

*Comprometidos con
el medioambiente*

Principios, herramientas e implementación de *Lean Construction*

Luis Fernando Botero Botero



Botero Botero, Luis Fernando

Principios, herramientas e implementación de *Lean Construction* / Luis Fernando Botero Botero. – Medellín: Editorial EAFIT, 2021.

442 p.; 24 cm. -- (Colección Académica).

ISBN 978-958-720-704-0

ISBN: 978-958-720-705-7 (versión EPUB)

1. Industria de la construcción – Administración. 2. Manufactura esbelta. 3. Administración de proyectos. I. Vásquez-Hernández, Alejandro. II. Gómez Aristizabal, Jorge Arturo, pról. II. Tít. III. Serie

690.068 cd 23 ed.

B748

Universidad EAFIT – Centro Cultural Biblioteca Luis Echavarría

Principios, herramientas e implementación de *Lean Construction*

Primera edición: mayo de 2021

© Luis Fernando Botero Botero

© Alejandro Vásquez-Hernández

© Editorial EAFIT

Carrera 49 No. 7 sur - 50

Tel.: 261 95 23, Medellín

<http://www.eafit.edu.co/fondoeditorial>

e-mail: fonedit@eafit.edu.co

ISBN: 978-958-720-704-0

ISBN: 978-958-720-705-7 (versión EPUB)

DOI: <https://doi.org/10.17230/9789587207040lr0>

Edición: Cristian Suárez Giraldo

Diseño y diagramación: Alina Giraldo Yepes

Imagen de carátula:1739669882, ©shutterstock.com

Universidad EAFIT | Vigilada Mineducación. Reconocimiento como Universidad: Decreto Número 759, del 6 de mayo de 1971, de la Presidencia de la República de Colombia. Reconocimiento personería jurídica: Número 75, del 28 de junio de 1960, expedida por la Gobernación de Antioquia. Acreditada institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional hasta el 2026, mediante Resolución 2158 emitida el 13 de febrero de 2018

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de la editorial

Editado en Medellín, Colombia

Tabla de contenido

Prólogo	21
Prefacio.....	23
Un poco de historia.....	27
La producción artesanal	29
La producción artesanal de vehículos.....	29
Henry Ford y la producción en masa.....	30
Los tres gigantes americanos de la producción en masa.....	33
El surgimiento de una nueva visión de la producción: sistema de producción de Toyota (TPS)	35
Los principios de gestión del TPS	39
Síntesis del capítulo.....	41
La producción <i>Lean</i>	43
Principios de la producción <i>Lean</i>	44
El concepto de desperdicio o pérdidas, desde la producción <i>Lean</i>	45
Concepto de valor	49
Síntesis del capítulo.....	55
Una propuesta <i>Lean</i> para el sector de la construcción.....	57
Hacia una definición de <i>Lean Construction</i>	57
El aporte de Lauri Koskela a <i>Lean Construction</i>	61

La base conceptual de la nueva filosofía de producción...	63
El modelo de transformación	63
El modelo de flujo	64
El modelo de generación de valor	65
Los once principios heurísticos de <i>Lean Construction</i>	70
Descripción y aplicación de los once principios de <i>Lean Construction</i>	72
Reducir la participación de actividades que no agregan valor (pérdidas)	72
Aumentar el valor del resultado del proceso a partir de los requerimientos del cliente.....	72
Reducir la variabilidad.....	73
Reducir el tiempo de ciclo	73
Simplificar el proceso mediante la reducción del número de pasos, partes y enlaces.....	74
Incrementar la flexibilidad del resultado del proceso	74
Aumentar la transparencia del proceso.....	75
Enfocar el control en el proceso completo	75
Introducir el mejoramiento continuo en el proceso.....	76
Mantener un equilibrio entre las mejoras de las conversiones y los flujos.....	76
Hacer referenciación (<i>benchmarking</i>)	77
Síntesis del capítulo.....	79

<i>Lean Project Delivery System</i> (LPDS) e <i>Integrated Project Delivery</i> (IPD). Prácticas innovadoras para la mejora de proyectos de construcción.....	81
El sistema tradicional de gestión de proyectos	82
<i>Lean Project Delivery System</i> (LPDS).....	85
Estructura del LPDS.....	88
<i>Integrated Project Delivery</i> (IPD)	92

Principios rectores del IPD	93
Beneficios asumidos del IPD.....	95
Las fases del desarrollo de un proyecto según el enfoque tradicional y el IPD	96
La curva de <i>MacLeamy</i> en el ciclo de vida del proyecto.....	106
Desafíos para la implementación del IPD	107
Nuevas formas de relacionamiento contractual	108
Síntesis del capítulo.....	112
 El último planificador (<i>Last Planner System</i> [™])	115
Antecedentes e historia del <i>Last Planner System</i> [™]	116
Conceptos fundamentales.....	117
El ciclo de planificación y control de la producción en LPS.....	119
Estructura de trabajo <i>Lean</i> y LPS	121
Niveles de planificación del LPS.....	122
Planificación general (plan maestro).....	122
Planificación de fases.....	123
Planificación intermedia (plan del medio plazo).....	125
Plan semanal (plan del corto plazo)	126
Medición del desempeño del LPS.....	128
La dimensión social del <i>Last Planner System</i>	129
Aprendizaje a partir de las tareas no completadas.....	130
Recomendaciones y buenas prácticas asociadas al LPS	131
Recomendaciones para el plan general.....	132
Recomendaciones para el plan intermedio.....	137
Recomendaciones para el plan semanal	144
¿Cómo se realiza la reunión semanal?	149
Herramientas de soporte para la implementación del LPS.....	159

Implementación de LPS en Colombia	170
Síntesis del capítulo.....	173
 Otras herramientas <i>Lean</i> aplicables a la construcción.....	175
La gestión visual, o <i>Visual Management</i> (VM)	179
Definición.....	179
Antecedentes históricos.....	181
Marco conceptual para una gestión visual	183
Aplicación de la gestión visual a la construcción.....	188
La gestión visual y la seguridad y salud en el trabajo	194
La gestión visual y la gestión de la producción	195
<i>Kanban</i>	198
Estudios de <i>Layout</i> o de distribución de planta	199
Generalidades para el planteamiento del <i>Layout</i>	200
Beneficios del <i>Layout</i> de construcción	201
Principios básicos para el planteamiento del <i>Layout</i> de construcción.....	203
Los estudios de <i>Layout</i> y la gestión visual.....	204
Las 5S.....	206
Definición conceptual de cada S	207
Beneficios de las 5S	210
Implementación de las 5S.....	211
Ejemplo de la implementación de las 5S en proyectos de construcción.....	212
Mapeo de flujo del valor o <i>Value Stream Mapping</i> (VSM).....	213
Implementación del vsm en la construcción	215
Elaboración del mapa de flujo de valor.....	216
Herramientas para la identificación y eliminación de pérdidas.....	219

Clasificación y cuantificación de pérdidas	220
El muestreo de trabajo como herramienta para identificar pérdidas	224
El ciclo de mejoramiento (PHVA)	234
Diagrama de causa-efecto o diagrama de <i>Ishikawa</i>	235
Formularios de identificación de pérdidas (FIP)	238
Carta de balance de cuadrilla	241
Medición del flujo de trabajo en la construcción	242
Medición de las tasas de producción	244
Diseño de la prueba de campo para la obtención de datos de consumo y rendimiento de mano de obra	247
Análisis estadístico para la obtención de datos de consumos y rendimientos de mano de obra	251
Determinación de los factores de afectación	255
Línea de balance (<i>Line of balance</i>) y planificación basada en localización (<i>Location based management</i>)	262
Características del LBMS	264
Diferencias y similitudes del LBMS con el CPM	265
Síntesis del capítulo	267
Implementación de <i>Lean Construction</i>	269
Implementación de <i>Lean</i> en la manufactura	270
Medición del desempeño en <i>Lean Manufacturing</i>	274
Implementación de <i>Lean Construction</i>	279
Barreras y factores clave de éxito para la implementación de <i>Lean Construction</i>	281
Medición del desempeño en la construcción	286
Los modelos de madurez (MM)	295
Los modelos de madurez en la construcción	299

<i>Standardized Process Improvement for Construction Enterprises (SPICE)</i>	300
<i>Construction Supply Chain Maturity Model (CSCMM)</i>	300
<i>Construction Industry Macro Maturity Model (CIM3)</i>	301
<i>Lean Construction Maturity Model (LCMM)</i>	302
<i>Systemic Lean Construction Evolution Model (SLC-EModel)</i>	308
Síntesis del capítulo	311
 <i>Building Information Modeling (BIM) y Lean Construction</i>	313
Orígenes de BIM	316
Definición de BIM	317
Dimensiones del modelo BIM	322
<i>Level of Development (LOD)</i>	324
Interoperabilidad en BIM	328
Usos BIM	330
La documentación de los procesos de la construcción y BIM	339
Plan de ejecución BIM (PEB)	344
Madurez BIM	349
Estado de implementación BIM en el mundo	359
Sinergia entre BIM y <i>Lean</i>	367
Síntesis del capítulo	375
 Sostenibilidad y <i>Lean Construction</i>	377
<i>Alejandro Vásquez-Hernández</i>	
Desarrollo + sostenibilidad	377
Desarrollo: el gran escape	377

