

DEFINICIÓN DE UN MARCO DE REFERENCIA PARA
IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS *lean manufacturing*
MEDIANTE HERRAMIENTAS *IoT* PARA SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN INDUSTRIAL.

Proyecto de Trabajo de Grado

Cristhian David Fernández Morales

Juan José Mulato Agredo

Directora:

MSc. Luisa Maria Tumbajoy

Codirectora:

PhD. Doyra Mariela Muñoz

Universidad del Cauca

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Noviembre 2021

Índice

1. Capítulo 1: Estado del arte y marco conceptual	5
1.1. Introducción	5
1.2. Estado del arte	6
1.3. Marco conceptual	8
1.3.1. <i>Lean manufacturing</i>	8
1.3.2. La Industria 4.0	19
1.3.3. El Internet de las cosas <i>IoT</i>	23
1.3.4. Internet industrial de las cosas <i>IIoT</i>	28
1.3.5. Aplicaciones de <i>lean Manufacturing</i> con <i>IoT</i>	29
1.4. Conclusiones	32
1.5. Aportes	33
2. Capítulo 2: Procedimiento para desarrollar el marco de referencia	34
2.1. Conceptos generales	34
2.1.1. Marco de referencia	34
2.1.2. Métodos de selección	34
2.2. Procedimiento para el desarrollo y evaluación del marco de referencia	35
2.2.1. Caracterización de herramientas <i>Lean I4.0</i>	35
2.2.2. Diseño marco de referencia	36
2.2.3. Evaluación en un caso de estudio	36
2.2.4. Mejora del marco propuesto	36
2.3. Conclusiones	37
2.4. Aportes	37
3. Capítulo 3: Desarrollo del marco de referencia.	38
3.1. Caracterización de herramientas <i>lean</i> seleccionadas.	38
3.2. Diseño de marco de referencia.	40
3.2.1. Selección de herramienta <i>lean</i>	40
3.2.2. Integración de la tecnología <i>IoT</i> en la herramienta <i>lean</i>	46
3.2.3. Selección de la tecnología <i>IoT</i>	48
3.3. Marco de referencia.	52
3.4. Conclusiones.	53
3.5. Aportes	53
4. Capítulo 4: Evaluación del marco de referencia en un caso de estudio	55
4.1. Aplicación del marco de referencia en un caso de estudio	55
4.1.1. Selección de herramienta <i>lean</i>	55
4.1.2. Integración de la tecnología <i>IoT</i> en la herramienta <i>lean</i>	62
4.1.3. Selección de la tecnología <i>IoT</i>	65
4.1.4. Implementación de la herramienta <i>lean IoT</i>	68
4.1.5. Evaluación de la herramienta <i>lean</i> con <i>IoT</i>	77
4.2. Evaluación del marco de referencia.	82
4.3. Conclusiones	83
4.4. Aportes	84
5. Conclusiones y trabajos futuros	85

Índice de figuras

1.	Estructura o casa <i>lean manufacturing</i> [1]	11
2.	Pilares de la industria 4.0. [2]	20
3.	Diagrama de la capa física	26
4.	Diagrama de comportamiento del <i>AHP</i>	41
5.	Estructura de arquitectura general de <i>lean</i> y <i>IoT</i> , fuente propia.	47
6.	Protocolos de <i>IoT</i> [3].	49
7.	Protocolos <i>IoT</i> para nivel de campo (fuente propia)	50
8.	Protocolos <i>IoT</i> para nivel de supervisión y operaciones . (fuente propia)	51
9.	Representación gráfica del marco de referencia.	52
10.	Visualización del flujo de trabajo. (fuente propia)	59
11.	Clasificación del tipo de trabajo. (fuente propia)	59
12.	Visualización de tareas en tablero <i>Kanban</i> . (fuente propia)	60
13.	Trabajo con ayuda del tablero <i>Kanban</i> . (fuente propia)	60
14.	Arquitectura de <i>Kanban</i> [4].	63
15.	Estructura de arquitectura <i>Kanban IoT</i> , fuente propia.	64
16.	Protocolos de <i>IoT</i> [3]	66
17.	convertidor <i>Device-Net</i> a <i>IoT</i>	68
18.	Planta de ensamblaje de circuitos electrónicos impresos	70
19.	Vista superior de planta de ensamblaje de circuitos electrónicos impresos	70
20.	Etapas 1 y 2	71
21.	Etapas 3 y 4	72
22.	Etapas 5 y 6	72
23.	Etapas 7 y 8	73
24.	Etapas 9 y 10	73
25.	Distancia al tablero <i>Kanban</i>	74
26.	Diagrama de recorrido de <i>Kanban</i> tradicional	74
27.	Diagrama de planta con sensores <i>IoT</i>	75
28.	Vista superior de planta con sensores <i>IoT</i>	75
29.	Tablero <i>Kanban</i>	76
30.	Tablero <i>Kanban IoT</i>	76
31.	Ubicación de tecnologías <i>IoT</i>	76
32.	Comparación <i>Kanban</i> tradicional con <i>Kanban IoT</i>	80
33.	Vista general de planta de circuitos aplicada con <i>Kanban IoT</i>	81
34.	<i>Kanban</i> tradicional.	93
35.	<i>Kanban IoT</i>	93

Índice de cuadros

1.	Pilares de la estructura <i>lean</i>	12
2.	Cimientos de la estructura <i>lean</i>	14
3.	Herramientas operativas de <i>lean manufacturing</i>	16
4.	Herramientas de control visual de <i>lean manufacturing</i>	17
5.	Herramientas de diagnóstico de <i>lean manufacturing</i>	17
6.	Métodos <i>lean</i> integrados con industria 4.0	19
7.	Definiciones de las tecnologías de la industria 4.0	23
8.	Componentes del internet de las cosas (<i>IoT</i>)	24
9.	Tecnologías de corto alcance y bajo consumo	26
10.	Tecnologías de alcance extenso y bajo consumo.	27
11.	Modelo de arquitectura <i>OSI</i>	28
12.	Matriz de impacto de herramientas <i>lean</i> sobre tecnologías <i>IoT</i> [5]	39
13.	Escala de valoración de <i>AHP</i>	42
14.	Comparación pareada criterio a criterio.	42
15.	Valores ICA o de Índice de Consistencia de Aleatoriedad.	46
16.	Comparación pareada entre criterios.	56
17.	Peso de cada criterio.	56
18.	Comparación de alternativas con respecto al criterio 1.	57
19.	Comparación de alternativas con respecto al criterio 2.	57
20.	Comparación de alternativas con respecto al criterio 3.	57
21.	Comparación de alternativas con respecto al criterio 4.	57
22.	Comparación de alternativas con respecto al criterio 5.	58
23.	Comparación de alternativas con respecto al criterio 6.	58
24.	Resultados por método del <i>AHP</i>	58
25.	Etapas de línea de ensamble de circuitos de placas electrónicas.	71
26.	Tiempos calculados para el recorrido de cada operarios según su actividad de operación.	77
27.	Tiempos estipulados para ejecución de cada unidad para desarrollar una actividad	77
28.	Comparación <i>Kanban</i> tradicional con <i>Kanban IoT</i>	80

1. Capítulo 1: Estado del arte y marco conceptual

1.1. Introducción

Lean manufacturing es un conjunto de principios y herramientas de gestión de la producción que busca la mejora continua al minimizar los “desperdicios” adquiridos durante un proceso, considerando el término desperdicio como resultado de toda actividad que no agrega valor al modelo de implementación [6]. Los métodos *lean* son soluciones para la mayoría de industrias que requieren mejorar la eficiencia de sus procesos, logrando de esta manera que su aplicación sea una herramienta prescindible para mantener la competencia entre las empresas. Sin embargo, *lean manufacturing* plantea herramientas muy antiguas, que con la llegada de la industria 4.0 y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) pueden quedar obsoletas, por lo cual debe buscar una renovación actualizada a la era digital [7]. Esto lleva a enmarcar una integración propuesta entre las herramientas *lean* y las tecnologías de industria 4.0 [8], permitiendo con esto proporcionar las herramientas necesarias a *lean*, para lograr resultados inmediatos en la retroalimentación automática de los datos y de toda información que contribuye a la empresa.

