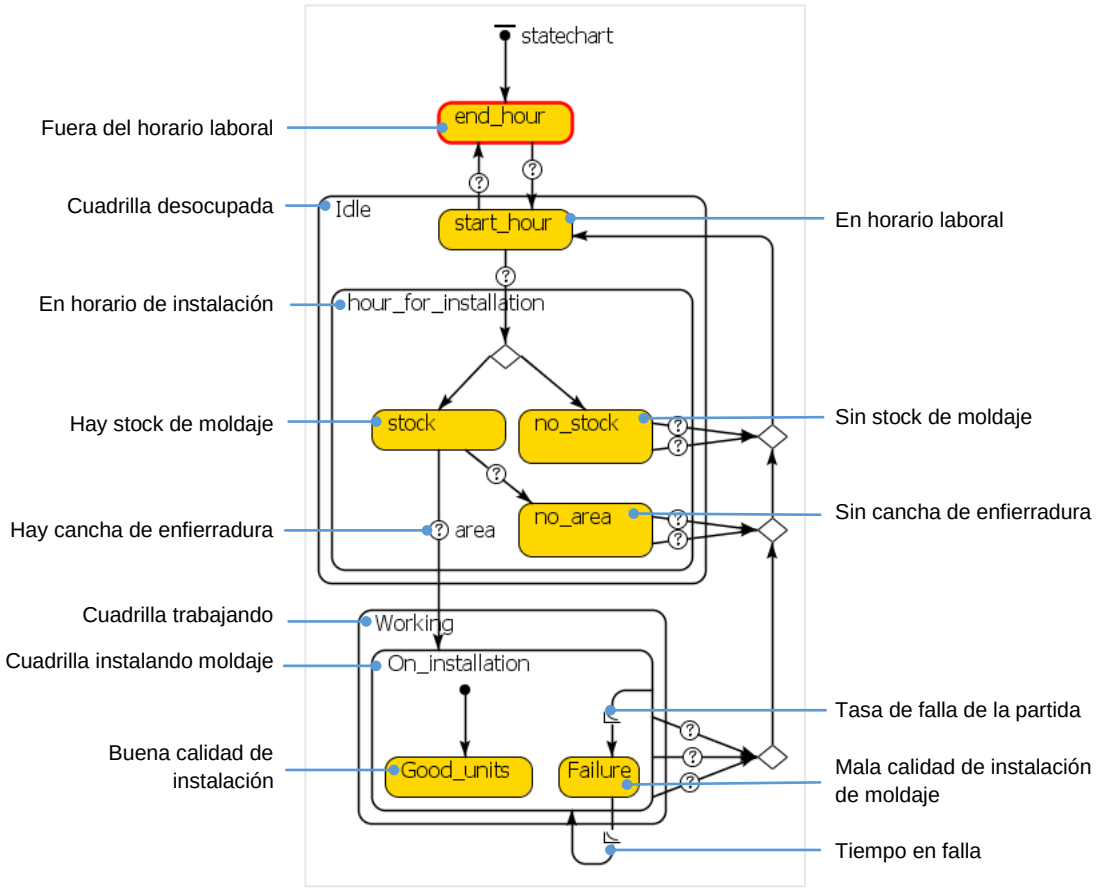


Figura 7.4. Diagrama de estado de la cuadrilla de instalación de moldaje. (en Anylogic)

7.1.2.3. Diagrama de estado de la cuadrilla de Descimbre de Moldaje

El comportamiento de esta cuadrilla se indica en el diagrama de estado de la Figura 7.5. Las condiciones necesarias para que esta cuadrilla se encuentre en el estado "trabajando" son: (1) Se está en el horario de descimbre (2) hormigón ha fraguado.

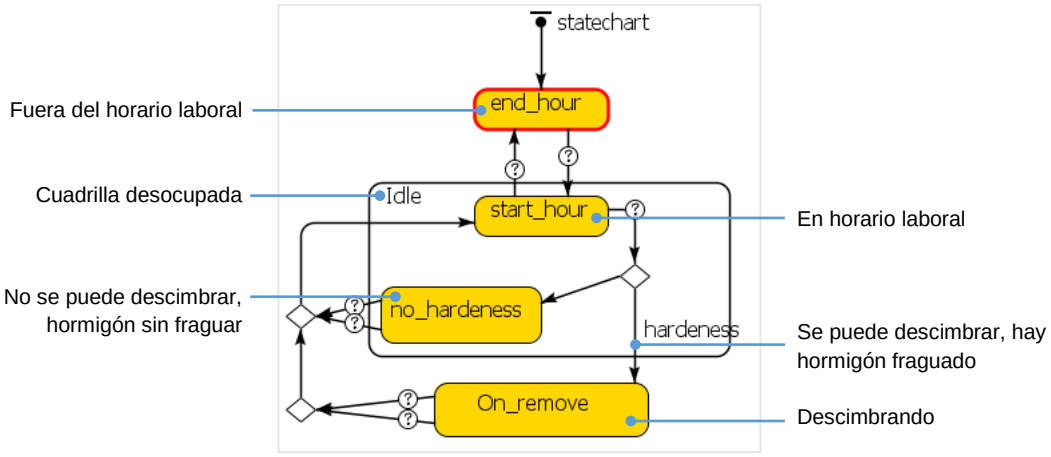


Figura 7.5. Diagrama de estado de la cuadrilla de descimbre de moldaje. (en Anylogic)

7.1.3. Modelando la partida de Hormigonado

A continuación, se explica el desarrollo del modelado de la partida de hormigonado, efectuado en el software Anylogic.

7.1.3.1. Diagrama Forrester de la partida de Hormigonado

En esta partida, el insumo es el hormigón que pasa por las transformaciones de (1) vaciado de hormigón (2) hormigón fraguado. El diagrama de Forrester creado en de esta partida y sus elementos se explican en la Figura 7.6. Las unidades de cantidad y rendimiento se representan en [m3] y [m3/min] de hormigón respectivamente.

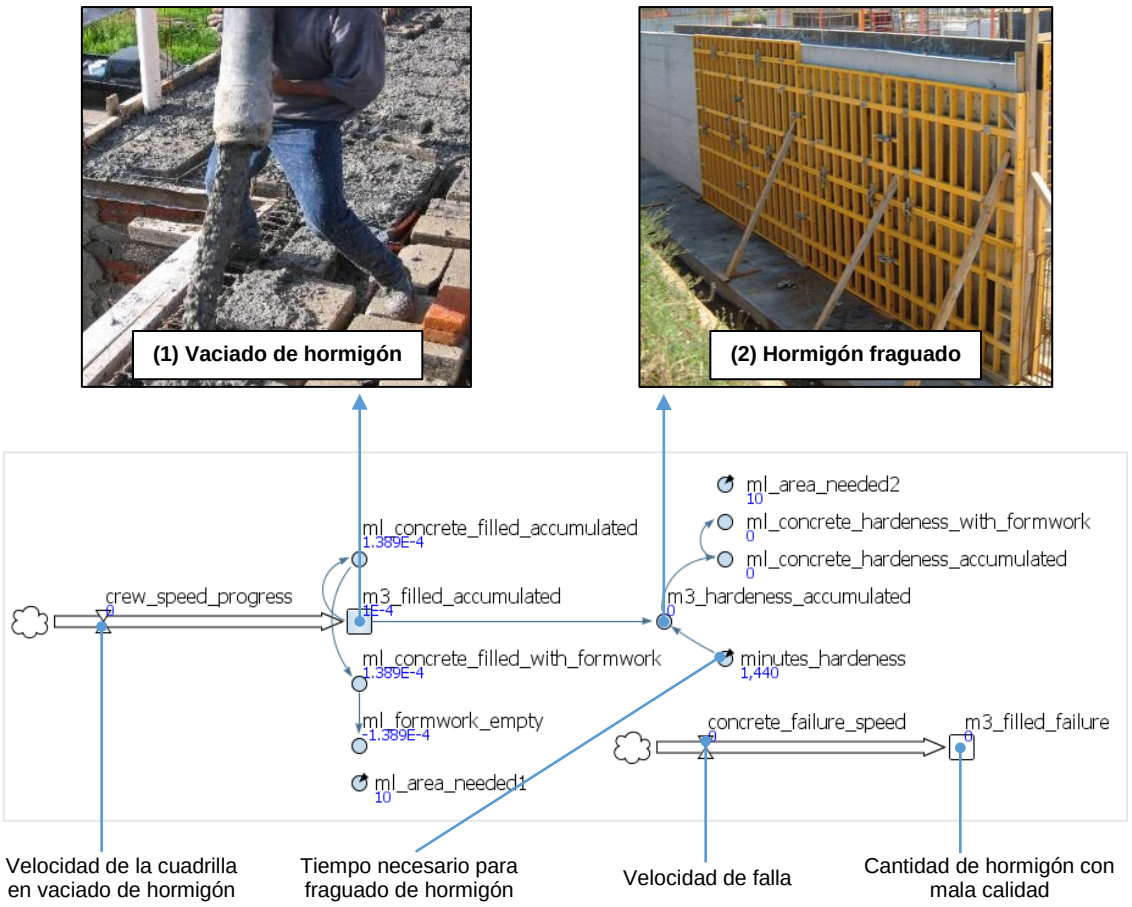


Figura 7.6. Diagrama Forrester de la partida de hormigonado. (en Anylogic)

El primer bloque se refiere a la cantidad de hormigón que se ha vaciado en los moldajes, cuyo flujo de entrada corresponde a la velocidad de vaciado que desempeña la cuadrilla. Luego se tiene una variable que indica el tiempo que demora en fraguar el hormigón y que modela el retardo necesario para indicar en el segundo bloque la cantidad de hormigón fraguado hasta el momento y que está listo para que el moldaje sea descimbrado.

7.1.3.2. Diagrama de estado de la cuadrilla de Hormigonado

La cuadrilla de hormigonado se encuentra en el estado "trabajando" si se cumplen las siguientes condiciones: (1) Se está en horario de trabajo (2) Existe disponibilidad de cancha para hormigonado. El comportamiento de esta cuadrilla se indica en el diagrama de estado de la Figura 7.7.