(In)sostenible: la gran aceleración.....	379
Desarrollo + sostenibilidad: necesaria discontinuidad.....	383
Construcción + sostenibilidad.....	388
Industria de la construcción. Crecimiento económico y degradación ambiental	388
Construcción sostenible	391
<i>Lean Construction</i> y construcción sostenible.....	395
Relaciones conceptuales.....	398
Aportes de la aplicación de <i>Lean Construction</i> a la sostenibilidad.....	402
Observaciones generales.....	405
Síntesis del capítulo.....	407
Referencias.....	409

Índice de tablas

Tabla 1.	Conceptos y aplicación de la producción en el modelo <i>Ford T</i>	32
Tabla 2.	Fundamentos del TPS.....	38
Tabla 3.	Principios empresariales del modelo Toyota	39
Tabla 4.	Principios básicos de <i>Lean</i> , según Womack y Jones (1996).....	44
Tabla 5.	Categorías de pérdidas o desperdicios (muda) en la producción	46
Tabla 6.	Las ocho categorías de pérdidas, según Terry y Smith (2011)	47
Tabla 7.	Nueve principios de la naturaleza del valor.....	51
Tabla 8.	Clasificación del valor, según Wandahl (2004)	52
Tabla 9.	Clasificación del valor, según Emmitt, Sander y Christoffersen (2005).....	53
Tabla 10.	El diseño desde los modelos de producción	68
Tabla 11.	Principios de producción.....	69
Tabla 12.	Principios heurísticos de <i>Lean Construction</i>	70
Tabla 13.	Comparación entre los principios del pensamiento <i>Lean</i> (Womack) y <i>Lean Construction</i> (Koskela)	71
Tabla 14.	Principios básicos de <i>Lean Construction</i> en el marco de las etapas de un proyecto de construcción	78
Tabla 15.	Extensión de los principios de <i>Lean Construction</i> de acuerdo con Koskela <i>et al.</i> (2010).....	78
Tabla 16.	Diferencias entre el sistema tradicional y sistemas <i>Lean</i>	84
Tabla 17.	Problemas de los modelos tradicionales de entrega de proyectos	84
Tabla 18.	Comparación entre sistemas tradicionales e IPD	93
Tabla 19.	Matriz de resultados en un proyecto IPD	99
Tabla 20.	Matriz de responsabilidades en un proyecto IPD en sus diferentes fases.....	101
Tabla 21.	Desafíos para la implementación del IPD.....	107
Tabla 22.	Matriz de relacionamiento con terceros	111

Tabla 23.	Comparación entre modelos emergentes de entrega de proyectos (<i>Project Delivery</i>)	112
Tabla 24.	Lista de chequeo para el planteamiento del plan general de obra	137
Tabla 25.	Esquema básico de identificación de restricciones.....	139
Tabla 26.	Detalle de las categorías de restricciones	139
Tabla 27.	Esquema general para control de liberación de restricciones	141
Tabla 28.	Esquema de seguimiento a restricciones.....	141
Tabla 29.	Lista de chequeo para el planteamiento del plan intermedio de obra.....	143
Tabla 30.	Propuesta de participantes en la reunión semanal de planificación en el LPS	146
Tabla 31.	Registro del control diario de producción	148
Tabla 32.	Ejemplo de planilla para registro del plan semanal en el LPS.....	152
Tabla 33.	Detalle de CNC en el LPS	153
Tabla 34.	Ejemplo del análisis de CNC utilizando la técnica de los <i>cinco</i> <i>por qué</i>	154
Tabla 35.	Ejemplo de la definición de criterios y variables para la calificación integral de contratistas.....	156
Tabla 36.	Ejemplo del registro de la calificación integral semanal	156
Tabla 37.	Ejemplo de calificación acumulada de contratistas.....	157
Tabla 38.	Lista de chequeo para el desarrollo del plan semanal de obra.....	158
Tabla 39.	Desarrollos computacionales para la implementación del LPS.....	159
Tabla 40.	Pasos para la implementación del LPS.....	172
Tabla 41.	Herramientas <i>Lean</i> utilizadas en diferentes entornos empresariales de empresas de clase mundial.....	176
Tabla 42.	Clasificación de técnicas <i>Lean</i>	177
Tabla 43.	Clasificación de herramientas <i>Lean</i>	178
Tabla 44.	Diferentes definiciones de la gestión visual.....	179
Tabla 45.	Antecedentes históricos de la gestión visual	181
Tabla 46.	Funciones de la gestión visual	184
Tabla 47.	Esquema del diseño de un sistema de gestión visual.....	192
Tabla 48.	Ventajas de un buen estudio de <i>Layout</i>	202
Tabla 49.	Diferencias entre las 5S y programas de orden y limpieza.....	207
Tabla 50.	Conceptos de las 5S.....	207

Tabla 51.	Frecuencia de uso de las cosas y su localización en el puesto de trabajo.....	209
Tabla 52.	Beneficios de la implementación de las etapas de las 5S	211
Tabla 53.	Pasos para una efectiva implementación de las 5S.....	212
Tabla 54.	Símbolos utilizados para construir un VSM.....	217
Tabla 55.	Estudios sobre cuantificación de pérdidas	221
Tabla 56.	El concepto de pérdidas	223
Tabla 57.	Taxonomía de pérdidas, según el modelo TFFV de Koskela (2000) ...	224
Tabla 58.	Resultados de estudios de pérdidas en Chile y Colombia 1993-2013	226
Tabla 59.	Categorías de pérdidas en Chile y Colombia 1993-2013	228
Tabla 60.	Tabla de fuentes de pérdidas en Chile.....	229
Tabla 61.	Causas que originan las pérdidas en muestreo de trabajo Colombia.....	230
Tabla 62.	Formato registro de la prueba de la ronda y resultado obtenido.....	231
Tabla 63.	Formato registro de la prueba de los cinco minutos (porcentajes de tiempo por categoría)	232
Tabla 64.	Registro de las causas de tiempos improductivos y de soporte en la prueba de los cinco minutos.....	233
Tabla 65.	Pasos del ciclo de mejoramiento PHVA.....	235
Tabla 66.	Metodología de resolución de problemas con el diagrama de Ishikawa.....	237
Tabla 67.	Ejemplo de formulario de identificación pérdidas (FIP) para maestros o inspectores	239
Tabla 68.	Ejemplo del formulario de identificación de pérdidas (FIP) para obreros.....	240
Tabla 69.	Rangos de eficiencia en la productividad	246
Tabla 70.	Factores de afectación que inciden sobre el rendimiento/consumo de mano de obra.....	246
Tabla 71.	Fórmulas para la obtención del tamaño de muestra.....	249
Tabla 72.	Formato para el registro de los datos en un estudio de rendimientos y consumos de mano de obra.....	251
Tabla 73.	Estadística básica obtenida en un estudio de rendimientos y consumos der mano de obra.....	254
Tabla 74.	Valoración de los factores de afectación de acuerdo con su impacto en el rendimiento o consumo.....	255

Tabla 75.	Descripción de actividad en estudio sobre consumos de mano de obra.....	258
Tabla 76.	Resultados análisis estadístico para determinar consumo de mano de obra.....	259
Tabla 77.	Análisis de variables en factores de afectación	260
Tabla 78.	Análisis multivariado	261
Tabla 79.	Regresión lineal de consumo vs. actitud hacia el trabajo	261
Tabla 80.	Categorías de los factores claves para una implementación de <i>Lean</i> ...	272
Tabla 81.	Factores claves para un implementación de <i>Lean</i>	272
Tabla 82.	Principios rectores del modelo Shingo.....	274
Tabla 83.	Determinantes para la implementación de <i>Lean</i>	275
Tabla 84.	Componentes del <i>Lean Enterprise Model</i>	276
Tabla 85.	Métricas del <i>Lean Enterprise Model</i>	277
Tabla 86.	Métricas para medir la implementación de <i>Lean</i>	278
Tabla 87.	Barreras y FCE para la implementación de LC en Colombia.....	282
Tabla 88.	Barreras para la implementación de <i>Lean Construction</i> en el entorno internacional	283
Tabla 89.	Recomendaciones para una exitosa implementación de <i>Lean</i> en el entorno internacional	285
Tabla 90.	Características de algunos SMD utilizados en la industria AIC.....	289
Tabla 91.	Características de algunas iniciativas para evaluar el uso de prácticas LC.....	291
Tabla 92.	Niveles de madurez en el CMM.....	297
Tabla 93.	Modelos de madurez para la gestión de proyectos.....	298
Tabla 94.	Niveles de madurez del modelo CSCMM	301
Tabla 95.	Niveles de madurez del modelo CIM3	302
Tabla 96.	Esquema general del modelo LCMM	302
Tabla 97.	Niveles de madurez del modelo LCMM.....	303
Tabla 98.	Factores y atributos del modelo LCMM	304
Tabla 99.	BG&P asociados a los atributos de los factores en el modelo LCMM.....	305
Tabla 100.	Ejemplo de declaraciones ideales para BG&P en el modelo LCMM.....	307