La investigación del presente proyecto, aborda la posibilidad de que la producción pueda ser correspondientemente alcanzada y mejorada por las capacidades que brinda el “internet de las cosas” o *IoT*, debido a su competencia en el manejo de *software* y *hardware*. *IoT* garantiza ventajas estratégicas al entorno de las “cosas” que encajan dentro del desarrollo productivo [7], promoviendo en resumen la transferencia de información, conectividad de la red, sensibilidad de adquirir y remitir datos, controlar el consumo de energía requerido de trabajo y diseñar arquitecturas de acceso seguro a la información [7].

Si bien esta integración la podemos reconocer como *lean 4.0* en múltiples investigaciones, al dirigirnos en la actualidad con dar un salto digital en las industrias, los procesos de fabricación se vuelven más complejos y presentan diversos desafíos ligados a incrementar las exigencias en las políticas de fabricación, cuando estas incorporan técnicas tradicionales o pasadas. Un caso a ilustrar es la investigación de los mecanismos de control dinámicos de *lean*, habilitados para los sistemas de producción típicos con *IoT* [9], el cual presentan desafíos sobre la adquisición y procesamiento incompleto de la información, también en la capacidad para tomar decisiones debido a la falta de una capa de ejecución de la información en tiempo real y un estándar de técnicas o métodos científicos que corroboren la eficiencia óptima de las unidades independientes, al establecerse una correcta aplicación para esta toma de decisiones [9]. En conclusión, explorar el entorno *lean manufacturing* enfocado a los conceptos de la digitalización brinda grandes beneficios anhelados sobre las organizaciones, pero para obtener este rendimiento, se debe establecer un orden a las soluciones razonables que puede brindar esta integración, permitiendo proporcionar una estructura teóricamente analizada y direccionada a su desarrollo dentro de la fabricación. Por tanto, en el siguiente trabajo de investigación se propone a elaborar un marco de referencia que abordando esta laguna de investigación *lean* e I4.0 y comprendiendo los elementos requeridos para incorporar un correcto modelo idealizado *lean IoT* permita brindar un orden y estructura claro a los modelos de fabricación industrial.

1.2. Estado del arte

En el desarrollo del estado del arte se empleo el recurso de revisión sistemática para identificar a profundidad las experiencias y conocimientos de las nuevas filosofías que gobiernan el pensamiento de mejora continua en las empresas. Una de las formas más eficiente de buscar es a través de las bases de datos electrónicas [10], existen variadas bases de datos disponibles sobre investigación en las áreas de producción y fabricación como: scienceDirect, springer, Taylor&Francis, IEEE, SciELO, entre otras. Por lo tanto, es importante consultar en las bases de datos apropiadas que aporten a los objetivos y al tema del documento, “Definición de un marco de referencia para implementación de una técnica *lean manufacturing* mediante herramientas *IoT* para sistemas de producción industrial.”.

Las palabras claves utilizadas en la búsqueda fueron: “*lean manufacturing and IoT*”, “*lean assessment*”, “*lean evaluation*”, “*IoT framework*”, “*lean manufacturing and framework*”, “*lean 4.0*”.

La filosofía *lean* busca continuamente nuevas formas de ejercer acciones de manera más rápida, flexible y económica, combinando los distintos elementos, métodos y aplicaciones surgidas a través de los años de estudio en los diferentes procesos industriales [11]. Ya que el propósito general de *lean* es intervenir con técnicas dentro de los procesos industriales con el fin de reducir los “desperdicios” o “mudas” en la producción, aclarando que estos últimos términos se definen como toda actividad que usa más recursos de lo necesario y que se presentan de formas distintas sobre las diferentes áreas dentro de la cadena del valor como la sobreproducción, el transporte, el tiempo de espera, el exceso de procesos, inventarios, movimientos, los defectos de producción y el personal subutilizado.

Por tanto es claro entender que el pensamiento *lean* evoluciona permanentemente como consecuencia del aprendizaje adquiriendo sobre la implementación y adaptación de sus diferentes técnicas en los distintos entornos industriales a los cuales se aplique, como: discretos, continuos o por lotes [12]. Algunas industrias han reportado enormes beneficios al implementar la filosofía *lean* en sus sistemas productivos, mientras otras, desafortunadamente mencionan lo contrario al no obtener los resultados deseados. Una de las razones brindadas se le atribuye a la comprensión inadecuada por parte de los empleados que componen la jerarquía de una organización, y que están ligados a las decisiones que marcan el flujo del proceso, lo que lleva a una incorrecta interpretación a la hora de aplicarla [13].

Es por esto que *lean manufacturing* toma una evolución a su estudio para permitir un correcto proceso considerando otro paradigma relacionado a la era digital, la cual propone nuevas ideas y técnicas de mejora del proceso a través del uso de las tecnologías. Esta tendencia se identifica como revolución industrial 4.0. Siendo referido este ultimo termino a un nuevo modelo de organización y de control de la cadena de valor, apoyado y hecho posible por las tecnologías de la información [14].

De esta manera se desencadena un impacto evolutivo aplicado a los modelos de negocio de las empresas, proponiendo “la nueva fábrica inteligente” como resultado de la convergencia tecnológica e informática, la unión al “ecosistema digital” y el desarrollo de nuevos procesos de organización [14]. Estos nuevos métodos fueron nombrados pilares de la revolución industrial

4.0, compuestos por: innovación inteligente, cadenas de suministro inteligente, comunicaciones móviles, *Cloud Computing*, *Big Data*, comunicación maquina a maquina (M2M), plataformas sociales, fabricación aditiva, robótica avanzada y colaborativa, realidad aumentada, ciberseguridad e internet de las cosas (*IoT*).