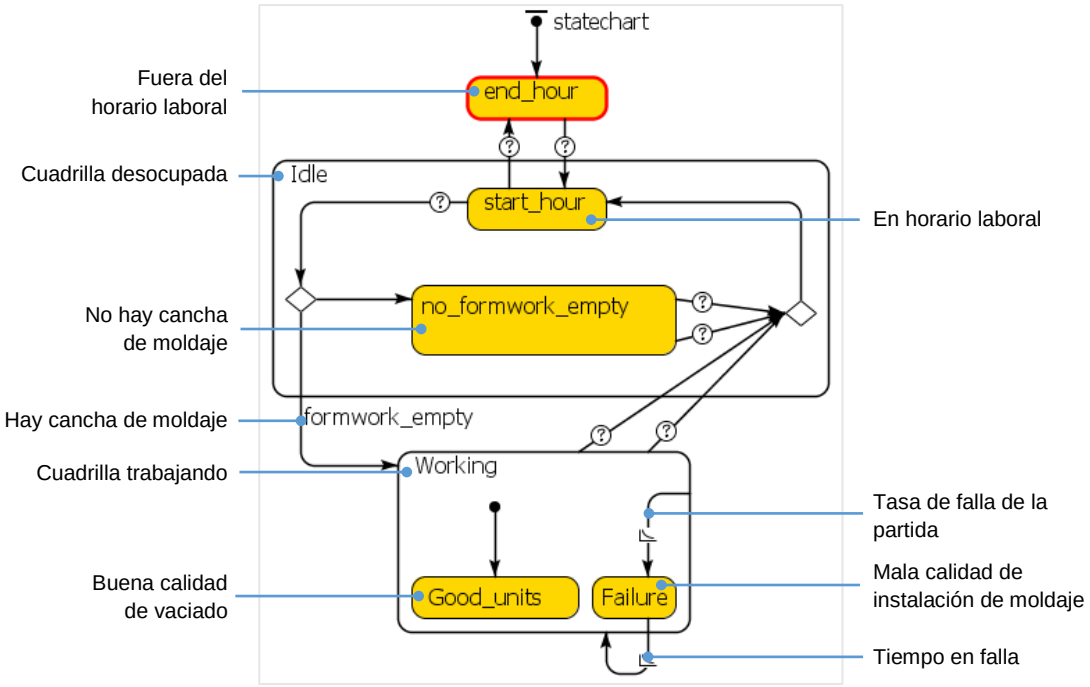


Figura 7.7. Diagrama de estado de la cuadrilla de hormigonado. (en Anylogic)

Una pérdida de calidad en esta partida puede ocurrir cuando el proceso se realiza con una mala calidad del insumo, es decir, con un hormigón que no cumple los estándares de calidad de resistencia, o que el vertido se ha efectuado tarde, por lo que el material no se encuentra en condiciones óptimas para ser utilizado. Otra situación que afecta la calidad del proceso, puede ser un mal vibrado.

7.1.4. Modelando la Grúa

Un caso interesante sucede con el modelado de la grúa. Como transporta los insumos de enfierradura y moldaje, interactúa con estos dos procesos, de modo que puede presentar más de un comportamiento, dependiendo de la metodología o forma de disponer la grúa para cada actividad. A continuación, se indican los diagramas de estado de los distintos comportamientos que puede presentar el agente grúa.

7.1.4.1. Diagrama de estado del 1º Comportamiento de la grúa

El primer comportamiento se muestra en la Figura 7.8, y se refiere a que la grúa transporta enfierradura y moldaje en horarios distintos. Es decir, se divide el horario de la grúa en dos, para que trabaje un tiempo transportando enfierradura y otro tiempo, transportando moldaje.

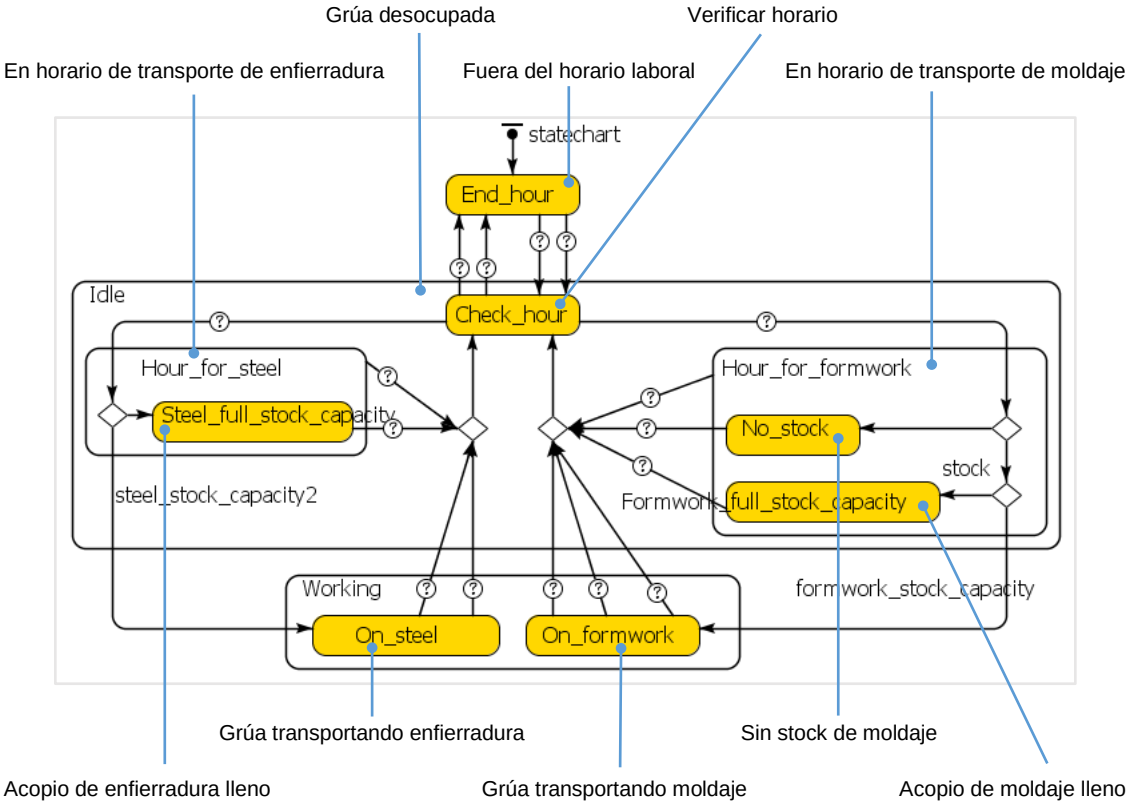


Figura 7.8. Diagrama de estado del primer comportamiento de la grúa. (en Anylogic)

La grúa se encuentra en el estado "transportando acero" cuando se cumplen las condiciones: (1) Se está en el horario de transporte de acero (2) No se ha sobrepasado la capacidad del acopio de enfierradura.

La grúa se encuentra en el estado "transportando moldaje" cuando se cumplen las condiciones: (1) Se está en el horario de transporte de moldaje (2) Existe disponibilidad de moldaje para transportar (3) No se ha sobrepasado la capacidad del acopio de moldaje.

7.1.4.2. Diagrama de estado del 2º Comportamiento de la grúa

Ahora no se divide el horario de trabajo de la grúa en dos, sino que trabaja transportando los insumos por prioridad. Es decir, como prioridad transporta enfierradura, y una vez que haya acabado de transportar la cantidad ideal, pasará a transportar moldaje. Este segundo comportamiento se indica en la Figura 7.9.

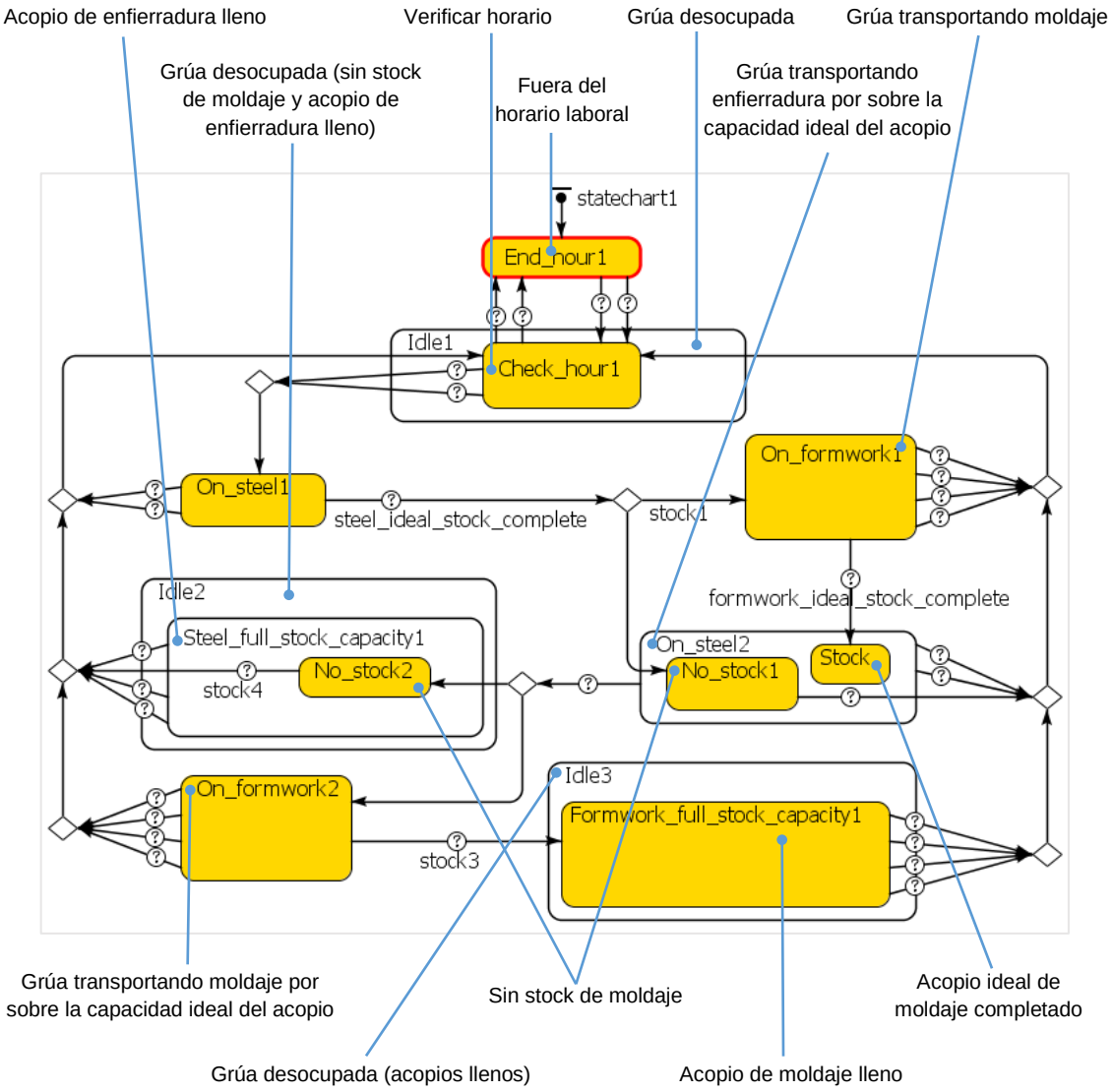


Figura 7.9. Diagrama de estado del segundo comportamiento de la grúa. Software Anylogic

En este caso, la grúa pasa por una secuencia de estados en cierto orden, manteniéndose en estos estados si se cumplen ciertas condiciones. La grúa comienza con el estado "transportando enfierradura" y se mantiene en este estado hasta que la capacidad de aquel acopio llega a un límite ideal. Luego pasa al estado "transportando moldaje", solo si hay disponibilidad de moldaje para transportar. Se mantiene en este estado hasta que la capacidad del acopio de moldaje llega a un límite ideal. Cuando se completan las capacidades ideales de cada acopio, tanto el de enfierradura como el de moldaje, la grúa sigue transportando enfierradura como prioridad, por sobre el límite ideal, hasta que el acopio llega a una capacidad límite máxima. Luego, si es que existe disponibilidad de moldaje, la grúa pasa al estado de transporte de moldaje hasta que el acopio llegue a una capacidad límite máxima.