Tabla 101. Ejemplo de cálculo de madurez en la organización, utilizando el modelo LCMM.....	307
Tabla 102. Esquema general del modelo SLC-EModel.....	309
Tabla 103. Niveles de madurez en el modelo SLC-EModel	309
Tabla 104. Atributos de los factores en las categorías del modelo SLC-EModel ...	309
Tabla 105. Definiciones de BIM.....	318
Tabla 106. Dimensiones del modelo BIM	322
Tabla 107. Niveles LOD de acuerdo con BIM Fórum.....	325
Tabla 108. Propósitos y objetivos de uso BIM.....	331
Tabla 109. Descripción de los usos BIM.....	334
Tabla 110. Temas a documentar en el proceso BIM	340
Tabla 111. Tablas de OmniClass™ para la clasificación de la información en BIM.....	341
Tabla 112. Tablas de fases del proyecto de construcción, de la clasificación de OmniClass™	343
Tabla 113. Estructura de la matriz de elementos, fase, disciplina, y LOD a implementar.....	345
Tabla 114. Relación entre objetivos y usos BIM	346
Tabla 115. Usos BIM en las fases del ciclo de vida	347
Tabla 116. Campos de BIM.....	350
Tabla 117. Etapas de BIM.....	352
Tabla 118. Matriz de madurez BIM.....	355
Tabla 119. Ejemplos de estándares y guías BIM en el mundo	359
Tabla 120. Relación entre los principios <i>Lean</i> y BIM documentada en artículos científicos.....	371
Tabla 121. Relación entre los beneficios BIM y los principios <i>Lean</i>	373
Tabla 122. Pérdidas y su relación con recursos ambientales.....	399
Tabla 123. Efectos de la aplicación de <i>Lean Construction</i> sobre la sostenibilidad.....	402

Índice de ilustraciones

Ilustración	1. La casa del TPS o casa <i>Lean</i>	40
Ilustración	2. Esquema del sistema tradicional de producción	63
Ilustración	3. Principio de descomposición del modelo de transformación	64
Ilustración	4. Modelo de flujo en la producción.....	65
Ilustración	5. Esquema conceptual de la generación de valor	66
Ilustración	6. Principios relacionados con la creación de valor	67
Ilustración	7. Modelo TFV.....	80
Ilustración	8. Estructura del <i>Lean Project Delivery System</i> (LPDS)	89
Ilustración	9. Fases del proyecto de construcción en IPD vs. sistemas tradicionales	97
Ilustración	10. Curva de MacLeamy.....	106
Ilustración	11. Línea de tiempo en el desarrollo del LPS	117
Ilustración	12. Esquema del sistema tradicional de planificación de proyectos	118
Ilustración	13. Esquema del nuevo sistema de planificación y control de proyectos	119
Ilustración	14. Esquema del ciclo de planificación y control del LPS	120
Ilustración	15. Detalle del ciclo de planificación y control del LPS	120
Ilustración	16. Diseño del sistema de producción.....	121
Ilustración	17. Jerarquía de la estructura del LPS	122
Ilustración	18. Sesión de planificación colaborativa <i>Pull Planning</i> en empresa colombiana	124
Ilustración	19. Medición del desempeño del LPS mediante el PPC (PAC)	128
Ilustración	20. Planteamiento general <i>Layout</i> proyecto ejemplo.....	133
Ilustración	21. Esquema del plan general visualizado mediante diagrama de Gantt	134
Ilustración	22. Esquema de plan general visualizado mediante línea de balance....	136
Ilustración	23. Modelo 4D, visualizado mediante <i>Naviswork</i>	136
Ilustración	24. Ejemplo de análisis de tiempos para compra de materiales.....	138

Ilustración 25. Ejemplo reunión semanal de LPS.....	147
Ilustración 26. Ejemplo de despliegue de resultados de la reunión semanal de LPS.....	149
Ilustración 27. Flujograma para la realización semanal del LPS.....	150
Ilustración 28. Esquema de las CNC en LPS.....	152
Ilustración 29. Ejemplo de Pareto para el análisis de las CNC en LPS.....	154
Ilustración 30. Ejemplo de gráfico semanal y acumulado del PAC (PPC)	155
Ilustración 31. Ejemplo de despliegue compromisos semanales.....	157
Ilustración 32. Ejemplo de cartelera semanal de desempeño.....	158
Ilustración 33. Estructura de <i>software</i> de apoyo al LPS.....	162
Ilustración 34. Estructura de <i>Integrated Production Scheduler</i> (IPS)	163
Ilustración 35. Flujo de trabajo para <i>Lewis System</i>	164
Ilustración 36. Tablero generador de información CONWIP	166
Ilustración 37. Plataforma GICO.....	167
Ilustración 38. Plataforma IMPERA.....	169
Ilustración 39. Plataforma COCOPLAN.....	169
Ilustración 40. Lugar de trabajo donde se emplea la gestión visual	183
Ilustración 41. Ejemplo de indicador visual con instrucción de trabajo.....	186
Ilustración 42. Dispositivos a prueba de errores <i>Poka-Yoke</i>	188
Ilustración 43. Aviso de apoyo a la seguridad y salud en el trabajo.....	189
Ilustración 44. Ejemplo de visualización de trabajo de construcción a partir del escaneo láser	189
Ilustración 45. Ejemplo de gestión visual a partir del despliegue de buenas y malas prácticas en obra.....	191
Ilustración 46. Modelo para el planteamiento de un modelo de gestión visual en la construcción	192
Ilustración 47. Gestión visual en la seguridad y salud en el trabajo	195
Ilustración 48. Ejemplo de reunión diaria	196
Ilustración 49. Ejemplo de tablero WIP y trabajo en ejecución	196
Ilustración 50. Ejemplo <i>Obeya Room</i> (<i>gran salón</i>)	197
Ilustración 51. Ejemplo de tablero <i>Scrum</i>	198
Ilustración 52. Ejemplo de tablero Kanban	199
Ilustración 53. Esquema general de <i>Layout</i> de obra	204

Ilustración 54. Gestión visual para el despliegue de <i>Layout</i> de obra	205
Ilustración 55. Despliegue del estudio de <i>Layout</i> en la reunión de planificación semanal.....	206
Ilustración 56. Criterios de clasificación de <i>seiri</i> en las 5S.....	208
Ilustración 57. Antes y después de implementar 5S en un almacenamiento de obra.....	213
Ilustración 58. Ejemplo de seguimiento a la implementación de las 5S en obra	213
Ilustración 59. Ejemplo de plantilla On Line para realizar un VSM	217
Ilustración 60. Ejemplo de mapa de flujo de valor de un proceso de mampostería.....	218
Ilustración 61. Ejemplo de VSMM del desarrollo de un proyecto de construcción	219
Ilustración 62. Paretos de tiempos improductivos por categorías	233
Ilustración 63. Pareto de esperas de los tiempos improductivos.....	234
Ilustración 64. Esquema del ciclo PHVA.....	235
Ilustración 65. Esquema básico del diagrama de causa-efecto	236
Ilustración 66. Ejemplo de la utilización del diagrama de causa-efecto en la construcción	238
Ilustración 67. Ejemplo de carta balance cuadrilla en actividad de construcción ...	242
Ilustración 68. Procedimiento para el análisis estadístico de datos en un estudio de rendimientos de mano de obra.....	253
Ilustración 69. Estructura de la jerarquía de localización para nivel superior e intermedio, en un proyecto de construcción	264
Ilustración 70. Comparación en la visualización de un proyecto en LBMS y CPM	266
Ilustración 71. Marco de referencia para la implementación <i>Lean</i>	273
Ilustración 72. Pasos para transformar con éxito una organización.....	280
Ilustración 73. El triángulo <i>Lean</i>	294
Ilustración 74. Categorización de la definición de <i>Lean</i>	321
Ilustración 75. Dimensiones BIM y su utilización	324
Ilustración 76. Propósitos y características de los usos de BIM	331
Ilustración 77. Usos secundarios de BIM	331
Ilustración 78. Usos BIM	333

Ilustración 79. Tetralogía.....	339
Ilustración 80. Campos de BIM	351
Ilustración 81. Estado de la implementación de BIM en el mundo.....	367
Ilustración 82. Funcionalidades BIM y principios <i>Lean</i>	371
Ilustración 83. Demanda ecológica y biocapacidad	380
Ilustración 84. Esquema de los sistemas productivos orgánico e industrial.....	382
Ilustración 85. Demanda social de productos y servicios y, ecoeficiencia	386
Ilustración 86. Líneas de actuación para la ecoeficiencia	387
Ilustración 87. Desarrollo del uso global de materiales de construcción, betas minerales y minerales industriales, portadores de energía fósil y biomasa	389
Ilustración 88. Aplicación de la idea y condición del desarrollo sostenible al campo de la construcción	392
Ilustración 89. Enfoque de la gestión de proyectos de construcción sostenibles.....	392
Ilustración 90. Construcción sostenible	395
Ilustración 91. Artículos publicados sobre sinergias entre <i>Lean Construction</i> y construcción sostenible.....	396
Ilustración 92. Contribución de <i>Lean Construction</i> a la sostenibilidad.....	397
Ilustración 93. <i>Lean Construction</i> y construcción sostenible.....	401
Ilustración 94. Efectos de <i>Lean Construction</i> sobre la sostenibilidad	404
Ilustración 95. Síntesis del capítulo.....	408

Prólogo

Investigadores alrededor de todo el mundo se han centrado en el estudio de la productividad en la Industria de la Construcción; para esto, han tomado modelos y técnicas de producción adaptadas de otras industrias más avanzadas, como el sector automotor. Uno de estos enfoques para mejorar la productividad es el Toyota Producción System (LPS), desarrollado ampliamente por Toyota en Japón desde 1950, y aplicado en otros sectores industriales bajo la denominación de *Lean Production*.