Ahora bien, se presentan dos paradigmas donde inicialmente intervino la filosofía *lean* y luego las tecnologías de la informática digital en la revolución industrial 4.0. Esto reflejó que al automatizar un proceso, generalmente los trabajadores se centraron en los procedimientos que involucraban una transformación de materiales a productos terminados, conocido como pasos de creación de valor, donde no se tiene en cuenta la mayoría de desperdicios generados entre los procesos de fabricación. Al no enfocar la atención en los procesos automatizados que agregan valor, se perdían grandes oportunidades de mejora, por este motivo *lean* es fundamental para controlar los desperdicios provocados. Pero, dado a la complejidad y digitalización de operaciones, muchas compañías determinan que las técnicas de *lean* son insuficientes para la complejidad que presentan algunos procesos [15]. Por este motivo nace la combinación de *lean manufacturing* y las tecnologías de la industria 4.0, donde complementándose mutuamente, se conoce el termino *lean 4.0*, *lean industry 4.0*, o *lean* digitalizado. Gracias a este paradigma, enfoques como encontrar y eliminar desperdicios como máquinas inactivas o fallidas, o actividades sin valor agregado, podrían mejorarse fácilmente integrando los principios de la industria 4.0, como lo son: el *Big Data*, sensores y el internet en las cosas (*IoT*). Permitiendo así el análisis avanzado y el acceso a datos en tiempo real, el cual ofrece ventajas para eliminar actividades que no agregan valor [15].

A continuación, sentado en la cúspide de la cuarta revolución industrial surge un nuevo catalizador donde las “cosas” de todas las formas y funciones son fundamentales para lo que se conoce como el “internet de las cosas” o *IoT* [16]. La colectividad de *IoT* y la naturaleza distribuida de estos dispositivos inteligentes, con comportamientos autónomos o semi-autónomos, permiten una producción significativamente mayor y de mejor uso en los recursos humanos, al eliminar lagunas de información masiva sobre la condición de fábrica en tiempo real; junto con técnicas innovadoras como la fabricación aditiva, fabricación verdaderamente optimizada y con la visión de un sistema ágil, que respalden respuestas adecuadas a las implementaciones de la tecnologías *IoT*, que aportadas al cambio sobre los procesos industriales, generan con ello un impacto masivo y atrayente [16].

Continuando sobre implementación *lean* con *IoT*, han sido analizados los cinco pilares de la gestión de la transformación digital que integran a *lean thinking*. Proponiendo un marco de referencia enfocado a una transformación *lean* digital, mediante: gestión estratégica, gestión de riesgo, gestión de proceso, gestión de cambio y gestión tecnológica. Demostrando la utilidad de enfocar el proceso y sincronizarlo entre la cultura y la tecnología *IoT* [17]. Otros intereses se resaltan cuando las industrias reconocen buscar métodos de fabricación que alberguen calidad al entorno medio ambiental, donde persisten investigaciones que ayuden a forjar soluciones de reducción, como al consumo de energía en los procesos de producción, mejorando de esta manera el desempeño de los efectos ambientales realizados por la actividad humana. Aquí es donde se busca con la ayuda de *IoT* aumentar la eficiencia y reducir los costo de consumo [18], demostrando que la evolución tecnológica proporcionada por la industria 4.0 contribuye significativamente. Otras investigaciones presentan la distribución de material basado en

internet de las cosas para un entorno de producción *just in time (JIT)*, minimizando las esperas en línea, logrando un flujo continuo y siendo optimizado mediante el planteamiento de modelos matemáticos [8]. Por último, otra investigación *lean e IoT* [19] propone un caso de estudio el cual aplica tecnologías claves sobre redes o protocolos de comunicación con el fin de ser usados para utilidad de detección y análisis de anomalías en los procesos de fabricación [19]. Esto se practica mediante la adquisición del flujo de datos determinado con ayuda de la metodología *Jidoka*, otorgando así, la capacidad de tomar decisiones digitales y automatizadas inteligentemente [19].

Dados los casos expuestos sobre implementaciones *lean* con *IoT*, se evidencia que es posible que dos paradigmas trabajen en conjunto permitiendo optimizar y profundizar la búsqueda de este entorno, contribuyendo al beneficio de las diferentes dimensiones de rendimiento, mejora y reducción de desperdicios en una empresa, a tal grado de potenciarla bajo el uso de las herramientas *IoT* [7], permitir nuevas actividades interesantes que contribuyan al entorno industrial, como el control y la calidad de una organización a la hora de ofrecer sus productos y competir en el mercado. El proyecto planteado, busca profundizar en el conocimiento de tecnologías de industria 4.0 y en la estrategia de automatización, con la finalidad de estandarizar el uso de las prácticas de *lean* bajo tecnologías de *IoT*. Apoyando la comunicación de la información del proceso, la comunicación entre la estructura del personal de operación, la seguridad del control y del transporte de información, y la correcta toma de decisiones aplicadas a los sistemas de operación del producto o servicio ofrecido. La investigación brinda un marco de referencia capaz de otorgar unos lineamientos en la implementación de las técnicas *lean* en conjunto con tecnologías de *IoT*.

1.3. Marco conceptual

1.3.1. *Lean manufacturing*

Definición de *lean manufacturing*

Lean manufacturing es una metodología de trabajo compuesta por un conjunto de principios y herramientas de gestión que intervienen en la mejora de los sistemas de producción de las industrias. Es conocido en otros términos como “manufactura esbelta”, “producción ajustada”, “producción limpia”, “producción sin desperdicios” o “manufactura ágil” [20].

Dentro de estos principios y herramientas se comparte una necesidad común al objetivo de la filosofía *lean*, mejorar, eliminar o minimizar todas aquellas acciones, áreas o entornos dentro de la producción que presenten toda clase, “desperdicios” o “mudas”. Siendo considerados como el resultado de toda actividad o acción que no agrega valor al modelo de implementación que generan los productos o servicios de una fábrica, añadiendo así, costos no necesarios al componente ofrecido al cliente [15], [20].

Los objetivos principales de *lean* radican en maximizar el valor entregado al cliente final y a la vez minimizar el tiempo de pérdidas producidas dentro de los procesos de fabricación. Así, eliminando los desperdicios se mejora la calidad y se reducen los costos mas el tiempo de fabricación. Para conseguir todo aquello, se despliega una aplicación sistemática y habitual de un

conjunto de herramientas que agregan valor y tienden a eliminar los desperdicios; siendo aplicadas a múltiples áreas de fabricación como: organización de puestos de trabajo, gestión de la calidad, flujo interno de producción, mantenimiento y gestión de la cadena de suministros [15].

El aumento de la competencia y las expectativas de los clientes requieren que las organizaciones obtengan poderosas ventajas competitivas en el mercado globalizado, demostrando que los principios y métodos de la producción *lean manufacturing* son uno de los más efectivos [21].

Principios de *lean manufacturing*

Lean manufacturing, además de incorporar una estructura básica denominada “casa *lean*”, también se fundamenta bajo unos principios claves de integración. Estos son asociados desde dos grandes puntos de vista, los cuales son: el humano y el operacional. A continuación solo identificaremos los principios operacionales. [1], [7].