7.1.4.3. Diagrama de estado del 3º Comportamiento de la grúa

Este es el caso contrario al anterior. La grúa ahora tiene como prioridad transportar moldaje, y una vez que haya acabado de transportar la cantidad ideal, pasará a transportar enfierradura. Este tercer y último comportamiento se indica en la Figura 7.10.

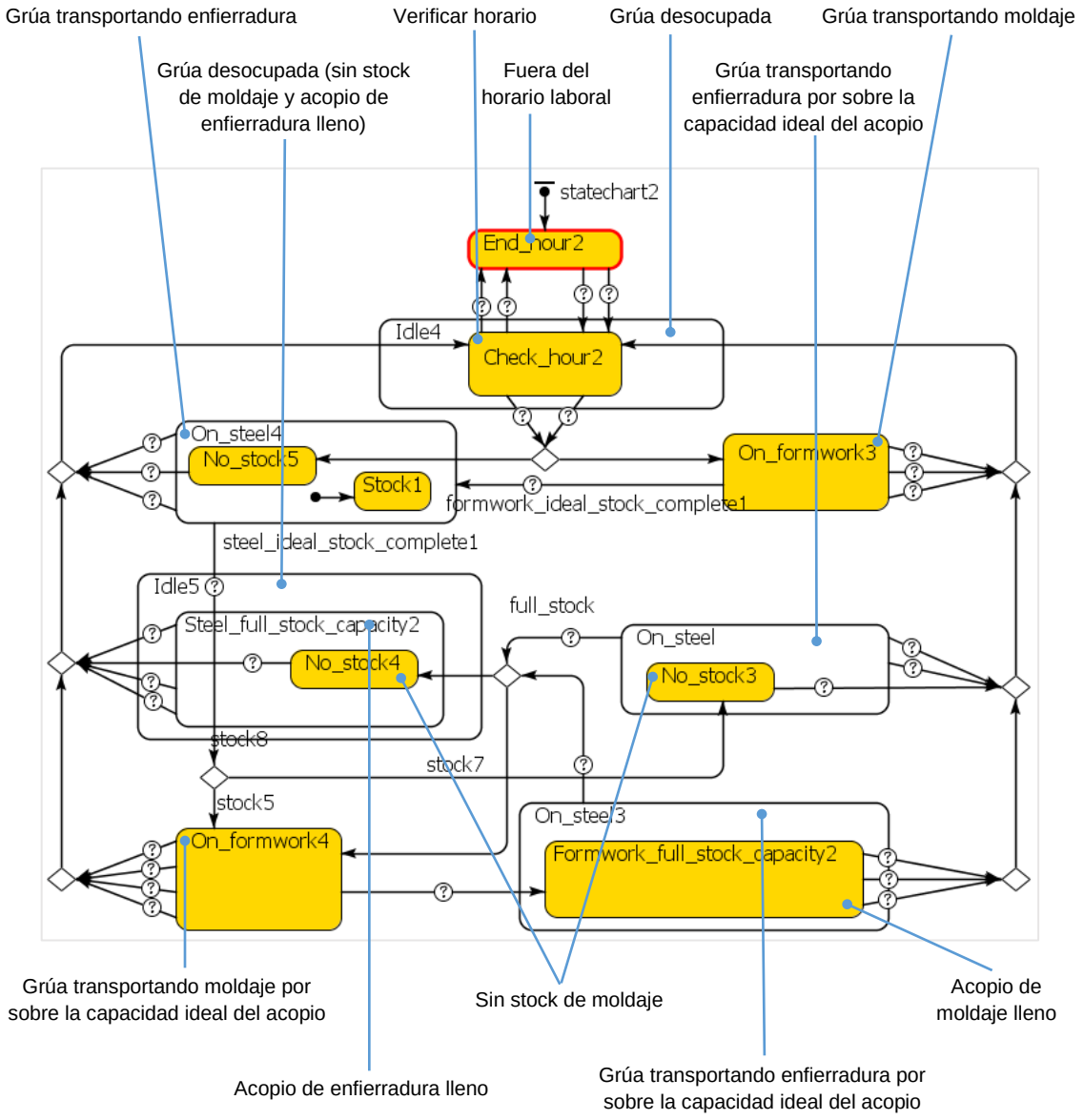


Figura 7.10. Diagrama de estado del tercer comportamiento de la grúa. (en Anylogic)

Es posible escoger entre los tres comportamientos al inicio de la simulación, para así analizar el impacto que tiene cada uno en el sistema.

7.2. RECOLECCIÓN DE DATOS

Se recogen los datos tanto de la literatura como en terreno, de todas aquellas variables que definen las condiciones de entrada del modelo, es decir, de los datos que describen el sistema y que representen su comportamiento.

Los datos corresponden a los rendimientos de las partidas de enfierradura, moldaje y hormigonado, en las cuales actúan sus respectivas cuadrillas y la grúa. También se incluyen los plazos de desencofrado y descimbre, necesarios para una correcta y continua operación del sistema. Se usa el término de escenario para referirse a una combinación particular de datos en una simulación.

Finalmente, se establece una tabla resumen de todos los valores escogidos como Valores Nominales, que son aquellos que definen un escenario "normal" y que servirán como base de comparación y experimentación con otros escenarios.

7.2.1. Rendimiento de las partidas

7.2.1.1. Enfierradura

La Tabla 7.1 muestra los valores de rendimientos alcanzados por cada grupo de instaladores de enfierradura de acuerdo a su dependencia laboral. Es posible notar que la especialización de los subcontratistas aumenta los rendimientos con que desarrollan sus faenas.

Tabla 7.1. Rendimiento cuadrilla enfierradura según dependencia laboral. (CDT, 2013)

Dependencia laboral	Rendimiento Real Promedio (Kg/HH)
Subcontratos	**34.18**
Empresa Principal	**28.70**
Total Instaladores	**33.10**

La Tabla 7.2 muestra los datos en cuanto a rendimiento real para cada uno de los grupos de instaladores de enfierradura. Se puede verificar que nuevamente el rendimiento es mayor al delegar la confección de enfierradura a talleres externos.

Tabla 7.2. Rendimiento cuadrilla enfierradura según tarea ejecutada. (CDT, 2013)

Tareas Ejecutadas	Rendimiento Real Promedio (Kg/HH)
Confección y colocación en obra	**31.59**
Solo colocación en obra	**34.70**
Total Instaladores	**33.10**

7.2.1.2. Moldaje

Los rendimientos de colocación de las distintas tipologías son los señalados en el gráfico de la Figura 7.11, verificándose que los rendimientos de los moldajes industrializados son significativamente mayores que los tradicionales, siendo los elementos de mayor tamaño, que requieren apoyo de grúa, los que tienen mejores resultados.

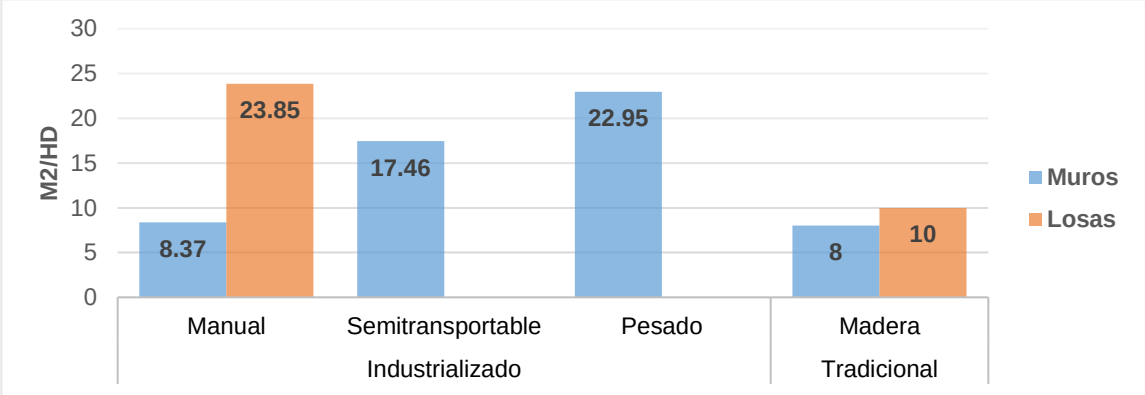


Figura 7.11. Gráfico del rendimiento de la partida de moldaje por tipología. (CDT, 2013)

Según CDT (2013), el rendimiento de la partida de moldajes, depende de la correcta coordinación entre las distintas partidas de obra gruesa y la disposición del recurso de grúa suficiente para las labores de colocación y descimbre.

7.2.1.3. Hormigonado

En esta partida, se determina la metodología que redunda en una mayor velocidad de vaciado, es decir la que tiene un mayor rendimiento, considerando los recursos humanos empleados para las labores netas de colocación de hormigón, independientemente de que éstas labores sean sólo una fracción de la jornada de los concreteros.

Como se puede observar en el gráfico de la Figura 7.12, el sistema más eficiente, o con mayor rendimiento en colocación de hormigón, es el que utiliza una Bomba Telescópica o “placing”, tanto para muros como losas, siendo la grúa un mero apoyo puntual en elemento singulares fuera del alcance del brazo telescópico de la bomba, liberando este recurso para apoyo a otras partidas, especialmente Moldajes.

Las diferencias entre los sistemas no son muy significativas, lo que indica que la velocidad de vaciado del hormigón no necesariamente sería un factor determinante a la hora de la elección de una tecnología y/o metodología versus otra.