Estudiosos de otros países como el profesor finlandés Lauri Koskela, que en el año 1992 introdujo el concepto *Lean* en construcción, y otros investigadores, han promovido la aplicación de esta filosofía alrededor del mundo buscando mejorar los procesos en una industria que se ha caracterizado por andar a la zaga de los diferentes sistemas más productivos y eficientes.

Por su parte, en Latinoamérica, Chile y Brasil, desde el ámbito académico, han sido los países pioneros en la difusión del *Lean Construction*, que ha sido recibido e implementado por algunas empresas constructoras que buscan mejorar el desempeño de sus proyectos.

En Colombia, desde el año 2002, como lo reportan diferentes autores como Castiblanco *et al.* (2019), Echeverry (2007), se realizaron las primeras investigaciones y aplicaciones de *Lean Construction*, en las cuales, la herramienta implementada inicialmente fue *Last Planner System* (LPS).

Se destaca a la Universidad EAFIT como pionera en la implementación de *Lean Construction* en el país mediante proyectos colaborativos con compañías constructoras, patrocinados por Colciencias, ahora Minciencias, y apoyados por la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL) (Echeverry, 2007). Como resultado de este trabajo desarrollado por más de diecisiete años y liderado por el Profesor Luis Fernando Botero Botero, del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad EAFIT, se presenta este libro.

Este texto del profesor Botero Botero, quien ha estudiado e implementado *Lean Construction* en empresas constructoras del país y ha

participado en diferentes congresos nacionales e internacionales sobre el tema, es de una riqueza bibliográfica, y se constituye como una fuente de consulta importante para los estudiosos e interesados en el desarrollo de la industria de la construcción en nuestro país y como modelo en otros países latinoamericanos. El libro ilustra, desde su primer capítulo, la evolución de los sistemas de producción, con el comienzo de la primera Revolución Industrial e invención de las máquinas a vapor, seguido de las líneas de producción masivas de automóviles de Henry Ford, hasta la aplicación de metodologías y técnicas modernas como el *Lean Production* y su posterior aplicación a la construcción, denominada *Lean Construction*.

En sus capítulos siguientes se presentan herramientas innovadoras aplicables a la construcción, como *Lean Project Delivery System* (LPDS), *Integrated Project Delivery* (IPD), *Last Planner System* (LPS), y se exploran otras herramientas desarrolladas en el entorno de la manufactura y que son aplicables en el sector de la construcción, como *Visual Management*, estudios de *Layout*, las 5S, *Value Stream Mapping*, ciclo de mejoramiento (PHVA), el diagrama de causa-efecto o Ishikawa, *Location Based Management*, medición de pérdidas, tasas de producción, entre otras. El libro se caracteriza por su practicidad y facilidad de uso mediante una variedad de tablas que permiten su entendimiento y aplicación.

Principio, herramientas e implementación de Lean Construction aborda también temáticas que, aunque independientes inicialmente, hoy son consideradas en la integración con *Lean Construction*, por sus sinergias y resultados positivos, como *Building Information Modeling* (BIM) y la construcción sostenible.

Esta obra merece una amplia difusión por su riqueza bibliográfica, y aplicabilidad, la cual se destaca por la variedad de herramientas que presenta para mejorar la industria de la construcción, tanto en sus procesos como en sus productos, logrando jalonar el desarrollo de la Industria de la Construcción hacia estándares más elevados.

Jorge Arturo Gómez Aristizabal
Director Técnico y Administrativo
Muros y Techos S.A.

Prefacio

Veinte años atrás, al inicio de mi actividad académica en la Universidad EAFIT, y después de la experiencia obtenida por la práctica profesional en una reconocida empresa de construcción colombiana, surgen en mí diferentes inquietudes sobre el desempeño del sector de la construcción y el rol de los profesionales participantes en el desarrollo de los proyectos. Aspectos conocidos y aceptados por todos como la deficiente planificación, los problemas de calidad, el incumplimiento de plazos, los altos niveles de inseguridad, los sobrecostos de ejecución, entre otros, son factores que normalmente acompañan la gestión de proyectos de construcción y una radiografía de su resultado final. Con frecuencia, este pobre desempeño es aceptado por algunos y justificado en las condiciones particulares de los proyectos y su entorno. Recientemente hemos convivido con situaciones anormales y desde todo punto de vista inadmisibles –como la pérdida de vidas humanas y del patrimonio provocados por fallas en los diseños o en la construcción de los proyectos, sumado a la creciente corrupción– que deterioran la imagen de un sector fundamental para el crecimiento económico del país y para el desarrollo de la infraestructura necesaria que mejore la calidad de vida de las personas.

Son muchos los campos de acción donde es posible plantear cambios en busca de soluciones a los problemas manifiestos: se requieren cambios en la legislación que permitan mayor transparencia y faciliten la correcta ejecución en proyectos públicos; iniciativas que promuevan la sana competencia y la colaboración de empresas privadas, buscando mejorar la eficiencia en el desarrollo de proyectos a lo largo de su ciclo de vida y generando resultados positivos para todos sus participantes; adecuación de los currículos académicos, repensados a partir de las realidades y necesidades del sector, que generen las competencias necesarias para los nuevos profesionales y donde la ética, los valores y la visión sostenible estén siempre presentes y acompañen la formación profesional.

Somos muchos los responsables de propiciar cambios que permitan restaurar la confianza en el sector, ya que la construcción como industria

aporta considerablemente a la economía del país y brinda soluciones a las necesidades de la sociedad. Por tal motivo, desde esta declaración de responsabilidad y desde la propia actuación en la academia, surge este libro.

El desarrollo de proyectos de investigación sobre administración de la construcción y la necesidad del mejoramiento de la productividad, me llevó a interesarme en teorías y herramientas de gestión de la producción, con una extendida aplicación en la manufactura y con una reciente discusión sobre su aplicación en la construcción. La evolución y transformación de la industria se ha dado paulatinamente desde finales del siglo XIX hasta nuestros días, convirtiendo la producción artesanal en producción industrial, donde el paradigma de la producción en masa prevaleció hasta la aparición de un nuevo paradigma: la producción *Lean*. Fue en el año 2000, y ya en la labor académica, cuando buscando respuestas a mis preguntas encontré en la literatura alguna información sobre la aplicación de este segundo paradigma de producción en la construcción, denominado desde algunos años atrás *Lean Construction*. La pasión generada por el tema fue inmediata y entendí que a partir de su estudio e implementación con algunas empresas interesadas en mejorar su desempeño podríamos aportar a la consolidación de un mejor sector industrial en Colombia.

El aprendizaje inicial conjunto mediante proyectos de investigación aplicada y de carácter colaborativo, derivó en la formulación de cursos de educación continua dirigidos a profesionales y empresas interesadas en el tema y posteriormente al acompañamiento de estas empresas al iniciar procesos de implementación *Lean*. Conocedor del sector por la experiencia laboral previa y teniendo en cuenta las barreras y dificultades mencionadas en investigaciones anteriores para su implementación al interior de las empresas, iniciamos esta aventura que aún no termina y que creo ha sido útil para la difusión de la filosofía *Lean*, sus conceptos, principios y las herramientas prácticas en Colombia. Así se ha ido generando masa crítica que permita concretar la aplicación de *Lean* en la construcción en el país hasta que se adquiriera la dinámica necesaria para que crezca y se sostenga.

Este libro, segundo de mi producción sobre el tema, pues en 2005 se publicó una primera versión exploratoria que recopila resultados de las primeras implementaciones en el país al comienzo de este movi-

miento, pretende recoger experiencias adquiridas a lo largo de quince años de trabajo profesional, y está dirigido tanto a los neófitos como a todos aquellos con alguna experiencia que deseen consolidar sus conocimientos y explorar las posibilidades de cambio a partir de nuevas estrategias de gestión aplicando el pensamiento *Lean* en la construcción. También pretende profundizar en los conceptos fundamentales para el entendimiento de la filosofía, ya que el uso de las herramientas sin una fuerte base conceptual tiende a fracasar normalmente, como lo hemos podido experimentar en algunos procesos de implementación.