Los principios operacionales son [7]:

- Identificar y eliminar funciones o procesos innecesarios [7].
- Crear un flujo de proceso continuo que visualice los problemas en la superficie: consiste en utilizar pequeños lotes teniendo los procesos dispuestos lo más cerca posible y manteniéndolos en ejecución de su operación, moviéndose a través de los procesos sin interrupciones. Brindando así a flote una constante visualización de la ejecución e identificando procesos correctos de operación [7].
- Utilizar sistemas en los que la demanda tire de la producción (sistemas “*Pull*”) evitando con esto la sobreproducción. Una operativa *Pull* implica que el movimiento de material de producción se ajuste a la demanda constantemente. En otras palabras, la demanda programa lo que hay que entregar al cliente [7].
- Nivelar la carga de trabajo para equilibrar las líneas de producción. La nivelación promueve un orden de flujo continuo y estricto, permitiendo mantener la producción a la vanguardia de la demanda, y además, mantiene los equipos en ejecución aislando de pérdidas de tiempo [7].
- Estandarizar las tareas para poder implementar la mejora continua: El regir un orden y norma de las operaciones, promueve un mejor control y rendimiento del proceso, determinando una correcta ejecución de la “receta maestra” o el “orden de fabricación” y permitiendo tener una mejor perspectiva para la aplicación de futuras mejoras [7].
- Utilizar el control visual para la detección de problemas. Las tecnologías y las herramientas actuales proporcionan un beneficio óptimo a los desarrollos de fabricación, permitiendo ver constantemente el proceso y brindando pre-acciones correctivas a la situación de fallas, previendo en gran medida costos y desperdicios futuros [7].
- Eliminar inventarios a través de las diferentes técnicas *JIT* [7].
- Reducir los ciclos de fabricación y diseño: esto brinda posibilidades de viabilidad y pertinencia, reduciendo al máximo la inversión de salida del producto, evitando pérdidas

de dinero y tiempo sobre los diseños del productos que no serán rentables debido al interés del cliente [7].

- Conseguir la eliminación de defectos [7].

Desperdicios o mudas.

Definición: Muda significa “basura” en japonés, pero también incluye todo lo innecesario, superfluo e inútil [22]. Por tanto una muda o desperdicio es todo aquello que no aporta valor al producto o que no es estrictamente importante incluirse dentro de la fabricación. Para ello, hay que distinguir una serie de actividades necesarias dentro del sistema, identificando quienes no aportan un valor añadido al producto final y asumir la responsabilidad de mitigarlas [7]. Por esta razón *lean Manufacturing* propone un cambio radical cultural, que consiste en analizar y medir la eficiencia y la productividad de todos los procesos en términos de “valor añadido” o “desperdicios” [1].

Clasificación de los desperdicios

Los desperdicios se clasifican en un conjunto de definiciones denominada “Ocho desperdicios”, los cuales son [1]:

1. **Primer desperdicio:** es la causa de la mayoría de los otros desperdicios. Denominada sobreproducción y reconocida por procesar los artículos anticipándose al requerido o en mayor producción que la solicitada por el cliente [1].
2. **Segundo desperdicio:** es el exceso de inventario, el cual consiste en el excesivo almacenamiento de materiales como la materia prima, productos en proceso y productos terminados. Esta acción genera costos por almacenamiento a los financiamientos de las empresas [1].
3. **Tercer desperdicio:** se alude a las acciones de retraso, espera y paro, implicando un efecto sobre el personal que espera la información al igual que las instrucciones de trabajo, como los materiales, piezas o herramientas necesarias para ejecutar el debido trabajo [1].
4. **Cuarto desperdicio:** corresponde a transporte y envíos, cuya responsabilidad consiste en mover trabajos del proceso de un lado a otro, incluso el movimiento de materiales como partes de un producto terminado hacia un almacén u otras áreas del procesos [1].
5. **Quinto desperdicio:** son los desplazamientos y movimientos innecesarios, que se interpretan como cualquier movimiento físico o desplazamiento del personal que realiza y que no brinda un valor al producto o servicio [15], [1].
6. **Sexto desperdicio:** se refiere al tema del sobre-procesamiento y todas las actividades que no agregan valor al cliente o valor añadido al producto final, donde se desarrollan procedimientos innecesarios tales como contar, acomodar, inspeccionar, revisar o duplicar procesos [15], [1].

7. **Séptimo desperdicio:** se alude a los fallos y defectos, dado por la corrección de errores y re-trabajo derivado de la identificación de productos en mala calidad o por devoluciones de garantía por parte de los clientes [15], [1].
8. **Octavo desperdicio:** es el talento poco utilizado o desaprovechado hacia la capacidad de las personas. La creatividad e inteligencia de los colaboradores gracias a sus experiencias de trabajo son competencias y potenciales a resaltar [13], [1].

Estructura de *lean manufacturing*

Lean es un sistema con múltiples dimensiones que busca la eliminación de los desperdicios en los sistemas productivos; esta metodología implica un cambio de cultura en la organización empresarial, comprometiendo la dirección de las distintas áreas que integran a una organización al decidir implementarlo. Por este motivo, estas condiciones se tornan complicadas de sintetizar en una estructura de sistema *lean*, reflejando así, múltiples pilares, fundamentos, principios, técnicas y métodos de los cuales se compone para logran encajar completamente en cuanto a la homogeneidad de sus conceptos y objetivos, al punto de que los mismos académicos, expertos y consultores no logran coincidir al tener que identificar si una herramienta se le considera propia de *lean* o no [15].

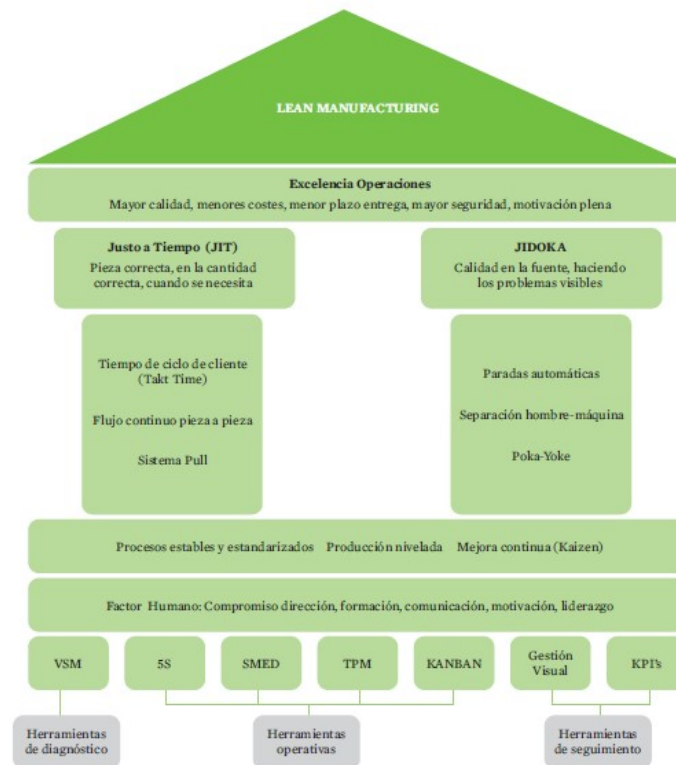


Figura 1: Estructura o casa *lean manufacturing* [1]

El techo de la estructura *lean* está constituido por los objetivos que pretenden alcanzar, los cuales se identifican como excelencia operativa a través de un aumento en la calidad, la reducción de costos, minimización de tiempos de entrega o de maduración (*lead time*), mejora de

los equipos actuales, ausencia de errores y motivación en los empleados. Entre más eficiente sea la implementación de los nuevos modelos de operación, mejor será el resultado alcanzado para los recursos obtenidos, los ahorros y el sistema de la organización [15].