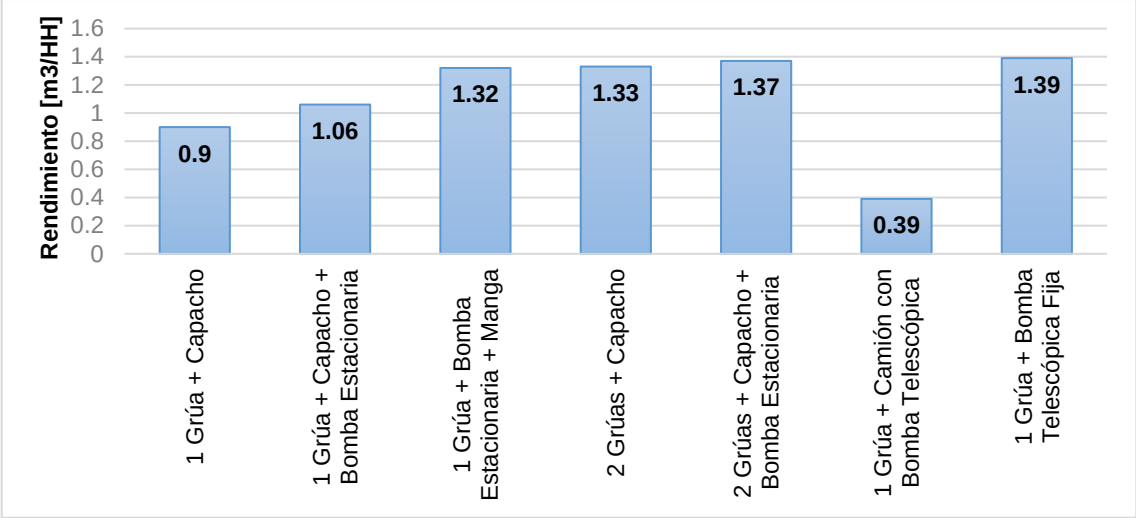


Figura 7.12. Gráfico del rendimiento de vaciado del hormigón según metodología. (CDT, 2013)

Un análisis más relevante se desprende del Rendimiento Real de la partida de hormigonado, es decir la evaluación de toda la jornada de trabajo de los concreteros, independientemente de que se encuentren o no en tarea de colocación de hormigón. Esto se ve reflejado en el siguiente gráfico.

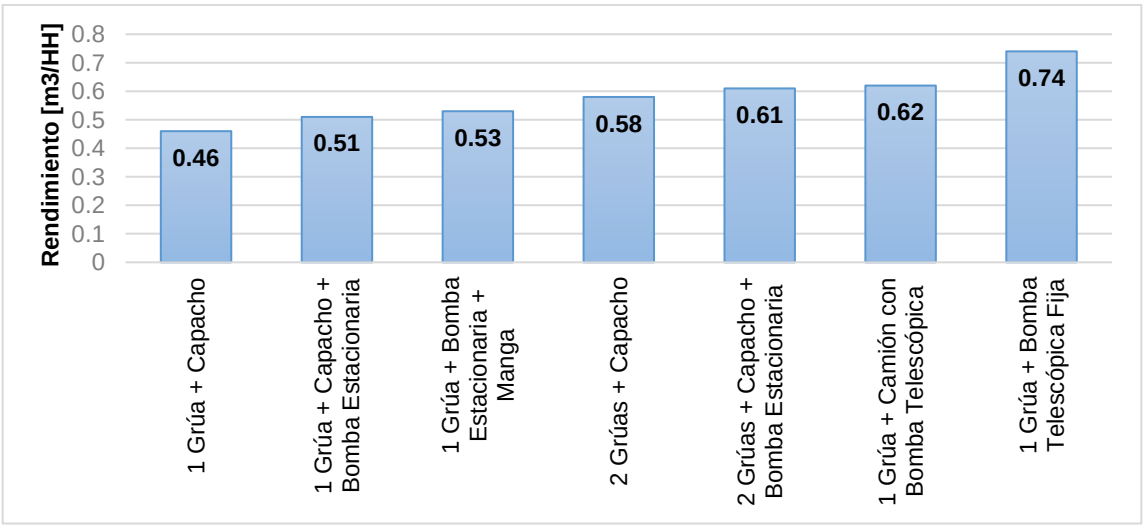


Figura 7.13. Gráfico del rendimiento real de vaciado del hormigón según metodología. (CDT, 2013)

Este gráfico refleja que los sistemas que utilizan dos grúas son los que presentan un mayor rendimiento real, esto debido a que, independientemente del uso de bomba estacionaria y capacho, o sólo capacho, estos sistemas permiten generar una labor más constante de hormigonado a lo largo del día, generándose múltiples instancias de colocación.

Lo anterior está ligado a su vez al gran ritmo de avance de las tareas de moldajes y la posibilidad de realizar tareas de moldajes durante las faenas de hormigonado. Es decir, la disponibilidad de una mayor cantidad de horas de grúa posibilita la generación de un mayor avance de las partidas de obra gruesa que generan cancha para la labor específica de hormigonado, de esta forma los concreteros dedican la mayor parte del día a labores netas de colocación de hormigón lo que supone un mayor aprovechamiento de estos trabajadores.

Las empresas que usan este sistema buscan ritmos de avance de obra gruesa que llegan incluso a los 6 pisos por mes.

7.2.2. Rendimiento de la Grúa

La productividad de un proyecto de edificación en altura se basa en el aprovechamiento de sus recursos críticos, y en el rendimiento y desempeño de las partidas críticas. En el ámbito de obra gruesa la partida que marca el ritmo es el moldaje y el recurso crítico es la grúa.

7.2.2.1. Rendimiento esperado de la grúa en transporte de moldaje (variable X)

El siguiente gráfico, indica el desempeño que debiera tener el recurso grúa, medido en m2 de moldaje por hora de grúa disponible (m2/HG) para alcanzar las metas propuestas. Dado según el mercado.

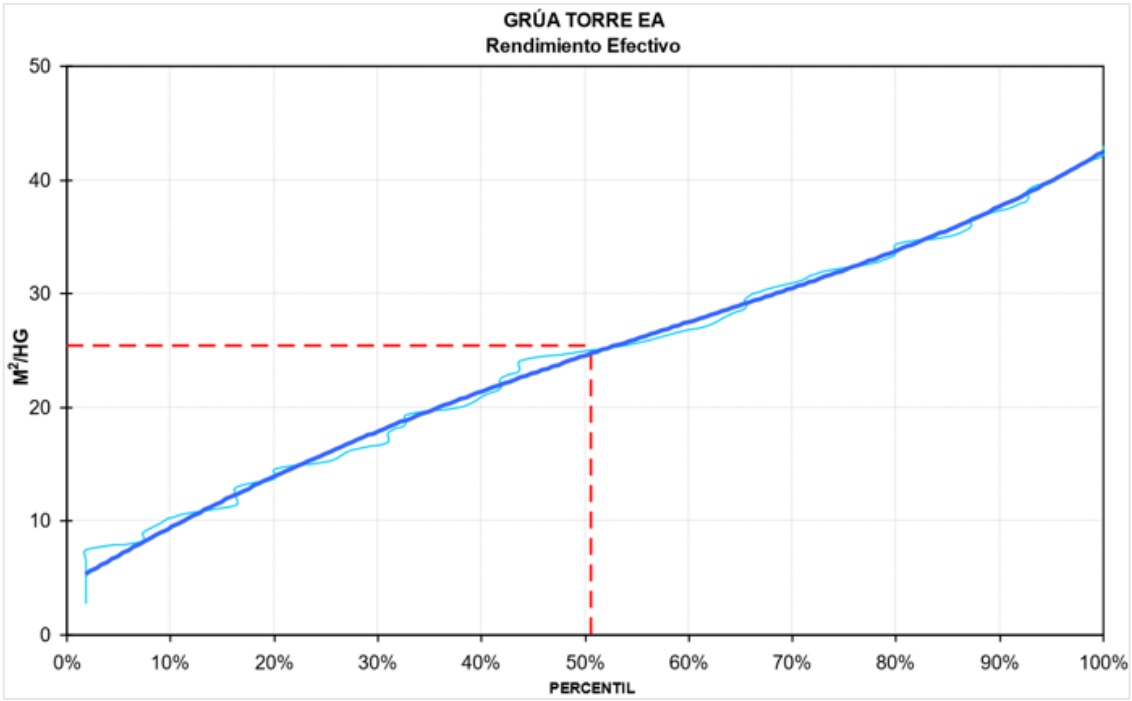


Figura 7.14. Gráfico Benchmarking de rendimientos de la grúa para Edificación en Altura. (CALIBRE, 2013)

Como se observa en el gráfico de benchmarking, el 50% de las grúas monitoreadas tienen un rendimiento aproximado de 25 [m2/HG] y el máximo registrado es de 42 [m2/HG].

7.2.2.2. Horas grúa requeridas (variable y)

Corresponde a la variable a despejar, donde la ecuación no debe sobrepasar las 9 horas grúa de la jornada, aunque en la práctica la grúa suele ser usada 11 horas diarias (1 hora colación + hora extra).

En base a esto, se han desarrollado unos ábacos que permiten determinar el avance diario, en función de la tipología de método de colocación de hormigón (determina la cantidad de la jornada dedicada a moldajes) y considerando el rendimiento efectivo esperado y las horas grúa totales disponible. Para el ejemplo de la Figura 7.15:

- **Hormigonado:** con capacho, bomba estacionaria y 1 grúa.
- **Rendimiento esperado de la grúa:** 25 [m2/HG] (la media).
- **Tiempo diario de grúa:** 9 horas + 1 hora de colación + 1 hora extra = 11 horas.

Se tiene un avance de moldaje de muros de aproximadamente 150 [m2/día] y se define cuantas fases de muro se debe programar por planta. O bien, en función del avance que se necesita según las fases, suponiendo un rendimiento efectivo en la media: 25 [m2/HG], optimistas: 35 [m2/HG] o pesimista: 15 [m2/HG], se puede determinar cuántas horas de grúa se necesita y definir una alternativa: (1) Incorporar una grúa adicional (2) Cambar el estilo de hormigonado (3) Redefinir las fases y plantear una nueva meta de avance.