Siendo consecuente con lo anterior, el lector encontrará estructurado el libro en dos partes, de las cuales, la primera, compuesta por cuatro capítulos, busca dar a conocer los orígenes y fundamentos de la producción *Lean*, así como la propuesta de *Lean* para la construcción. En la segunda parte se abordan las herramientas prácticas que pueden ser aplicadas en la construcción, acompañadas de diversos ejemplos de aplicación de lo que consideramos buenas prácticas *Lean*. El capítulo siete del libro presenta un análisis y reflexión sobre la implementación de *Lean Construction*, escrito a partir del registro de experiencias en el ámbito internacional y la experiencia obtenida en Colombia con un importante grupo de empresas, que han tomado la iniciativa de interesarse en esta filosofía y han dado pasos importantes en la creación de una cultura *Lean*. Obviamente, también hacen parte de esta reflexión un grupo de experiencias no exitosas por múltiples causas que se abordarán más adelante y que esperamos sean tomadas en cuenta como aprendizaje en nuevos procesos de implementación.

Dada su importancia actual, también merecen ser incluidos como capítulos de este libro dos temas que se desarrollaron con agendas independientes a *Lean Construction* y que hoy, desde una mirada holística de la gestión de proyectos, son fundamentales y comparten los objetivos del pensamiento *Lean*: agregar valor disminuyendo pérdidas para mejorar la eficiencia: el diseño y la construcción virtual (VDC) mediante la metodología de modelado virtual (BIM) y la construcción sostenible.

Explicada la estructura del libro, es importante manifestar mi agradecimiento a la Universidad EAFIT, institución que he encontrado, desde mis inicios en la academia, abierta a apoyar mis proyectos de investigación y que me ha permitido, en este último año, dedicar todos mis esfuerzos a la producción de este libro. Igualmente, al grupo de

empresas que aceptaron la invitación de aprendizaje colaborativo y que siempre han estado dispuestas a participar en nuestro proyecto, con la firme intención de mejorar su desempeño a través de la adopción de esta nueva filosofía en su entorno empresarial.

A todos aquellos que comparten esta pasión y que con su esfuerzo han impulsado el tema en sus empresas, también mis agradecimientos, ya que en momentos donde las barreras parecen ser más fuertes que las intenciones de cambio, me alientan a no desfallecer para continuar con esta difícil cruzada de impulsar la cultura *Lean* en la construcción colombiana.

A los revisores de mi trabajo, también apasionados del tema, los profesores Alejandro Vásquez y Sandra Liliana Cano, y el ingeniero Jorge Gómez, por sus valiosos aportes al mejoramiento del libro. Igualmente, por la producción de gráficas y tablas, a la estudiante María Camila Alzate Pineda.

Por último, dos reflexiones: el éxito en el establecimiento de una cultura *Lean* no radica en elementos individuales. Lo que marca la diferencia es tenerlos a todos juntos integrados en un mismo sistema, buscando el equilibrio entre la participación de las personas en un contexto organizacional que propicie la mejora continua y un sistema de producción (diseño, construcción, operación) enfocado en la generación de valor.

Compartimos igualmente lo expresado por dos de los máximos impulsores y exponentes de la cultura *Lean* en el mundo, Glenn Ballard y Gregory Howell (2005): “Seguimos convencidos de que el desempeño de la industria de la construcción no mejorará de manera sustancial y radical sin la implementación de conceptos y técnicas LEAN” (p. 1).

Un poco de historia

El concepto de *Lean* en la construcción fue desarrollado por Lauri Koskela en 1992 a partir de la publicación del documento “Application of the new production philosophy in construction”,¹ en el cual se presenta una nueva filosofía de producción basada en la comparación entre las bases conceptuales de los nuevos esquemas de producción y los tradicionales –como el de la construcción–. El documento, plantea desde una mirada crítica, la incorporación de la nueva filosofía, enfatizando los desafíos de su implementación en el sector de la construcción (Koskela, 1992).

En 1993 se crea el *International Group For Lean Construction* (IGLC), una red de profesionales e investigadores de la arquitectura, ingeniería y construcción (AIC) alineados en la necesidad de renovar la educación, la investigación y la práctica de estos sectores. A partir del reconocimiento del éxito del enfoque de la producción *Lean* en el sector manufacturero y sus aplicaciones en el diseño, planificación y control de proyectos de construcción, el IGLC acuñó el término *Lean Construction*, que describe un enfoque para diseñar, planificar y llevar a cabo las actividades de construcción minimizando el desperdicio de materiales, tiempos y esfuerzos (pérdidas), buscando el mayor valor posible (Babalola, Ibem y Ezema, 2019). Desde ese momento, diferentes investigadores trabajan en pro de la mejora de esta filosofía, investigando la teoría y las herramientas para el desarrollo de la construcción *Lean* (Monte, Newman y Aquere, 2017).

Antes de ser aplicado en la construcción, la filosofía *Lean* se aplicó en la manufactura. Se considera que el sistema de producción de Toyota (TPS) dio origen a nuevas iniciativas que cambiaron radicalmente la forma de gestionar la producción, en los veinte años posteriores a la terminación de la Segunda Guerra Mundial, extendiéndose rápidamente a diversos lugares del mundo (Womack, Jones, Ross y Chaparro, 2017).

¹ El documento fue publicado por CIFE (*The Center for Integrated Facility Engineering*), centro de investigación de la Universidad de Stanford, que trabaja en temas relevantes para la industria de la arquitectura, la ingeniería y la construcción (AIC).

El recorrido para llegar a los niveles de excelencia de Toyota, a partir del desarrollo de su nuevo modelo de gestión que definió una nueva forma de pensamiento (*pensamiento Lean*)² aplicable a los procesos de diseño, aprovisionamiento, producción, distribución y ventas de sus vehículos, no fue sencillo. Se reconocen algunos antecedentes de modelos de producción previos al TPS que ayudaron a consolidar la filosofía *Lean*. En efecto, en los comienzos de la fábrica Toyota, el ingeniero Taiichi Ohno,³ reconocido gestor del sistema, visitó en varias oportunidades las plantas de producción de autos en Estados Unidos, identificando algunas ineficiencias en tiempos y recursos utilizados, lo que denominó *mudas* (pérdidas), concepto fundamental para el planteamiento del nuevo sistema de producción, y entregando soluciones a las ineficiencias encontradas con el nuevo sistema propuesto. Previa a la producción *Lean*, el sistema de producción prevaleciente era la *producción en masa*, desarrollada por Henry Ford en la Ford Motor Company, que ofreció un cambio radical al pasar de décadas de producción artesanal a la producción en masa.

Por la importancia de la transición entre modelos de producción hasta la consolidación de una nueva filosofía de producción aplicada a la construcción (*Lean Construction*), se hace necesario describir su evolución, ya que, a pesar de presentar cambios radicales entre ellos, algunos aspectos pueden ser considerados comunes o precursores de las nuevas y atrevidas propuestas de gestión.

En este capítulo se desarrolla una descripción de la evolución de los sistemas de producción desde producción artesanal, que evolucionó en la producción en masa; y el contraste con la denominada producción *Lean*, originada en Japón y consolidada después de la Segunda Guerra Mundial.

² El pensamiento *Lean* o *Lean Thinking* se refiere a una forma de pensar enfocada en la identificación de los desperdicios y su eliminación para crear valor a través de procesos más eficientes, concebidos a partir de los principios *Lean*, aplicados inicialmente en el TPS, extendido a otros sectores industriales y a la construcción desde 1992.

³ Taiichi Ohno (1912-1990), ingeniero chino, se considera el creador del TPS para la fabricación de automóviles, caracterizado por altos niveles de productividad y por entregar productos con la calidad requerida, en el momento requerido y en la cantidad exacta, con alto contenido de valor.

La producción artesanal

Bajo el esquema de producción artesanal, el productor artesano, caracterizado por su alta especialización y la utilización de herramientas sencillas, realizaba un producto único, mientras seguía las demandas de su cliente. Como resultado, el volumen de producción era muy bajo y los costos demasiado altos, con diferencias entre productos y poca capacidad para predecir la calidad final, afectada por los métodos artesanales y particulares de producir.

Con la invención de la primera máquina de vapor, atribuible en 1663 a Eduard Somerset, o como sugiere Mijailov (2007), al mecánico ruso I. Polzunov, pero con el reconocimiento de la invención de la máquina que revolucionó el mundo –patentada en 1669 por el ingeniero escocés James Watt–, se dio paso del taller artesanal a la fábrica, donde los artesanos se convirtieron en obreros (Barba, 2010) altamente especializados, que interactuaban con máquinas y laboraban en un solo sitio; donde la productividad dependía esencialmente de las habilidades del obrero, la vigilancia de capataces y la supervisión de ingenieros, sin procedimientos estandarizados ni un sistema de seguimiento del desempeño de la producción (Hoyos, 2018).

La producción artesanal de vehículos

Aunque se reconoce como el primer automóvil del mundo un vehículo propulsado a vapor diseñado por el ingeniero francés Nicolas-Joseph Cugnot en 1779, en 1886 aparece el primer automóvil impulsado por un motor de combustión interna, creación de Karl Benz. Igualmente, la compañía francesa Panhard y Levassor fue la primera empresa creada para producir automóviles en 1889, constituyéndose en 1894 en la principal empresa automovilística del mundo (Womack *et al.*, 2017). Al ser artesanos calificados sus trabajadores, que fabricaban los vehículos a mano en pequeñas cantidades, la empresa se enfocaba en convertir en realidad los deseos particulares de los clientes compradores.