A - Pilares de la estructura *lean*:

Herramienta	Descripción
JIDOKA:	<p>Definición: La palabra <i>JIDOKA</i> es un término japonés cuyo significado expresa “control de defectos autónomo”, definiéndose como una técnica que incorpora los sistemas y dispositivos de fabricación, con la capacidad de detectar automáticamente los errores generados en la maquinaria [15].</p> <p>Pasos básicos y principios de JIDOKA:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Detectar el problema. ▪ Detener el proceso. ▪ Restaurar el proceso para que funcione correctamente. ▪ Investigar la causa o raíz del problema.
JIT o Justo a tiempo	<p>Definición: <i>Just in Time (JIT)</i> cuya traducción se define como Justo a tiempo, o también conocido como <i>Toyota Manufacturing System (TPS)</i>. Es un sistema que formula un principio simple: “producir solo lo que se demanda y cuando el cliente lo solicita”.</p> <p>Pasos básicos o principios de JIT: Esta filosofía cuenta con diferentes principios con los cuales se puede dar cumplimiento a una buena implementación, como lo son:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Principio de inventario: tener proveedores confiables aumenta el capital y reduce el costo de inventario [23]. ▪ Principio de producción: el objetivo es sincronizar la demanda con la producción eliminando inventarios y <i>stocks</i> [23]. ▪ Principio de recursos humanos: donde se busca que los empleados tengan compromiso y agrado por su entorno de trabajo, para que desarrollen correctamente las actividades [23]. ▪ Principio de calidad: se busca identificar todos los posibles problemas para darles una correcta solución y así garantizar una buena calidad en la producción [23]. ▪ Principio de relación con proveedores: donde se buscan proveedores certificados que puedan garantizar una alta calidad a la materia prima [23].

Cuadro 1: Pilares de la estructura *lean*

B - Cimientos de *lean manufacturing*:

Los cimientos, de la estructura *lean*, representan el cambio de cultura organizacional, que busca otorgar estabilidad general a la estructura denominada casa *lean*. La base de la estruc-

tura consiste en la estandarización y estabilidad de los procesos, compuesta por métodos tales como: el “*Heijunka*” o nivelación de la producción y la aplicación sistemática de la mejora continua, denominada como “*Kaizen*”.

Entre estas bases se destacan las siguientes técnicas:

Herramienta	Descripción
KAIZEN:	<p><i>Kaizen</i> es reconocido por permitir que todos los miembros de la organización estén buscando continuamente formas de mejorar cada aspecto de la misma estructura organizacional, unificando en acuerdo a todos sobre este tipo de mentalidad [13].</p> <p>Pasos básicos o principios del <i>Kaizen</i> como filosofía gerencial:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ El primer principio se denomina “<i>Hoshin Kanri</i>”, siendo el soporte o la estructura del vínculo entre la alta dirección y los empleados, en referencia a las actividades que propone <i>Kaizen</i> como “filosofía gerencial”. Siendo el medio para esta base el despliegue de políticas y objetivos desde la alta dirección hasta el último empleado del área de trabajo [24]. ■ El segundo principio es la delimitación del <i>Kaizen</i> como un elemento de la Gestión de la Calidad Total o <i>Total quality managment (TQM)</i>. Esta esfera es interpretada como: “mejorar constantemente el sistema de producción y de los servicios” [24]. Examinando los procesos técnicos y administrativos desde diferentes perspectivas, con la finalidad de buscar óptimos métodos de trabajo [24]. ■ El tercer y último principio es el utilizar el <i>Kaizen</i> como sustento teórico para aplicar metodologías o técnicas que tienen como propósito básico eliminar los desperdicios, buscan mejorar la calidad de los procesos y los productos, reduciendo el conocido “<i>lead time</i>” o tiempo de espera [24].
HEIJUNKA:	<p>Definición: La palabra japonesa <i>Heijunka</i> significa “trabajo llano y nivelado” donde se busca una producción nivelada o estable. <i>Taiichi ohno</i> decía que el pensamiento de lotes nació cuando el hombre primitivo sólo lograba desarrollar una actividad, es por esto que nace la necesidad de desarrollar el trabajo por lotes y <i>stocks</i> [25].</p> <p>Pasos básicos y principios del <i>Heinjunka</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Producción nivelada. 2. Aumento de la flexibilidad de la planta. 3. Reducción de <i>stock</i> o productos en línea. 4. Reducción de <i>stock</i> de materias primas. 5. Mejor respuesta al cliente.

	<p>Estas técnicas básicas referenciadas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Usar células de trabajo. 2. Flujo continuo pieza a pieza. 3. Producir respecto al <i>Takt time</i> (tiempo de ritmo). 4. Nivelar el mix y el volumen de producción.
ESTANDARIZACIÓN:	<p>Definición: “Los estándares son descripciones escritas y gráficas, que ayudan a comprender las técnicas más eficaces y fiables de una fábrica, promoviendo conocimientos precisos sobre las personas, máquinas, materiales, métodos, datos o información, con el objeto de hacer productos de calidad de modo fiable, seguro, económico y rápido” [1].</p> <p>Pasos básicos o principios de la estandarización: Las características que debe tener una correcta estandarización se pueden resumir en los siguientes cuatro principios [1]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Hacer descripciones sencillas y claras de los mejores métodos para fabricar. 2. Proceder a elaborar las mejores técnicas y herramientas disponibles en cada caso al cual aplicar. 3. Garantizar el seguimiento y buen cumplimiento de los principios anteriores. 4. Considerar siempre mejoras posteriores después de analizar el comportamiento de la aplicación.

Cuadro 2: Cimientos de la estructura *lean*

C - Herramientas operativas de *lean manufacturing*

Herramienta	Descripción
5'S	<p>Definición: Es una herramienta de <i>lean manufacturing</i> que establece, bajo un grupo de actividades, el orden y limpieza requerido en las áreas de trabajo. Tienen la tendencia a ser una de las primeras opciones cuando se desea implementar como herramienta <i>lean manufacturing</i>. <i>5'S</i> ayuda a mejorar los espacios de trabajo, aumentando la eficiencia en las actividades, discerniendo entre lo que sirve y lo que no, liberando o mejorando las áreas y maquinarias, manteniendo así el uso de normas o reglas para el orden justo de los equipos. [26].</p> <p>Pasos básicos o principios del 5'S: <i>5's</i> se basa en lograr mantener cinco (5) pilares fundamentales estos pertenecientes al ciclo perfecto de las directrices, los cuales son [27]:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Orden y limpieza. ■ Inspección y detección de anomalías. ■ Eliminación de anomalías. ■ Preparación de gamas y estándares. ■ Las auditorías de las <i>5's</i>.