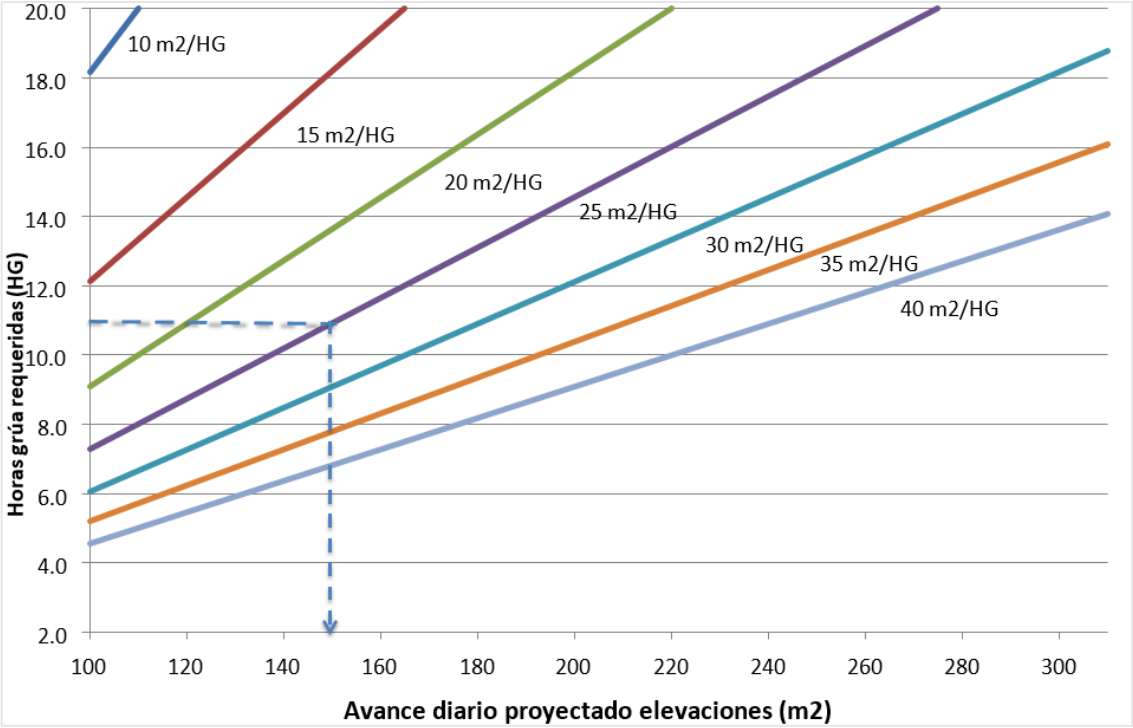


Figura 7.15. Gráfico rendimientos, según utilización de grúa. 55% en moldaje, 1 grúa. (CDT, 2013)

7.2.3. Plazos de desencofrado y descimbre

Se procederá al desencofrado cuando el hormigón haya alcanzado la resistencia necesaria para soportarse a sí mismo, sin que produzcan descantillados en su superficie. En la Tabla 7.3, se tiene los períodos mínimos que se deben respetar antes de desencofrar. Cuando se trata de encofrados verticales, el plazo es de horas, pero si se trata de los fondos de vigas o losas, o del descimbrado de las mismas, tendremos que respetar varios días. (Sánchez, 2007)

Tabla 7.3 . Plazos mínimos de desencofrado. (Montoya, 1991)

		Temperatura superficial del hormigón [ºC]			
		> 24º	**16º**	**8º**	**2º**
ENCOFRADOS VERTICALES		9 horas	12 horas	18 horas	30 horas
LOSAS	**Fondos de encofrado**	2 días	3 días	5 días	8 días
	Puntales	7 días	9 días	13 días	20 días
VIGAS	**Fondos de encofrado**	7 días	9 días	13 días	20 días
	Puntales	10 días	13 días	18 días	28 días

En casos corrientes, los plazos de desmolde y descimbre deben ser mayores o iguales que los indicados en la Tabla 7.4. (NCh170, 2016)

Tabla 7.4. Plazos mínimos de descimbre y desmolde. (NCh170, 2016)

	CEMENTO GRADO	
MOLDAJES	**Corriente**	**AR**
Costados de muros, vigas o elementos no solicitados	2 días	1 día
Costados de pilares o elementos solicitados por peso propio o cargas externas	5 días	3 días
Fondos, cimbras, puntales y arrostramientos de vigas y losas	16 días	10 días

7.2.4. Resumen de valores (Valores Nominales)

En las tablas siguientes, se muestra el resumen de los valores que se obtuvieron de la recolección de datos. Para ser más representativo, se escogieron aproximadamente los promedios. Estos valores se utilizarán como base de comparación para los experimentos que se desarrollan en este trabajo, por lo que se denominan Valores Nominales, es decir, son aquellos que definen un escenario "normal" del sistema.

Tabla 7.5. Valores nominales del horario de jornada y la velocidad de las partidas

HORARIO JORNADA [hora]				
PARTIDA	**Inicio**	**Fin**	**Rendimiento máximo ideal**	
Enfierradura	8:00	18:00	150	[kg/hora]
Moldaje (Instalación)	8:00	18:00	10	[m2/hora]
Moldaje (Descimbre)	8:00	18:00	20	[m2/hora]
Hormigonado	14:00	18:00	10	[m3/hora]
Grúa (transporte de enfierradura)	8:00	20:00	500	[kg/hora]
Grúa (transporte de moldaje)			42	[m2/hora]

Tabla 7.6. Valores nominales de la cantidad y capacidad de material de las partidas

			CAPACIDAD EN ACOPIOS			
PARTIDA	**Cantidad en obra**		**Ideal**		**Máxima**	
Enfierradura	Sin límite. Según se requiera (*)	[kg]	10500	[kg]	20000	[kg]
Moldaje	3000	[m2]	1400	[m2]	3000	[m2]
Hormigón	Sin límite. Según se requiera (*)	[m3]	No aplica			

(*) La logística de la llegada de material para enfierradura y hormigonado no se incluye en el modelo.

- **Tiempo de fraguado hormigón:** 1 [día]
- **Modalidad de trabajo de la grúa escogido:**

  Por horarios ( ) Prioridad enfierradura (√) Prioridad moldaje ( )

8. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Ahora es posible ejecutar el programa y realizar una prueba piloto (corrida). Con esto se obtienen los primeros resultados de la simulación. Con esta primera aproximación del programa del modelo de simulación, se hace necesaria una verificación del cálculo de los indicadores y comprobar la validez que tienen estos resultados obtenidos con el modelo.

En la medida en que el modelo es correctamente validado, puede afirmarse que éste representa adecuadamente el comportamiento del sistema objeto de estudio, garantizándose de este modo su utilidad como instrumento de ayuda para la gestión del sistema. De hecho, a efectos prácticos, la preocupación se centra más en la utilidad que en la validez puesto que no existen modelos total o perfectamente "válidos" puesto que siempre son una simplificación, es decir, algo menos que el sistema que se modeliza. (Rouse, 1985)

Barlas (1996) defiende el empleo de dos tipos de validación: una validación estructural o externa y una validación del comportamiento o interna. De este modo, la validación estructural tiene por objeto comprobar en qué medida la estructura del modelo es una representación adecuada de la estructura real analizada. De un modo similar, la validación del comportamiento tiene por misión determinar en qué medida los patrones generados por el modelo se asemejan lo suficiente a los principales patrones mostrados por el sistema real. La siguiente figura, representa los dos tipos de validación mencionados.

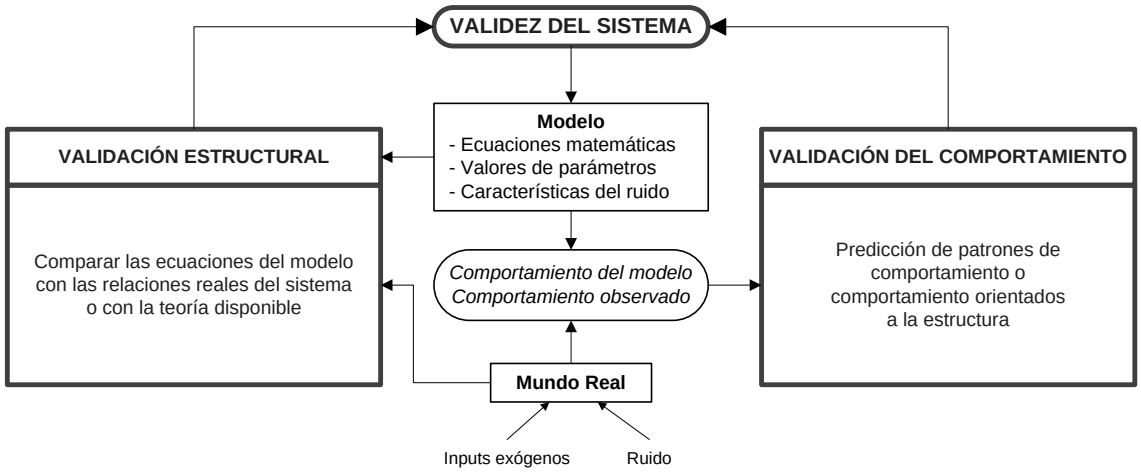


Figura 8.1. Principales aspectos de la validación de modelos. (Barlas, 1996)

8.1. VALIDACIÓN ESTRUCTURAL O EXTERNA

Hay escasos trabajos sobre el estudio y las mediciones científicas de las pérdidas del proceso (Araya, Abarza, Gastó, & Bernold, 2016). Además, no existen métodos validados con el que se pueda hacer una comparación de resultados de la simulación. Por lo tanto, el método para efectuar una validación externa es mediante un análisis de sensibilidad.

Por ejemplo, si aumentamos la tasa de falla de la cuadrilla de enfierradura, su respectivo valor del OEE disminuirá, ya que la calidad se verá afectada. Es decir, si aumenta la cantidad de veces que la cuadrilla hace una mala instalación de la enfierradura, la calidad disminuirá.

Esta situación lógica es simulada y los valores obtenidos se muestran en el gráfico de la Figura 8.2, corroborando el correcto comportamiento de la simulación.

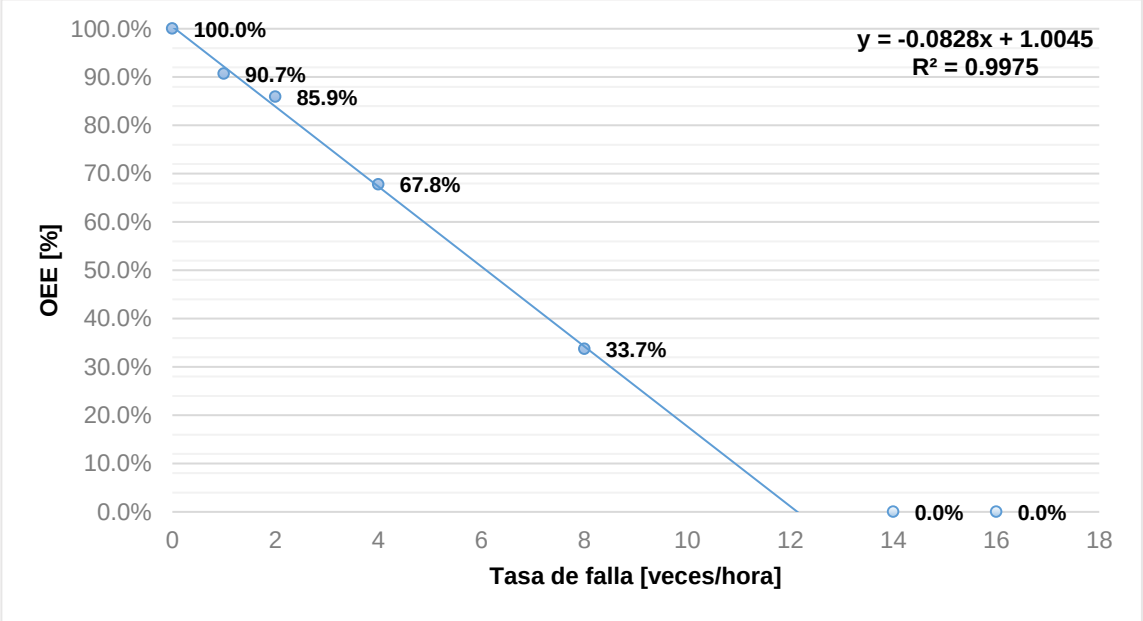


Figura 8.2. Análisis de sensibilidad del OEE al variar la tasa de falla de la cuadrilla de Enfierradura

8.2. VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO O INTERNA

En el sistema real, el avance de las partidas de enfierradura, moldaje y hormigonado tienen una sincronización lógica, ya que cada una debe ir generando cancha para que la siguiente partida pueda comenzar. Al graficar en el modelo este avance de cada una de las partidas, se comprueba que la simulación actúa acorde al sistema real, es decir, se demuestra que existe una sincronización lógica entre cada una de las partidas. Este gráfico se representa a continuación.