Eran características del incipiente sistema de producción de automóviles las siguientes: a) trabajadores artesanos especializados con procesos de aprendizaje al interior de la compañía y esperanzados en tener su propio taller algún día; b) participación de múltiples proveedores que

producían partes en sus propios y pequeños talleres; c) utilización de máquinas multipropósito para realizar operaciones en piezas de madera o metal; y d) bajos volúmenes de producción (mil autos al año) con baja estandarización. Como resultado, los vehículos producidos estaban dirigidos a un segmento muy pequeño de la población por los costos elevados. Por otra parte, los pequeños fabricantes de piezas a quienes se encomendaba gran parte de la producción no poseían las capacidades económicas para realizar inversiones en tecnología y así subir el nivel y la calidad de la producción.

Este era un escenario propicio para la aparición de un nuevo competidor en el mercado que, con sus novedosas propuestas para la producción de vehículos, cambiaría completamente la visión de la producción artesanal: Henry Ford y la producción en masa.

Henry Ford y la producción en masa

Henry Ford es reconocido por ser el padre de la producción en masa. Su empresa, Ford Motor Company, fundada en 1903 junto a otros once inversionistas y un capital de USD 28.000, inició con la producción de su modelo de competencias 999. Después de este auto, los primeros modelos que vinieron de la compañía Ford fueron el modelo *A* (1903-1904), del cual se fabricaron mil setecientas cincuenta unidades, siendo reemplazado por el *Ford C* (1904). Estos modelos fueron cambiados por el modelo *Ford B* (1905) y más tarde por el *Ford K* (González-Crespo y Vazquez, 2017).

En octubre de 1908, Ford lanzó el modelo *T*, su vigésimo diseño en cinco años, que desde su lanzamiento se convirtió en un éxito por su buen desempeño y precio, convirtiéndose en el auto más vendido en los Estados Unidos y en el mundo, representando en 1921 el 57% de la producción mundial. Las primeras versiones del *Ford T* ofrecían algunas características básicas como que no tenían velocímetro, ni indicador de temperatura o parachoques. Sin embargo, fue aceptado por su facilidad de conducción, reparación y bajo costo (Alizon, Shooter y Simpson, 2009). Su producción se realizó hasta mayo de 1927, cuando fue reemplazado por el rediseñado del modelo *A*, alcanzando una cifra de quince millones de vehículos producidos.

Dentro de las innovaciones reconocidas a Henry Ford para la fabricación de su modelo *T*, está el desarrollo de una plataforma común compartida por toda la familia del modelo para el intercambio de mó-

dulos, componentes, procesos de fabricación y servicios, que buscaba reducir los costos de producción. La parte inferior del vehículo era común, incluyendo el chasis, el motor, los pedales, los interruptores, suspensiones, ruedas, transmisión, tanque de gasolina, volante y luces; mientras el cuerpo de cada modelo era específico, personalizado para responder a las necesidades de los clientes. Un ejemplo interesante del diseño basado en módulos fue la modularidad del modelo *T Touring*, permitiendo a los usuarios tener un auto de cuatro asientos o el equivalente a una camioneta al remover la espalda del auto. Esta estrategia fue definida por Jiao y Tzeng (2004) como la *personalización masiva* utilizada por Ford, donde se responde a las necesidades del cliente manteniendo la eficiencia de la producción en masa. Por tal razón, algunos han argumentado que en Henry Ford aparecen principios de la producción *Lean* (Alizon *et al.*, 2009; Levinson, 2002).

Como parte del éxito de la producción de Ford, se destacan la intercambiabilidad de las partes del vehículo y su sencillez en el montaje. Este logro se consiguió a partir de la utilización del mismo sistema de unidades de medidas y una alta precisión de fabricación en todos los componentes del vehículo a lo largo de la cadena de producción. De esta manera, Ford consiguió eliminar los ensambladores cualificados, disminuyendo costos importantes de producción; a esto se sumaba que cada trabajador recibía las piezas en su sitio de trabajo, lo que aumentaba considerablemente su productividad.

Otra de las características implementadas en su sistema de producción, que buscaba atender la gran demanda del mercado, fue considerar un nuevo esquema de cadena de montaje móvil –diferente al anterior donde los trabajadores se concentraban alrededor del auto en producción–, consistente en dos cintas de metal dispuestas bajo cada rueda del vehículo que recorría toda la fábrica, impulsadas por un sencillo motor eléctrico de bajo costo para que los autos pudieran pasar frente a los obreros a una velocidad fija y donde cada puesto de trabajo tenía una finalidad específica, pues en palabras de Ford “el hombre que pone un tornillo, no pone la tuerca; el hombre que pone la tuerca, no la aprieta” (Citado en Hoyos, 2018, p. 38).

Previo al desarrollo del modelo *T*, el ciclo promedio de trabajo de un ensamblador de Ford era de 514 minutos (8,56 horas), pues cada trabajador debía armar gran parte del vehículo. Con la intercambiabilidad y los puestos fijos de trabajo, el ciclo se redujo a 2,3 minutos y en 1913,

disminuyó a 1,9 minutos, ya que el trabajador permanecía quieto y la cadena móvil imponía ritmos acelerados de trabajo (Womack *et al.*, 2007), con lo cual, Ford Motor Company fabricó en 1914 con 13.000 empleados 300.000 vehículos, mientras que 299 fabricantes más, con 66.350 empleados, produjeron 280.000 autos. Esto demuestra diferencias sustanciales de productividad a favor del nuevo sistema de montaje; acompañado de los beneficios salariales que implementaron para sus trabajadores, que empezaron a recibir USD 5 por día, comparado con los USD 2,34 que devengaban anteriormente, y con lo cual, podían, por ejemplo, convertirse en compradores de los vehículos fabricados por ellos.

La producción en masa fue dominante durante la primera mitad del siglo XX y sus conceptos, emulados por casi todos los demás sectores industriales, permanecen todavía en algunas compañías. Los aportes de la producción en masa pueden ser las siguientes diferencias, presentadas en la Tabla 1 como evolución de la producción artesanal.

TABLA 1. Conceptos y aplicación de la producción
 en el modelo *Ford T*

Concepto	Aplicación
División del trabajo	Realización de una sola tarea sencilla y rutinaria, alcanzando gran productividad. ⁴ Ingenieros industriales y supervisores planificaban y controlaban la actividad para garantizar eficiencia y calidad.
Integración vertical	Todo lo necesario para la producción (materias primas, servicios, etc.), procedía de divisiones internas coordinadas por ejecutivos de la empresa.
Maquinaria automática y con una sola función	Las máquinas ofrecían gran precisión y eliminaban operaciones realizadas por el obrero, como ajustar piezas para cortes, requiriendo trabajadores sin mucha cualificación, entrenados rápidamente para determinado trabajo.
Producto masivo de bajo costo	Fabricación del modelo <i>T</i> en nueve versiones de carrocería, montadas sobre el mismo chasis, con disminuciones continuas en su precio al público. ⁵

Fuente: Elaboración propia.

⁴ En 1915, en su planta de Highland Park, Ford utilizaba siete mil obreros provenientes de granjas de Estados Unidos y de otros lugares del mundo, los cuales, en su mayoría, no conocían el idioma inglés. El realizar sencillas actividades permitió que estos trabajadores que hablaban más de cincuenta idiomas pudieran ser altamente productivos.

⁵ El año 1923 fue el momento cumbre de la producción del modelo *T*, con 2,1 millones de unidades producidas, la máxima alcanzada en la producción en masa, posteriormente

Sin embargo, estas ventajas fueron contrarrestadas por otros aspectos que de alguna forma generaron la desaparición del modelo, denominado por el mismo Ford como *el coche universal*. El disponer de mano de obra no calificada y con altas exigencias de productividad, llevó a la existencia de una elevada tasa de rotación de empleados, que por sus características podían ser reemplazados tan fácil como las partes del auto, lo que algunos consideran la deshumanización de la producción. Por otro lado, las máquinas, diseñadas para acelerar la producción a partir de la fabricación de un solo tipo de componente, se volvieron costosas cuando se requirió flexibilidad, como en el caso de la nueva versión del *Ford A*, rediseñado completamente.

La obsesión de Henry Ford por la integración vertical lo llevó a adquirir fábricas de acero y de vidrio, plantaciones de caucho en Brasil, minas de hierro en Minnesota, buques y un ferrocarril para transportar las materias primas y los productos. Además financió internamente estos negocios sin ayuda de terceros, pues tenía aversión a los bancos e insistía en el control general sobre la compañía, centralizado en una sola persona: él mismo. Aunque el control de la producción estaba bajo control, no fue así con los diferentes negocios desarrollados por la compañía.

Para 1927, año final del modelo *T*, su demanda había rebajado considerablemente, ya que un auto estándar no podía adaptarse a todos los mercados del mundo. Los americanos consideraban que el *Ford T* era pequeño después de los descubrimientos de yacimientos petroleros que trajeron como consecuencia bajos precios del combustible y la posibilidad de adquirir autos más grandes y con mayor autonomía para largos viajes. En Europa, por el contrario, las ciudades más pobladas y con carreteras estrechas, sumado a los altos costos de la gasolina, no era favorable el *Ford T*, que era considerado un auto grande.