<p>SMED</p>	<p>Definición: Significa <i>Single Minute Exchange of Dies</i> y es una herramienta de <i>lean manufacturing</i> que se enfoca en la reducción del tiempo empleado por el personal de la organización al cambiar una herramienta o maquinaria en la operación. De esta manera, se logran mejorar los tiempos con la actividad e implementar una producción de lotes pequeños y variables. Obteniendo una adaptación óptima al presentarse un problema en la producción [28].</p> <p>Pasos básicos o principios de SMED: Para que <i>SMED</i> sea correctamente aplicado debe seguir una serie de componentes que garanticen la eficiencia de su potencial, como los siguientes elementos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se deben definir los objetivos a lograr con esta herramienta, estos pueden ser: disminución de costos, reducción de tiempo de cambio, disponibilidad de maquinaria, entre otros. 2. Se debe realizar la documentación correspondiente de los objetivos a mejorar y el correspondiente proceso para cada uno. 3. Ahora se clasifican las actividades u operaciones seguido a esto, las operaciones internas se vuelven operaciones externas, buscando identificarlas con las máquinas en operación usando estandarización. 4. Después de clasificar todas las posibles operaciones internas en externas, el nuevo objetivo es reducir tiempos al valor mínimo o eliminar excesos de desperdicios de tiempo. 5. Luego se deben generar las acciones correspondientes para garantizar el cumplimiento de los objetivos propuestos. La persona responsable de la implementación debe dar validez a lo desarrollado y al cumplimiento de las actividades. 6. Por último, se debe dar seguimiento a todos los cambios realizados. Esto con el objetivo de garantizar que las mejoras se mantengan de una manera constante.
<p>TPM</p>	<p>Definición: El mantenimiento productivo total es una metodología de <i>lean</i> que busca mantener la disponibilidad y confiabilidad en los sistemas de producción, asegurando una producción constante y sin paradas imprevistas, permitiendo prevenir con la ayuda de este los defectos y accidentes, para lograr una mejorar la calidad en las labores de mantenimiento [29].</p> <p>Pasos básicos o principios del TPM: <i>TPM</i> consta de 6 pilares fundamentales para su correcto funcionamiento. Los pilares son [30]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mejoras enfocadas. 2. Mantenimiento autónomo. 3. Planificación de mantenimiento. 4. Mantenimiento de calidad. 5. Adecuado entrenamiento. 6. Seguridad y mejoras ambientales.

KANBAN	<p>Definición: Técnica de gestión de la producción basada en un sistema <i>pull</i>, fundamentándose en la autogestión de los procesos y la eliminación de la programación centralizada [31].</p> <p><i>Kanban</i> ayuda controlar del flujo de materiales y de producción, involucrando tanto a los proveedores, los procesos y los clientes. de esta manera <i>Kanban</i> elimina desperdicios como tiempos muertos y mejora los sistemas de producción al sincronizar todo el flujo de material.</p> <p>Pasos básicos o principios del <i>Kanban</i>:</p> <p><i>Kanban</i> cuenta con seis (6) objetivos o reglas principales para llegar a una correcta aplicación Estas son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. No deben continuar en el siguiente proceso productos defectuosos. 2. Los procesos posteriores requieren solo lo necesario. 3. Producir la cantidad necesaria para los procesos posteriores. 4. Balance de producción. 5. La herramienta sirve para evitar especulaciones. 6. Estandarizar el proceso.
---------------	---

Cuadro 3: Herramientas operativas de *lean manufacturing*.

D - Herramientas de control visual *lean manufacturing*

Herramienta	Descripción
CONTROL VISUAL	<p>Definición: El control visual define la información justo a tiempo que asegura una señalización rápida y apropiada de las operaciones llevadas a cabo en un proceso de fabricación. En resumen, la gestión del control visual es el conjunto de medidas prácticas de comunicación cuyo objetivo es brindar a todos los empleados el conocimiento del estado del sistema y del avance de las posibles acciones a mejorar [15].</p> <p>Principios básicos de la herramienta control visual:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Dentro de los principios básicos de la herramienta de control visual se encuentra el sistema <i>Andon</i>, que presenta la localización y la naturaleza de evidenciar los problemas en las líneas de operación [13]. ■ Otro principio es la estandarización de las tareas en papel, que tiene como fin determinar las fallas del operario al ser observadas externamente desde el punto de vista real a como debe ser ejecutada la operación [13].

ANDON	<p>Definición: herramienta de <i>lean manufacturing</i> que ofrece o determina una ayuda visual generando avisos o alarmas al presentarse irregularidades en las áreas de trabajo. Esta herramienta funciona de la mano con el método Jidoka para la implementación de la filosofía <i>lean</i> [32].</p> <p>Principios básico del Andón: Existen diferentes tipos de aplicación para la herramienta <i>Andon</i>. Una de las más simples es el aplicar diferentes colores sobre las señales de advertencias, un ejemplo muy común es [32]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Blanco: producción en estado normal. 2. Rojo: falla de calidad. 3. Amarillo: rotura de <i>stock</i> de algún componente. 4. Azul: problemas de mantenimiento.
--------------	---

Cuadro 4: Herramientas de control visual de *lean manufacturing*.

E - Herramientas de diagnóstico *lean manufacturing*

Herramienta	Descripción
VSM	<p>Definición: <i>Value stream Map (VSM)</i> se define como “mapeo del flujo de valor”. Es un diagrama enfocado en visualizar, analizar y encontrar mejoras sobre el flujo de producción [33].</p> <p>Esta herramienta tiene un gran campo de aplicación sobre las organizaciones a nivel de manufactura, tanto en bienes, servicios y distintas áreas de producción, como logística, ingeniería, desarrollo de <i>software</i>, industrias de servicios, oficinas y administración. Todo esto aplicando la simbología de la herramienta <i>VSM</i> para la la creación del diagrama de valor [33].</p> <p>Pasos básicos o principios del VSM: Para la aplicación de <i>VSM</i> se aplican tres (3) pasos fundamentales [33]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Creación de diagramas: donde se muestra tanto materiales como datos de flujo reales. 2. Mapa de estado futuro: identifica causas fundamentales de desperdicios y posibles mejoras. 3. Llevar a cabo las mejoras: planificación, implementación y acciones para lograr los objetivos.

Cuadro 5: Herramientas de diagnóstico de *lean manufacturing*.

Beneficios de aplicar *lean manufacturing*

En la literatura y bajo la definición de varios expertos, definen que la aplicación de las técnicas o métodos *lean*, benefician en gran medida el potencial de una empresa, resaltando un gran número de aspectos posibles sobre la organización [1].

Las técnicas *lean* han dado lugar a resultados óptimos, presentando respuestas de un aumento

de la productividad en un (90 %), la reducción de costes en (90 %), la reducción de plazos de producción en (89 %) y el incremento de la flexibilidad en un (86 %) [1].

Barreras

Lean manufacturing presenta algunas barreras las cuales aun sobrepasar, entre estas se encuentran:

- La interacción entre el personal de la empresa, ya que al reorganizar la comunicación laboral se puede presentar incorrectas interpretaciones del como operar o desarrollar los procesos industriales [34].

- Otra barrera en la implementación de *lean* se presenta al querer ser aplicada en países con manejo de poca información en conocimiento a su lengua nativa, requiriendo a que las investigaciones sean traducida, llevando a tener una mala o insuficiente interpretación [34].

- La gestión de un incorrecto asesoramiento con el cliente, generando una mala interpretación entre lo idealizado y lo aplicado en la realidad. De igual forma, la falta de habilidades al incorporar en la filosofía también conlleva a múltiples inconvenientes diseño[34].

Evolución a *Lean* 4.0

La integración de *lean manufacturing* y la industria 4.0 es un campo importante de investigación. Dada la llegada de la fabricación inteligente e integrada, se especula que la fabricación del futuro funcionaria de una manera autónoma suplantando la mano de obra humana [35]. *Lean manufacturing* al trabajar con nuevas tecnologías, incrementa el potencial de planeación y optimización en la producción. Al digitalizar los procesos se brinda una nueva captura de la información en tiempo real; *Big Data*, *Cloud Computing* y las *IoT* son algunas herramientas que ayudan a obtener esta avanzada habilidad en *lean* [35].