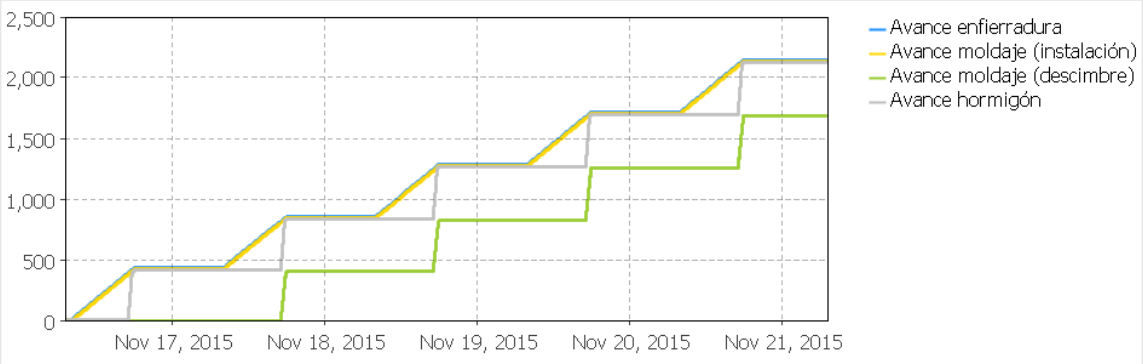


Figura 8.3. Gráfico del avance las distintas partidas de la etapa de obra gruesa simuladas en Anylogic.

Al finalizar esta etapa de verificación y validación, es posible decir que la corrida de simulación se ejecuta de acuerdo a lo especificado en el programa, que cada elemento del modelo representa adecuadamente al sistema y que la relación entre ellos está de acuerdo a lo especificado. Se comprueba que la simulación del modelo es una representación razonable del sistema. Por lo tanto, se demuestra que la simulación puede sustituir al sistema real para temas de experimentación y ya es posible elaborar interpretaciones de los resultados con bastante detalle, sobre todo en sus magnitudes, de modo que refleje el comportamiento real del sistema.

9. ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En este capítulo se planean los experimentos a realizar con el modelo de simulación establecido en el capítulo anterior para probar las hipótesis que se plantearon para resolver el problema formulado. También aquí, se efectúan las “corridas” de simulación necesarias para los experimentos propuestos, con el objeto de obtener los valores de interés; y finalmente se analizan los resultados.

9.1. SIMULACIÓN DEL SISTEMA CON VALORES NOMINALES

Para efectuar un análisis de sensibilidad y experimentar con otros escenarios, se requiere de un escenario o base de comparación desde donde comenzar a variar las variables. Para ello, se simula el sistema con los Valores Nominales, que son aquellos que definen un escenario "normal". El cálculo de estos valores se indicó en la etapa de Recolección de Datos.

9.1.1. Resultado del sistema con valores nominales

Se realiza una corrida de la simulación con valores nominales y se muestra el resultado después de un tiempo suficiente para que el sistema haya alcanzado un estado estable.

9.1.1.1. Uso del tiempo en desperdicios del proceso

El siguiente gráfico muestra el porcentaje del tiempo destinado para actividades que representan pérdidas del proceso para un escenario con valores nominales.

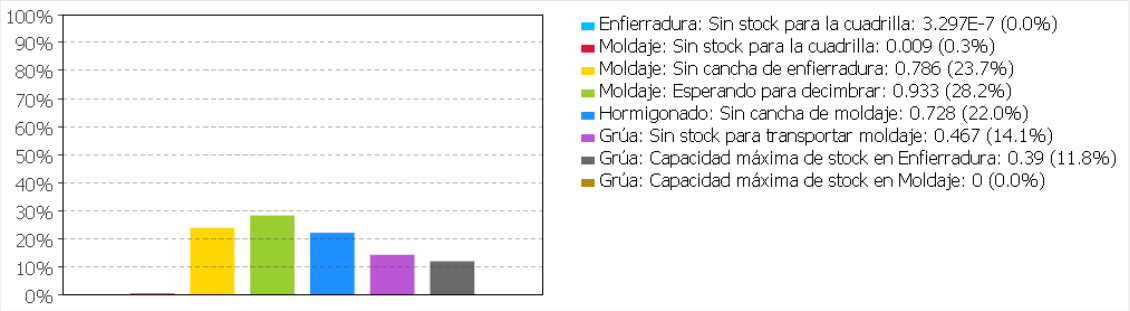


Figura 9.1. Uso del tiempo en actividades que representan pérdidas para el sistema con valores nominales

9.1.1.2. Comportamiento del avance de las partidas con valores nominales

El siguiente gráfico indica el comportamiento del avance en metros lineales de una semana de trabajo de cada una de las partidas de la etapa de obra gruesa que arroja la simulación.

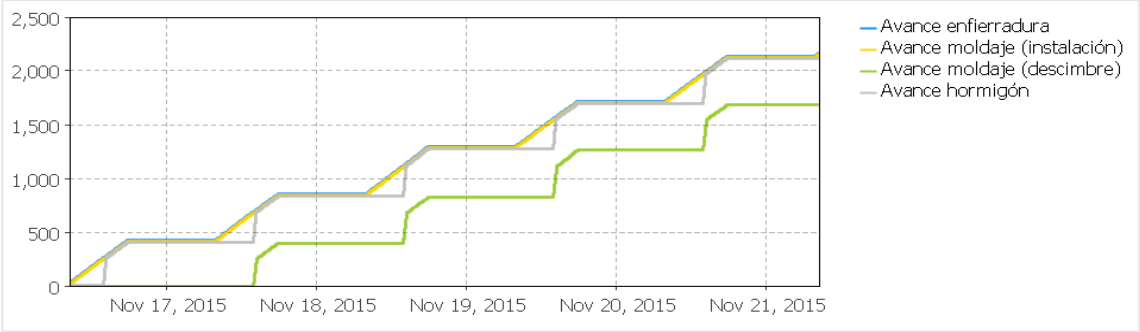


Figura 9.2. Avance de las partidas de obra gruesa con valores nominales

9.1.1.3. OEE de las cuadrillas y grúa con valores nominales

La siguiente figura indica el OEE de cada una de las partidas de la etapa de obra gruesa. En este indicador están incluidas las pérdidas de rendimiento, desempeño y calidad. En otras palabras, indica la capacidad actual a la que está trabajando el proceso con respecto a un desempeño ideal o máximo. Esta capacidad máxima no se alcanza por las distintas pérdidas que ocurren.

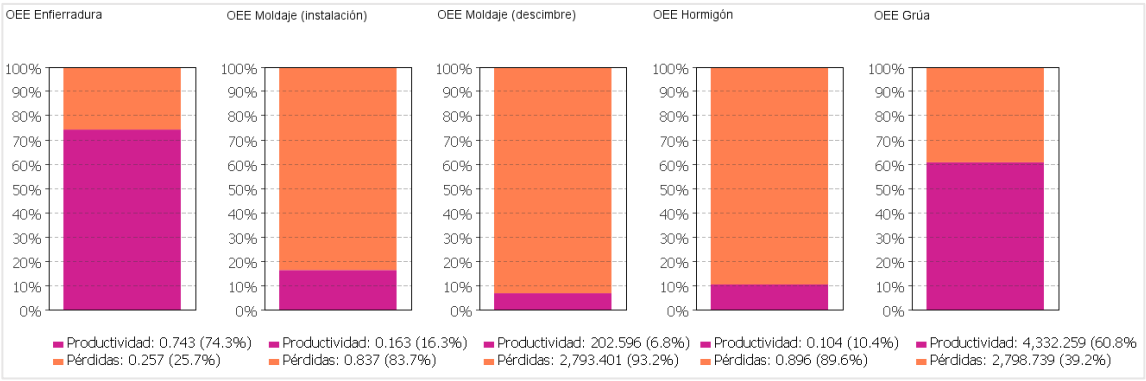


Figura 9.3. OEE de las cuadrillas y grúa con valores nominales

9.2. ANÁLISIS COMPARATIVO

Un análisis comparativo es necesario para evaluar distintos escenarios que ayudarán a comprender el comportamiento del sistema.

9.2.1. Evaluación comparativa de los comportamientos de la grúa

La grúa presenta un comportamiento característico de acuerdo al recurso que escoge como prioridad para transportar en obra, ya sea enfierradura o moldaje, o si establece un horario

para transportarlos. Estos comportamientos pueden influir en las pérdidas del sistema, por lo que a continuación se hace una evaluación comparativa.

9.2.1.1. Comparación del uso del tiempo en desperdicios del proceso

El siguiente gráfico compara las pérdidas que genera cada comportamiento distinto de la grúa.

- Comportamiento 1: Por horarios.
- Comportamiento 2: Prioridad enfierradura.
- Comportamiento 3: Prioridad moldaje.