Los tres gigantes americanos de la producción en masa

Aunque suele reconocerse a Henry Ford y su compañía como la máxima expresión de la producción en masa, otras dos compañías comparten

alcanzada por el Volkswagen escarabajo. Su valor disminuyó de USD 850, al inicio de su producción, a USD 320 al final de su ciclo.

méritos para ser considerados con dicha distinción. A mediados del siglo xx, los tres gigantes: Ford, General Motor (GM) y Chrysler acaparaban el 95% de las ventas, y seis modelos de las tres compañías, el 80% de todos los autos vendidos (Womack *et al.*, 2007).

Alfred Sloan (1875-1966), presidente de General Motor Corporation, contrario a Ford, promovió la llamada obsolescencia de modelos, con la que los clientes podían renovar sus autos a partir de una oferta más variada de vehículos de diferentes gamas y precios, que no competían entre sí; y al mismo tiempo generaba una fidelización de los clientes a la marca GM. Esta situación posicionó a su empresa como líder en el negocio a partir de los años treinta. Sloan introdujo cambios al sistema de producción, dotando a los vehículos de características no presentes hasta el momento, como diversos accesorios, aire acondicionado y radios, para captar la atención y el interés de los consumidores en los nuevos productos, que presentaban cambios graduales en sus modelos año tras año. A diferencia de Ford, del cual se apartó de la filosofía de reducción de costos a partir de la gran estandarización del producto, logró el objetivo con algunos componentes mecánicos. Sin embargo, el común denominador entre ambos fue la consideración de que el obrero de la planta era otro componente del sistema de producción e igualmente intercambiable, lo cual seguía generando malestar en los sindicatos de trabajadores.

La floreciente industria de producción de automóviles no fue ajena a los ciclos económicos. Crisis como la Gran Depresión de 1929 ocasionaron inestabilidad laboral, pues las compañías, al ver disminuida su demanda, desvincularon a sus trabajadores ya que la mano de obra era considerada un costo variable. Sin embargo, la lucha del movimiento sindical trajo consigo victorias representadas en nuevas normas laborales que afectaron de manera directa la eficiencia de las plantas de producción.

El modelo de producción en masa fue adoptado por fabricantes en Europa. Volkswagen, Fiat y Renault idearon ambiciosos planes de producción en masa que se vieron truncados por la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, después de 1950, estas tres fábricas habían implementado sistemas de producción con los volúmenes de Ford, una abundante y atractiva oferta, incluso para los americanos. Algunos aspectos pue-

den considerarse en Europa como una réplica de lo sucedido en la producción americana de los años treinta: innovaciones tecnológicas incorporadas a los vehículos; y una creciente participación de inmigrantes como fuerza laboral, provenientes de las migraciones de la posguerra. Por estas razones, Womack *et al.* (2007) consideran que “los sistemas de producción europeos no eran más que copias del de Detroit, pero con menos eficacia y precisión en la fábrica” (p. 61).

Los estancamientos de los sistemas de producción en masa en Estados Unidos y Europa contrastan con la aparición en escena de un nuevo modelo de producción, que en lugar de replicar los logros impulsados por Henry Ford, rompe paradigmas y presenta una visión diferente, que posteriormente sería llamado como *Producción Lean*.

El surgimiento de una nueva visión de la producción: Sistema Toyota de Producción (TPS)

Los antecedentes de la producción de automóviles en la fábrica Toyota, de la cual nace el nuevo sistema de producción, se dan en un entorno industrial diferente al de los autos y en una empresa familiar. En 1890, en la fábrica Toyoda Automatic Loom Works, Sakishi Toyoda inventa una máquina para devanar hilo, y en 1897 termina su primer telar automático, dispositivo que detenía el telar cuando se rompía el hilo e indicaba mediante una señal que la máquina requería atención. Con el dinero obtenido por la venta de la patente de uno de sus inventos en 1933, se creó la división de automóviles del grupo industrial, liderada por Kiichiro Toyoda, hijo mayor de su fundador. Cuatro años más tarde, la nueva división de autos se separó de la compañía principal, formando la Toyota Motor Company.

Su historia puede dividirse en dos periodos perfectamente delimitados por la Segunda Guerra Mundial. El primero, caracterizado por la producción del vehículo de turismo *A1* y el camión *G1*. Durante la guerra, la empresa se limitó casi exclusivamente a fabricar camiones por encargo del ejército japonés. Después de la guerra, Toyota decidió incursionar en la fabricación de vehículos comerciales, enfrentando grandes retos para el nuevo negocio: un mercado doméstico pequeño y la necesidad de una

amplia gama de vehículos para múltiples clientes (gobierno, transporte de mercancía a gran escala, transporte en las granjas, vehículos pequeños y funcionales para las pobladas ciudades japonesas); una economía devastada sin la posibilidad de realizar inversiones en tecnología; la existencia de múltiples competidores internacionales dispuestos a defender su participación en el mercado; y leyes laborales proteccionistas buscando mejores condiciones laborales.

La intervención del gobierno japonés prohibiendo la participación de capitales del exterior en la naciente industria de automóviles del Japón, sumado a los altos aranceles para los vehículos importados, generó las condiciones propicias para que Toyota y otras compañías nacientes desarrollaran modelos de producción en masa que hicieran contrapeso a los gigantes norteamericanos. Sin embargo, Toyota, se apartó de estos lineamientos y decidió producir autos con diferentes y nuevos modelos. Conocedores del modelo de producción americano, pues en 1929 Kiichiro Toyoda y en 1950 su sobrino Eijhi y Taiichi Ohno visitaron la planta Ford en Detroit –considerada como la mayor y más eficiente planta de producción de vehículos en el mundo–,⁶ los jóvenes ingenieros consideraron que era posible mejorar en muchos aspectos el sistema de producción americano. Taiichi Ohno, ingeniero chino vinculado inicialmente a la fábrica de telares de la familia Toyoda en 1932 y posteriormente transferido a la Toyota Motor Company en 1943, de la cual llegó a ser director, vicepresidente y miembro del consejo de administración hasta su muerte en 1990, consideraba que intentar producir el mismo producto en grandes volúmenes y cantidades homogéneas generaba todo tipo de pérdidas y los costos ascendían. Por el contrario, fabricar cada artículo una sola vez era más barato (Ohno, 1988). En contraste, el modelo americano propugnaba por reducir los costos a partir de la fabricación de un gran número de unidades de un limitado número de modelos. Las reflexiones sobre el modelo americano concluyeron en la consolidación de un nuevo sistema de pro-

⁶ Para 1950, la Toyota Motor Company había producido 2.685 vehículos, mientras que en el complejo de fábricas Ford en Rouge, Michigan, se producían 7.000 vehículos por día.

ducción (TPS), fundamentado en un sencillo principio: producir solo lo que se demanda y cuando el cliente lo requiera.

Con la fábrica en producción y los problemas macroeconómicos del Japón, la familia Toyoda decide enfrentar la situación despidiendo a la cuarta parte de sus obreros, generando una revuelta que terminó con la toma de la fábrica por parte de los trabajadores. Las negociaciones con el sindicato concluyeron en beneficios para quienes continuaron laborando: empleo de por vida y asignación salarial basada en la antigüedad, con el compromiso de poner todo de su parte para realizar las tareas asignadas y buscando el bien de la empresa, de la cual los trabajadores se sintieron parte fundamental.

Fueron muchas las acciones propuestas por Ohno para mejorar el sistema de producción. Asignó equipos de trabajo dirigidos por un líder, eliminando la supervisión del capataz y propició las condiciones para que los grupos pudieran sugerir mejoras en el proceso. A diferencia de la producción en masa donde los defectos pasan hasta el final de la cadena de producción para no pararla, Ohno diseñó un sistema de señalización de anomalías en cada puesto de trabajo, de tal forma que apenas se identificara un defecto, cualquier trabajador pudiera detener la cadena de montaje para que inmediatamente todo el grupo asumiera la solución del problema. Para evitar la ocurrencia de la anomalía, instruyó a sus trabajadores para que se preguntaran siempre sobre la causa raíz que originaba el problema, instituyendo la metodología de los *cinco ¿por qué?*⁷ Estas sencillas prácticas trajeron como consecuencia una disminución de los reprocesos y una mejora sustancial en la calidad de los vehículos producidos.

Se han identificado en los gestores del TPS diferentes conceptos en los cuales se fundamenta el sistema de producción (Masai, Parrend, y Zanni-Merk, 2015).

⁷ La metodología de los *cinco por qué* consiste en encontrar la causalidad que origina los problemas al preguntarse sucesivamente *por qué*, hasta encontrar la causa raíz. Fue utilizada inicialmente en el TPS y hoy es ampliamente desplegada en sistemas de producción enfocados en el mejoramiento continuo.

Tabla 2. Fundamentos del TPS

Concepto	Desarrollado por	Descripción
<i>Jidoka</i> (Automatización con el toque humano)	Sakishi Toyoda	Propuesto para el telar que se detenía automáticamente cuando se encontraban problemas.
<i>Just in Time</i> (Justo a tiempo)	Kiichiro Toyoda	Eliminar todo lo innecesario e ineficiente en el proceso de producción (pérdidas).
<i>Kanban</i>	Taiichi Ohno	Mejoramiento de la productividad y la eficiencia a partir de tarjetas que contenían la orden de producción y de transporte.
<i>Heiyunka</i> (Nivelación de la producción)		Nivelación del flujo de producción a partir de la demanda.
<i>SMED</i> (Single minute Exchange of die)		Garantizar el cambio de herramienta o equipo en un tiempo de minutos de un solo dígito (10 minutos).