Algunos ejemplos de esta integración son:

Herramientas <i>lean 4.0</i>	Descripción
JIT 4.0.	El método <i>JIT</i> puede usar vehículos guiados automatizados <i>AGV</i> , pueden transportar objetos dentro de un flujo de material automáticamente, minimizando los errores humanos [36]. <i>Big data</i> y análisis de datos.
HEINJUNKA 4.0.	El nivel de producción se puede optimizar con el análisis histórico de datos y la situación del mercado. Para lo cual existen diversas aplicaciones con las cuales poder automatizar la planificación en la producción [37].
KANBAN 4.0.	Se puede utilizar sistemas de simulación en tiempo real de los objetos físicos con un gemelo digital, con el cual se puede analizar los parámetros más adecuados para tamaños de lotes. Tiempos de entrega y tener en cuenta factores externos para reajustes automático, logrando llevar un seguimiento de forma precisa [38].
VSM 4.0.	Utilizando dispositivos HCI (interacción persona ordenador) para visualización a tiempo real del flujo de valor permitiendo identificar los desperdicios en los procesos con mayor exactitud [39],[35].
MPT 4.0.	Mediante la implementación del mantenimiento productivo total integrando la realidad virtual y la realidad aumentada se puede formar de manera segura y adecuada a los operarios en la correcta realización de mantenimiento. El <i>big data</i> y el internet en las cosas pueden brindar información del estado de las máquinas y definir acciones de mantenimiento preventivo con mayor exactitud [35], [40].
SMED 4.0.	Implementación de sistemas <i>plug and play</i> para el cambio de utillaje y realidad aumentada para formar a los operarios en el proceso. En algunos procesos se puede reemplazar la fabricación con moldes y matrices por fabricación aditiva dado que esta no requiere de tiempos de cambio entre cada variante de producto [41],[42].

Cuadro 6: Métodos *lean* integrados con industria 4.0

En el cuadro 6 se identifica que *lean manufacturing* ha permitido incorporarse el trabajo con la industria 4.0, demostrando ser flexible desde diferentes tecnologías 4.0 [35].

1.3.2. La Industria 4.0

Origen de la industria 4.0

La primera revolución industrial se dio en la mitad del siglo XVIII y en las primeras décadas del siglo XIX. La segunda revolución industrial se dio a mediados del siglo XIX, apareciendo nuevas energías como la electricidad y el petróleo, generando que la sociedad empezara una nueva comunicación mediante el uso del telégrafo, el teléfono, la radio y la televisión. La tercera revolución industrial se dio en la segunda mitad del siglo XX, basándose en la exploración de las energías renovables para el uso de la tecnología del internet y en la transición hacia los vehículos de motor eléctrico [43].

La digitalización e inteligencia en los procesos de fabricación son la necesidad actual de las industrias. En la actualidad las industrias de manufactura pasan un momento de transición de una producción en masa a una producción más personalizada. Brindan también una amplia aplicación a la producción en múltiples ámbitos. El término “industria 4.0” hace referencia a la cuarta revolución industrial, determinada como un nuevo nivel de organización y de mayor

control sobre la cadena de valor en el ciclo de vida de un producto, en donde se busca cumplir los requerimientos de los clientes de una manera más individual [44].

Definición: La cuarta revolución industrial consiste en la interconexión entre máquinas y diferentes áreas de una empresa o cadenas de valor, enfocándose en las actividades que agregan valor mediante cambios tecnológicos, buscando la unión tanto del mundo real como del mundo tecnológico. Con los cambios tecnológicos se generan alteraciones tanto culturales como organizacionales ya que el factor humano es uno de los mas afectados dentro de esta revolución [44].



Figura 2: Pilares de la industria 4.0. [2]

La necesidad de la industria 4.0 se presenta al querer convertir máquinas regulares en máquinas auto conscientes o de auto aprendizaje para mejorar el rendimiento y la gestión del mantenimiento. Es por esto que la industria 4.0 tiene como objetivo la creación de fábricas inteligentes, seguimiento de datos en tiempo real y observar los estados de fabricación. De esta manera al registrar cada dato el control en los procesos de fabricación sera más eficiente y preciso [44].

Ventajas de la industria 4.0

- Reducción en tiempos de producción.
- Mejoras en niveles de calidad.
- Mejoras en seguridad.
- Mejoras en el control de los procesos.
- Mejoras en la comunión de los volúmenes de información

Herramientas de la industria 4.0

Las herramientas tecnológicas de la industria 4.0 también son conocidas como habilitadores tecnológicos o pilares tecnológicos. Ver figura 2.

Tecnología	Definición
1. <i>Big Data</i>	<p><i>Big Data</i> hace referencia a conjuntos de datos crecientes los cual deben ser utilizado para proporcionar información de análisis y generar decisiones. De esta manera se genera valor real del comportamiento para una organización [45].</p> <p>Ventajas de <i>Big Data</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prevenir o identificar fallos en productos o máquinas con mayor velocidad. • Mayor calidad. • Mejoras tecnológicas. • Clasificación de los clientes. • Identificar tendencias de compras o intereses.
2. Inteligencia artificial	<p>Definición: Es el desarrollo de algoritmos que permiten a las computadoras procesar datos a una velocidad inusual, logrando aprendizajes automáticos, e incorporando soluciones algorítmicas y capacidades cognitivas propias de los seres humanos en las maquinas, como visión, comprensión, planificación y decisión. Ventajas de la inteligencia artificial:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minimizar la posibilidad de errores. • Conferir tareas de alta complejidad y peligrosas. • Facilitan el trabajo del ser humano. • Mayor velocidad de gestión de datos. • Mejora las actividades repetitivas.
3. Robótica	<p>Los robots autónomos operan en ambientes naturales y son capaces de tomar decisiones propias en función de una meta dada. Un ejemplo a esto son los robots mensajeros de los hospitales o automóviles de conducción automática. En la actualidad la tendencia es desarrollar algoritmos que brinden mayor autonomía a los robots [46].</p> <p>Ventajas de la robótica:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilitan el trabajo del ser humano. • Mayor velocidad de gestión de datos. • Mejora las actividades repetitivas.
4. Simulación	<p>Definición: Las simulaciones permiten adquirir los datos de las plantas físicas en tiempo real bajo modelos virtuales que pueden incluir procesos, productos o maquinaria.</p> <p>Ventajas de la simulación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Visión y análisis de previos procesos • Simulación de equipos, plantas y maquinaria sin riesgos de operación. • Modelos de fallas en equipos. • Diseño de mantenimientos. • Dimensionar procesos.
5. Sistemas de integración horizontal	<p>Definición de sistemas horizontales: Es la integración de la redes tecnológicas y los sistemas de fabricación, permitiendo brindar una completa conexión entre las maquinas mediante puntos de comunicación dentro de las diferentes áreas de operación. Esta integración consta de información, sistemas tecnológicos en la producción y equipos automatizados. Ventajas del sistema de integración horizontal:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intercambio de información de manera más rápida y flexible. • Facilidad para tomar decisiones. • Reducción de pérdidas. • Aumento y mejora de producción.