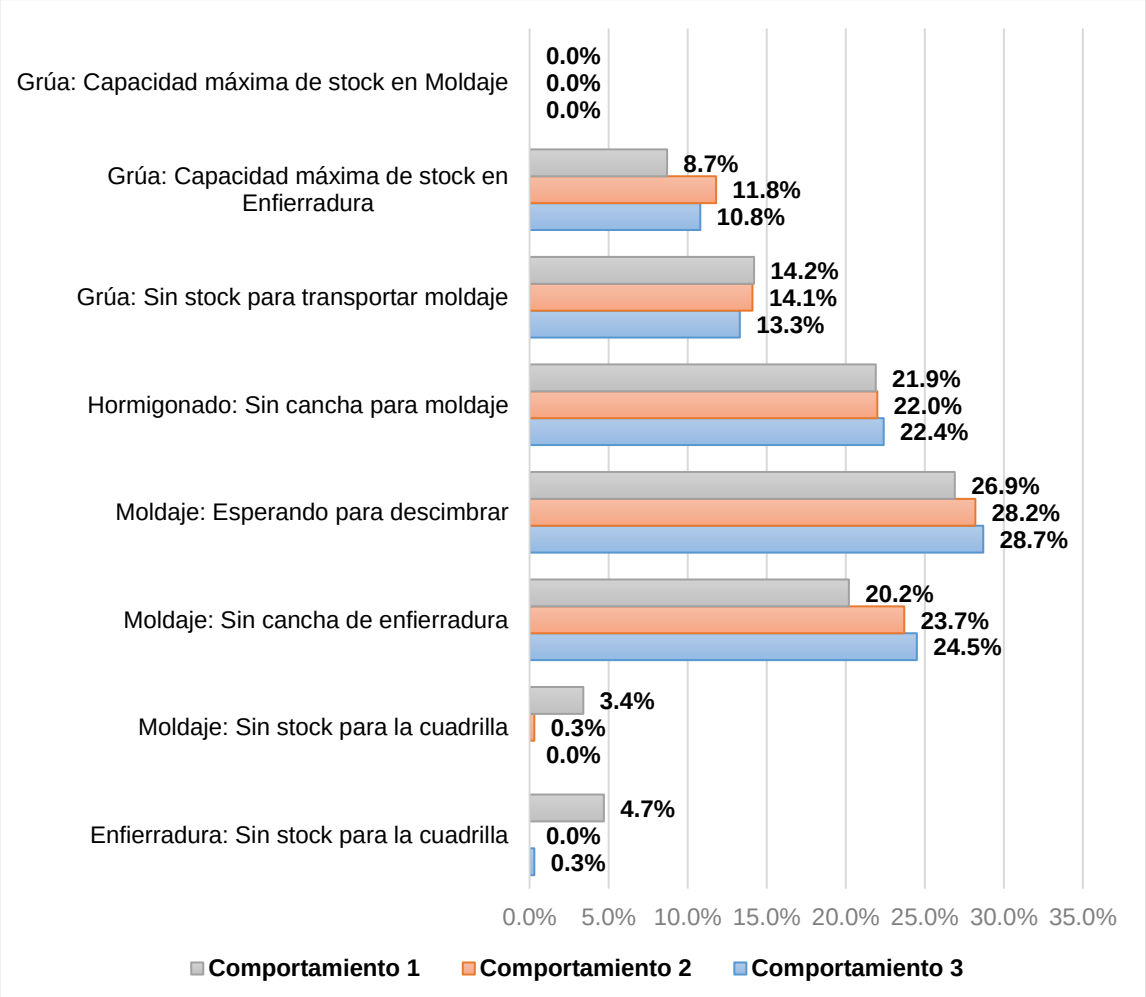


Figura 9.4. Comparación de los desperdicios del proceso según el comportamiento que desempeña la grúa

9.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se efectúa un análisis de sensibilidad a ciertas variables de interés para evaluar el comportamiento del sistema.

9.3.1. Variación de la cantidad de moldaje en obra

En obra se tiene un stock de moldaje establecido, tal que satisface los ciclos de uso con el objetivo de utilizar la cantidad precisa para evitar que falte o sobre material.

En el siguiente gráfico, se evalúa el comportamiento de las pérdidas del sistema al disminuir y aumentar el valor de la cantidad de moldaje en obra, en un orden de magnitud respectivamente.

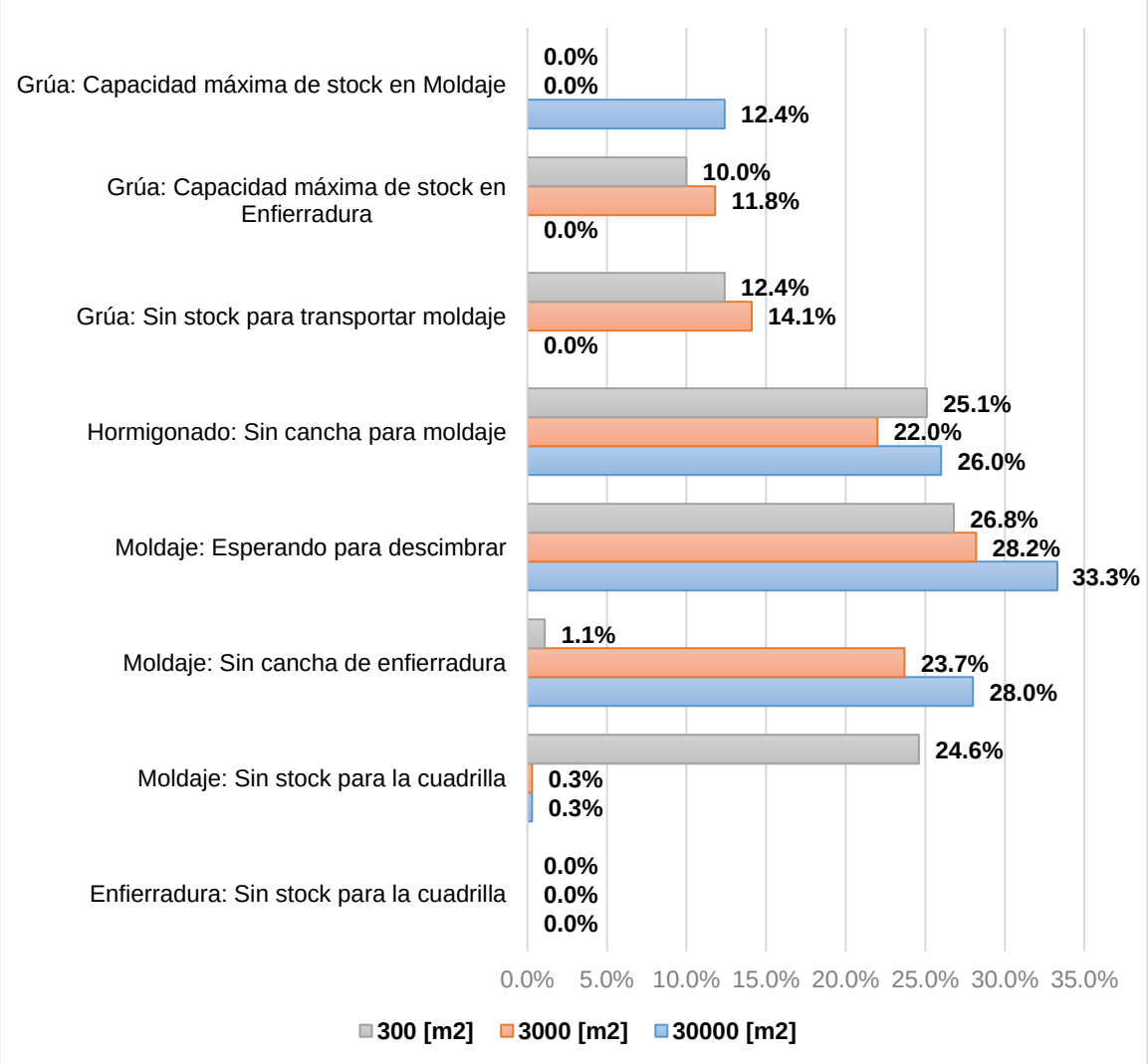


Figura 9.5. Evaluación de los desperdicios del sistema al variar la cantidad de moldaje en obra

9.3.2. Variación del rendimiento máximo de la cuadrilla de enfierradura

A continuación, se evalúa el comportamiento de las pérdidas del sistema al variar el rendimiento máximo que puede tener la cuadrilla de enfierradura.

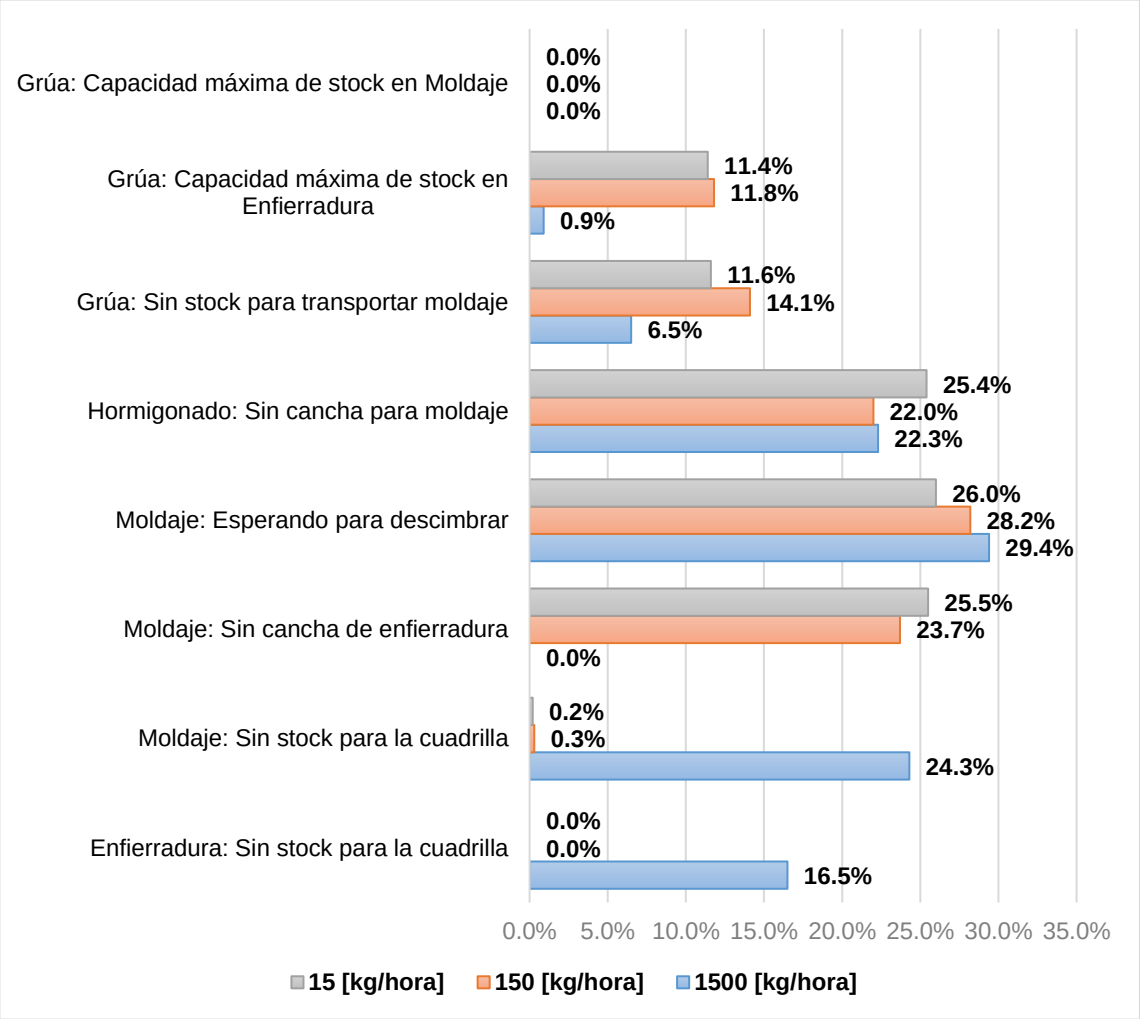


Figura 9.6. Evaluación de los desperdicios del sistema al variar el rendimiento máximo de la cuadrilla de enfierradura

9.4. RESUMEN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El efecto que genera modificar las variables del sistema es drástico, como se representa en los gráficos. Hay pérdidas que se ven más afectadas que otras, como por ejemplo, pérdidas que en un escenario eran de 0%, en otro aumentaron a un 12.4%. No es posible definir si se logran mejoras al modificar una variable, ya que si bien hay unas pérdidas que disminuyen, hay otras que aumentan.