Fuente: Elaboración propia.

El Sistema Toyota de Producción denominado *Lean Production* por Womack, Jones y Ross,⁸ ha sido mencionado de diversas maneras: manufactura de clase mundial, *Lean Manufacturing*, producción ajustada, entre otras. Son muchas las explicaciones que se han dado para justificar cómo Toyota ha logrado sostener su filosofía a través del tiempo. En 2004, el ingeniero Jeffrey K. Liker, profesor de la escuela de Ingeniería de la Universidad de Michigan y conocedor por más de veinte años del TPS, como resultado de múltiples visitas al Japón y después de entrevistar a trabajadores y ejecutivos de la compañía, publica el libro *The Toyota Way, 14 management principles from the World's Greatest Manufacturer*. Estructurado en tres partes, el libro presenta en su primera sección la historia y los éxitos de Toyota mediante la adopción de un nuevo paradigma que impacta el mundo de los negocios. Una segunda parte da cuenta de los catorce principios de gestión del modelo Toyota,

⁸ Investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) desarrollaron el programa internacional de vehículos motorizados (PIVM). Durante cinco años investigaron los factores de producción que condujeron al éxito al sector de automóviles en el mundo y lo difundieron a través del libro *The Machine that changed the world*.

encontrados en su investigación. La última parte del libro explica cómo crear el modelo Toyota en una organización.

Los principios de gestión del TPS

Estructurados en cuatro grupos, los siguientes son los principios del modelo de negocio de Toyota.

TABLA 3. Principios empresariales del modelo Toyota

Grupo	Principio
Filosofía a largo plazo	1. Fundamente sus decisiones de gestión en una filosofía del largo plazo, a expensas de los resultados financieros en el corto plazo.
El proceso correcto produce resultados correctos	2. Cree procesos de flujo continuo para que los problemas salgan a flote.
	3. Utilice sistemas <i>Pull</i> para evitar producir en exceso.
	4. Nivele la carga de trabajo (<i>Heijunka</i>).
	5. Cree la cultura de parar a fin de resolver los problemas, para obtener la calidad desde la primera vez.
	6. Las tareas estandarizadas son el fundamento de la mejora continua y la autonomía del trabajador.
	7. Utilice el control visual para que no se oculten los problemas.
	8. Use solo tecnología fiable y probada al servicio de la gente y sus procesos.
Para agregar valor, se debe desarrollar a las personas	9. Haga crecer a los líderes para que comprendan el trabajo, vivan la filosofía y enseñen a los otros.
	10.Desarrolle personas y equipos excepcionales que sigan la filosofía de la empresa.
	11.Respete a sus socios y proveedores, desafiándoles y ayudándoles a mejorar.
Encontrar la causa raíz de los problemas permite una organización que aprende	12.Vaya véalo por usted mismo para comprender a fondo la situación.
	13.Tome decisiones por consenso lentamente, considerando todas las opciones e impleméntelas rápidamente.
	14.Conviértase en una organización que aprende, mediante la reflexión constante y la mejora continua.

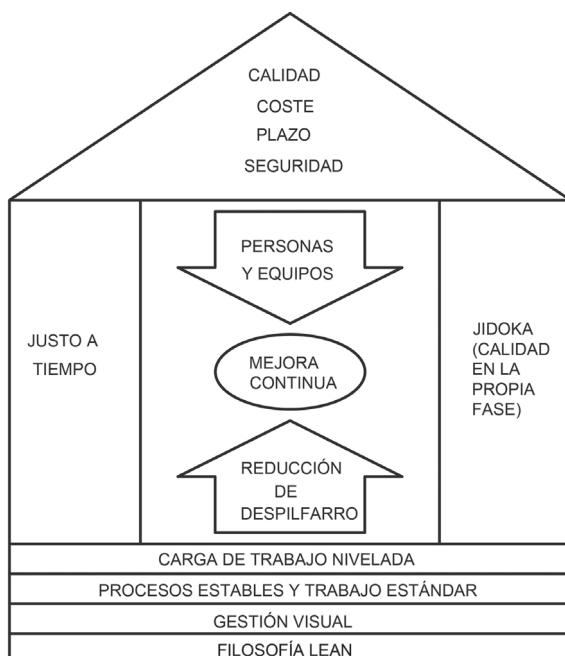
Fuente: Elaboración propia basado en *Las claves del éxito de Toyota* (Liker, 2006).

Liker identifica dos pilares fundamentales sobre los cuales se sustenta el éxito del TPS: *el mejoramiento continuo*, mediante la creación

de un ambiente de aprendizaje que estimule los cambios permanentes, ambiente que solo puede ser logrado cuando existe el *respeto por las personas*, segundo pilar del TPS, garantizando la seguridad, el bienestar y una buena calidad del entorno laboral de sus empleados y buscando “la complicidad de los miembros del equipo con una participación activa en la mejora de los trabajos” (Liker, 2006, p. 12).

Desde la implementación del TPS, la compañía se dedicó a mejorar su sistema de producción en cada una de sus plantas, sin documentarlo. Ante la necesidad de transmitir lo desarrollado y aprendido por años a sus empleados y proveedores, un directivo de la organización, Fujio Cho, discípulo de Taichii Ohno, diseñó una representación gráfica que muestra en esencia los principios del TPS. El modelo denominado *la casa del TPS* es una analogía del sistema de producción con la estructura de una vivienda que debe perdurar en el tiempo, es decir, está compuesta de unos cimientos, pilares que la sostienen y un techo que le da la cobertura.

ILUSTRACIÓN 1. La casa del TPS o casa *Lean*



Fuente: Adaptado del modelo de producción de Toyota (Liker, 2006).

Los cimientos, que dan estabilidad a la casa (sistema de producción), están formados por la implementación de una filosofía y una cultura. Los pilares son las herramientas *Lean*, el JIT (fabricar solo lo que se necesita, en la cantidad que se necesita y cuando se necesita) y *Jidoka*, que consiste básicamente en la premisa de no dejar pasar un defecto a la siguiente operación, liberando a las personas de las máquinas. La cubierta representa todo lo que se ve y traduce en los resultados, la calidad, los costos, la seguridad, el tiempo de entrega, buscando mejorar todos estos aspectos. En el centro de la casa se encuentran las personas comprometidas en eliminar toda fuente de desperdicio a través de un proceso de mejora continua.

Algunos autores han presentado también sus propias definiciones del TPS. Monden (1983, citado por Koskela, 1992), considera el TPS como un sistema de producción de Toyota, que elimina completamente elementos innecesarios en la producción para reducir los costos, produciendo las unidades necesarias, en el tiempo requerido, a partir del control y el aseguramiento de la calidad y el respeto por las personas.

Por su parte, Shinohara (1988), como lo cita Koskela (1992), describe el sistema de producción de Toyota como la búsqueda de una tecnología de producción que utiliza una cantidad mínima de equipos y mano de obra, para producir bienes sin defectos en el menor tiempo posible con la menor cantidad de inventarios y que considera como desperdicio cualquier elemento que no contribuya al cumplimiento de la calidad, precio o plazo de entrega requerido por el cliente, esforzándose por eliminar todos los desperdicios a través de los esfuerzos concertados por la administración, la investigación y el desarrollo y los demás departamentos de la empresa.

Síntesis del capítulo

Después de la Primera Guerra Mundial, Alfred Sloan de General Motor y Henry Ford plantearon cambios radicales en la manera de producir automóviles, dejando atrás los conceptos, hasta entonces relevantes, de la producción artesanal y para adentrarse en la era de la producción en masa. Fueron grandes los aportes realizados a la manufactura por los gigantes americanos de la producción en masa, modelo que fue replicado en Europa, sin el éxito de sus pioneros. En Japón, una fábrica surgida

por iniciativa familiar y con conocimientos sobre el modelo americano, se aventuró a plantear un sistema de producción que buscara, por otros medios, igual eficiencia, productividad y calidad. Surgió entonces el Sistema Toyota de Producción (TPS), cuyos fundamentos y resultados son difundidos a partir de que investigadores del MIT desarrollaron el programa internacional de vehículos motorizados (PIVM) y durante cinco años investigaron los factores de producción que condujeron al éxito al sector de automóviles en el mundo, dándolo a conocer a través de libro *The Machine that Changed the World*, y posteriormente Jeffrey K. Liker, de la Universidad de Michigan, al publicar el libro *The Toyota Way, 14 management principles from the World's Greatest Manufacturer*. Sakishi, Kiichiro y Eijhi Toyoda y Taiichi Ohno aparecen como figuras claves de este nuevo modelo de producción, donde el mejoramiento continuo y el respeto por las personas son considerados los pilares fundamentales a partir de los cuales se funda la estructura que permite la consolidación, crecimiento y estabilidad en el tiempo del sistema de producción, tipificado en la figura conocida como *la casa de la calidad*.