10. CONCLUSIONES

El 21% de los tiempos en obras de construcción corresponden a tiempos perdidos. Además, debido a que no hay mediciones confiables tanto a nivel de tarea, proyecto y sector, se desconoce la magnitud y detalle del problema.

Para entender las variables claves que son causas de pérdidas, se simuló la etapa de Obra Gruesa y se analizó su comportamiento, apoyándose tanto en la filosofía TPM, para incluir las pérdidas de Desempeño, Rendimiento y Calidad; como en las herramientas de simulación, para transferir el comportamiento del sistema real al modelo.

Se han publicado escasos trabajos sobre el estudio y las mediciones científicas de las pérdidas de la etapa de obra gruesa. En el último tiempo, los artículos se han enfocado en medir lo que sucede en obras reales, incorporando innecesariamente información que puede perturbar los resultados del sistema, al ser este sector dinámico y variable.

10.1. SIMULACIÓN MULTIPARADIGMA PARA LA CONSTRUCCIÓN

Una de las principales ventajas de las técnicas de simulación de hoy en día, es el hecho de que son capaces de proporcionar a los usuarios información práctica del diseño del sistema del mundo real. Por consiguiente, el usuario es capaz de explorar los diferentes diseños alternativos sin ni siquiera tener que construir el modelo físico del sistema, permitiendo responder a incógnitas y preguntas del tipo “What if?”, que pasaría en caso de realizar una acción, cambio o aplicación.

La simulación permite identificar y experimentar con condiciones de operación que podrían resultar peligrosas, de elevado coste económico o incluso imposibles en el sistema real.

Esta memoria demostró la oportunidad de estudiar problemas desde diferentes niveles de abstracción. De este modo, modelando el sistema con un mayor nivel de abstracción, fue posible entender el comportamiento y las interacciones de todos los componentes de alto nivel, para explicar y mejorar el conocimiento sobre la complejidad global del sistema real.

10.2. UN CAMINO PARA LA GESTIÓN PREVENTIVA DE LA CALIDAD

Si bien es importante medir para tener un control de los procesos que se desean mejorar, en el caso de las pérdidas de calidad, saber cuándo medir es esencial para prevenirlas.

Los resultados de este trabajo han demostrado que las pérdidas de calidad, dependen sólo de la tasa de falla y del tiempo en falla del proceso, es decir, está aislada al proceso en sí y no depende de otras características del sistema, como se muestra en la Figura 8.2. Análisis de sensibilidad del OEE al variar la tasa de falla de la cuadrilla de Enfierradura. Por lo tanto, la meta debe ser la gestión preventiva de pérdidas, eliminando las causas que puedan originar desperdicios en la etapa de producción.

Una simulación del proceso que incluya el modelo de la calidad de recursos, es necesaria como enfoque efectivo para reducir las pérdidas.

10.3. CONTROL EN TIEMPO REAL

Si bien es posible planificar los procesos, siempre existirá un grado de incertidumbre que hará que ocurran eventos inesperados que ocasionarán problemas y que deben ser resueltos lo antes posible. Debido a esto, se hace necesario un control en tiempo real del sistema.

Por lo tanto, se debe considerar implementar una obra de construcción inteligente e incorporar la filosofía de gestión para la construcción basada en el control del tiempo real, que se sustenta en un antiguo concepto de gestión proactiva.

Este trabajo pretende incentivar el uso de las nuevas tecnologías, como por ejemplo, sensores y controladores inteligentes. De este modo, en conjunto con las técnicas de simulación, se podría proporcionar los datos necesarios en tiempo real para detectar los problemas. Por lo tanto, este sería el único modelo de control proactivo de cero pérdidas.

10.4. EVALUACIÓN 1º HIPÓTESIS

(1) Es posible simular de forma efectiva los procesos de la etapa de Obra Gruesa incluyendo sus tres grandes pérdidas: (1) Desempeño (2) Rendimiento y (3) Calidad.

El modelo de simulación de la obra fue validado para poder afirmar que representa adecuadamente el comportamiento del sistema. De este modo, se garantizó su utilidad como instrumento de ayuda para el análisis del sistema.

La capacidad que tiene el software Anylogic para modelar con los distintos métodos de simulación, y a la vez poder combinarlos, permitió incluir todas las pérdidas que señala la filosofía TPM (Total Productive Maintenance – Management).

Los diagramas Forrester y los diagramas de estado de las partidas que aparecen en el Capítulo 7.1 – Desarrollo del Modelo, prueban que las pérdidas de desempeño pueden ser modeladas, al permitir que los procesos simulados por sistemas dinámicos se detengan por ciertas condiciones determinadas por el comportamiento de los agentes.

Del mismo modo, los diagramas del Capítulo 7.1, muestran que las pérdidas de rendimiento pueden incluirse, aunque de forma simplificada, cuando ocurren microparadas del proceso, es decir, interrupciones cortas que provocan que no se trabaje a una velocidad constante. Para incluir estas pérdidas con un mayor nivel de abstracción, es necesario conocer las curvas del "estado estable" de cada partida, cuya información podría obtenerse en futuras investigaciones.

Los diagramas de estado de las partidas de enfierradura, moldaje y hormigonado del Capítulo 7.1, demuestran que las pérdidas de calidad son modeladas correctamente utilizando una tasa de falla y una duración de falla dentro del comportamiento de los agentes de cada partida, demostrándose que dependen sólo de estas variables y no de otras características del sistema.

10.5. EVALUACIÓN 2º HIPÓTESIS

(2) Un análisis de posibles escenarios permitirá identificar las variables más críticas de causa y efecto de pérdidas en la etapa de Obra Gruesa.

Las figuras Figura 9.4, Figura 9.5Figura 9.6, muestran los resultados de los distintos escenarios analizados, los cuales permitieron concluir claramente que no existen variables críticas, ya que, si bien el cambio del valor de una variable permite disminuir algunas pérdidas, también provoca el aumento de otras.

Lo anterior indica que la solución radica en que debe existir una correcta sincronización de las partidas, considerando el rendimiento y el tiempo de trabajo. De esta forma, se producirá un avance continuo sin interrupción y con pérdidas minimizadas del sistema.

10.6. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Se destaca incluir como recomendación para futuras investigaciones, las pérdidas de desempeño con un mayor grado de detalle o nivel de abstracción. Para ello se debería realizar un estudio del desempeño de cada partida. Determinar de qué variables depende y cómo se comporta.

Esta investigación es un esfuerzo para minimizar las limitaciones que se tienen en el tema y convencer a los profesionales de los méritos de utilizar simulaciones en la industria de la construcción. Si los investigadores construyeran simulaciones estándar del trabajo de cada operación de construcción, los practicantes podrían usar esas simulaciones para planificar modificando solamente los parámetros más destacados del proyecto en particular. Además, utilizando la información proporcionada por BIM y la integración de BIM con simulaciones, la fiabilidad del uso de datos de la simulación se mejoraría mucho. Por lo tanto, esta investigación sugiere una nueva forma para comprender los problemas que enfrenta la industria de la construcción a través de un práctico marco de simulación multiparadigma.

11. REFERENCIAS

Ahn, C., Lee, S., & Peña-Mora, F. (2012). Monitoring system for operational efficiency and environmental performance of construction operations, using vibration signal analysis. *Construction Research Congress.*

Allende, H. (2000). *Simulación, ICI-382.* Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Informática, Valparaíso.

Antoni, J., Daniere, J., & Guillet, F. (2002). Effective vibration analysis of IC engines using cyclostationarity. Part IA methodology for condition monitoring. *Journal of sound and vibration.*

Anylogic. (2016). Obtenido de Anylogic: http://www.anylogic.com/agent-based-modeling

Araya, F., Abarza, J., Gastó, R., & Bernold, L. (2016). Cómo lograr procesos con cero pérdidas a través de la integración de la cadena de suministros en las construcciones de acero. *Revista ingeniería de construcción, 31*(2), 75-82.

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *12*, págs. 183-210. System dynamics review.

Borshchev, A. (2013). *The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6.* Chicago: AnyLogic North America.

Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. *Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society*, *XXII.*

Cardoso, C., Bert, F., & Podestá, G. (2011). Modelos Basados en Agentes (MBA): definición, alcances y limitaciones. *Landuse change, biofuels and rural development in the La Plata Basin.*

CDT. (2013). *Análisis de la Productividad en Obras de Edificación en Chile.*

Domínguez, L., & Mújica, M. A. (2013). *Las herramientas de modelado y simulación para la identificación y solución de problemas aeroportuarios.* Barcelona.

Geng, Z., Chen, J., & Hull, J. B. (2003). Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach. *International Journal of Mechanical Sciences.*

González, H. (2009). Una herramienta de mejora, el OEE (Efectividad Global del Equipo). *Contribuciones a la Economía*.

Halpin, D. (1977). CYCLONE-method for modeling job site processes. *Journal of the construction division*.

Liu, C. Q., & Huston, R. L. (2011). Principles of Vibration Analysis: With Applications in Automotive Engineering. *Society of Automotive Engineers.*

Montoya, J. (1991). *Hormigón Armado.* Gustavo Gili.

NCh170. (2016). *Hormigón - Requisitos generales.* INN.

Rouse, B. (1985). *Self-report methods of estimating drug use: Meeting current challenges to validity.* Rockville, Maryland: National Institute on Drug Abuse.

Sánchez, E. (2007). *Construcción de estructuras de hormigón armado: edificación.* Delta Publicaciones.

Sistemas OEE, T. t. (2016). *Sistemas OEE*. Obtenido de Sistemas OEE: http://www.sistemasoee.com/

Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World.* Irwin/McGraw-Hill.

Trujillo, J. (2016). *Trabajo de Fin de Grado Gestión de la Incertidumbre en Problemas Reales que Surgen en una Terminal Marítima de Contenedores.*

Wiener, N. (1948). *Cybernetics.* París: Hermann.

Wikipedia, c. d. (2015, Noviembre 26). *AnyLogic*. Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=AnyLogic&oldid=87258057

Wikipedia, c. d. (2016, Febrero 19). *Simulación por eventos discretos.* Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Simulaci%C3%B3n_por_eventos_discretos&oldid=89264481

Wikipedia, c. d. (2017). *Agent-based model.* Obtenido de Wikipedia, The Free Encyclopedia: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Agent-based_model&oldid=758160800

WoonSeong, J., Soowon, C., JeongWook, S., & June-Seon, Y. (2016). *BIM-Integrated Construction Operation Simulation for Just-In-Time Production Management.* Ewha Womans University & Georgia Institute of Technology North Avenue, Department of Architectural Engineering & School of Building Construction, Atanta & Korea.