6. Sistemas de integración vertical	<p>Definición de sistemas verticales: Los sistemas verticales son asumidos por empresas que desarrollan actividades a terceros o se emplean en la creación o adquisición de organizaciones proveedoras para autoabastecerse tanto de materiales e insumos [47].</p> <p>Estos sistemas están compuestos por sensores, nivel de gestión, cooperación entre máquina e internet, máquina - persona y máquina a máquina en la cadena de valor.</p> <p>Ventajas del sistema de integración vertical:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Intercambio de información de manera más rápida y flexible. ● Facilidad para tomar decisiones. ● Reducción de pérdidas. ● Aumento y mejora de producción.
7. Internet de las cosas (<i>IoT</i>)	<p>Definición: <i>Internet of things</i>/Internet de las cosas es una arquitectura emergente basada en la Internet global que facilita el intercambio de bienes y servicios entre redes de la cadena de suministro, teniendo un impacto importante en la seguridad y privacidad de los actores involucrados [48].</p> <p>Internet de las cosas representa uno de los avances tecnológicos más importantes de los últimos tiempos, entendiéndose como un conjunto de dispositivos o “cosas” interconectadas entre sí, estando a su vez conectados a internet permitiendo el flujo recíproco de datos [48].</p> <p>Ventajas del internet de las cosas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Mejora de activos equipos, maquinarias, herramientas, etc. ● Aumento de flexibilidad. ● Mejoras en eficiencias. ● Disminución en costos de mantenimiento. ● Análisis de datos más óptimo.
8. Ciberseguridad	<p>Definición: La ciberseguridad o seguridad cibernética se define como la herramienta dentro de la industria 4.0 que ofrece la práctica encargada de enfrentar eventuales amenazas presentadas como alteraciones o destrucción de datos que puedan ocurrir por medio de dispositivos, tecnologías digitales y electrónicas.</p> <p>Ventajas de la ciberseguridad:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Genera filtros de seguridad que protegen de mejor manera los datos informáticos y los dispositivos de los usuarios. ● Protege el procesamiento del flujo de información y comunicación. ● Acondiciona el cumplimiento de los mantenimientos preventivos y correctivos de los sistemas virtuales. ● Disponer de limpieza y protección sobre las redes de interconexión.
9. <i>Cloud computing</i>	<p>Definición: <i>Cloud computing</i> dentro de la industria 4.0 se identifica la herramienta como la infraestructura informática ubicada dentro de las tecnologías de la información y la comunicación [49]. Es por esta razón que se ha asociado principalmente el <i>cloud computing</i> como un término de <i>marketing</i> en una variedad de contextos tecnológicos [50].</p> <p>Ventajas del <i>cloud computing</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● Ofrece grandes servicios que potencian la informática y la comunicación. ● Proporcionan un acceso rápido o casi inmediato a los dispositivos <i>hardware</i>. ● El manejo y acceso a grandes volúmenes de información almacenados de manera digital. ● No hay desactualización prolongada.

10. Realidad aumentada	<p>Definición: La Realidad Aumentada o también <i>Augmented Reality</i> (AR) es una de las tecnologías que incorpora la industria 4.0 y que ha penetrado con gran interés dentro de los diferentes sectores, desde los ámbitos educativos, comerciales, industriales, militares y gubernamentales, haciéndose una realidad cada vez más tangible [51].</p> <p>Estas tecnologías interconectan un medio camino entre la realidad y los entornos virtuales inmersivos, construyendo en su combinación una nueva realidad donde las herramientas tecnológicas aportan un servicio de información [51].</p> <p>Ventajas de la realidad aumentada</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presenta un nuevo entorno de trabajo a los medios de comunicación. • Presenta un volumen de información al usuario de manera más fácil y explicativa.
------------------------	---

Cuadro 7: Definiciones de las tecnologías de la industria 4.0

Mediante el cuadro 7, se identifica las definiciones, beneficios y desventajas propias que componen a las herramientas tecnológicas de la industria 4.0. Enfocándose en el internet de las cosas se encuentra las siguientes ventaja como: mejora en las maquinarias, las herramientas, los dispositivos, también se complementa perfecto con la automatización de los procesos industriales, aumenta la flexibilidad de la operación, la calidad de los procesos industriales mejorando en eficiencia y disminuyendo los costos de mantenimiento [48]. Permitiendo así, reconocer brevemente los respaldos y potenciales que puede brindar las tecnologías *IoT*.

Por este motivo se apuesta en trabajar dentro del desarrollo del proyecto de investigación la interacción con las tecnologías brindadas por *IoT*.

1.3.3. El Internet de las cosas *IoT*

En el siguiente cuadro 8, se resalta los componentes de *IoT* con su respectiva descripción:

Componentes	Descripción
Protocolos del internet de las cosas (<i>IoT</i>)	Entre las tecnologías de comunicaciones más usadas en <i>IoT</i> se encuentran: <i>Radio Frequency Identification (RFID)</i> , <i>Near Field Communication (NFC)</i> y <i>Wireless Sensor Networks (WSN)</i> [52].
Niveles de <i>IoT</i> :	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nivel de dispositivos: compuesto por sensores, actuadores, <i>software</i>, <i>hardware</i>, conexión, etc. Lo cual ayude a la conexión a la red [53]. ■ Nivel de datos: todos los datos adquiridos, procesados, recibidos, enviados, etc [53]. ■ Nivel de negocio: administración de facturación y funciones empresariales [53]. ■ Nivel de usuario: todos los equipos o dispositivos que permiten al usuario interactuar con dispositivos <i>IoT</i> [53].

Puertas de enlace de <i>IoT</i> :	Las puertas de enlace conectan los dispositivos <i>IoT</i> a la nube, transmitiendo información a un servidor de red central usando una conexión IP estándar. las puertas de enlace también permiten conectar dispositivos que no tienen acceso directo a internet [54].
Conexión entre nodos:	La conectividad entre puertas de enlace y nodos puede ser bidireccional y de múltiples velocidades teniendo una variación entre 0.3 Kbps a 50 kbps. para ampliar la duración de la batería de nodos a la red, el servidor administra la velocidad para cada nodo [54].

Cuadro 8: Componentes del internet de las cosas (*IoT*)

Tipos de redes de *IoT*

Existen diferentes tipos de redes como las de corto alcance y bajo consumo o de área extensa y bajo consumo. Estas normalmente son referenciadas debido a la capacidad que pueda brindar la transmisión de datos dependiendo a la cobertura de la zona sobre la cual abarcar. Por otro lado, se tiene el bajo consumo energético, siendo un interés importante en adquirir por las empresas debido a su gran ahorro en los costos energéticos [54], [55].

1. Redes de corto alcance y bajo consumo:

Siendo ampliamente aplicadas en hogares oficinas y entornos donde la comunicación sea cercana. Algunas de estas hacen partícipe el uso de baterías. Entre esta clase de redes de corto alcance o bajo consumo se encuentran las siguientes tecnologías:

Tecnología	Definición / Clasificación
<i>Bluetooth</i>	<p>Funciona sobre la expansión de aplicaciones de comunicación inalámbrica de corto alcance con <i>IoT</i> y la comunicación máquina a máquina (M2M), el cual busca la reducción de consumo energético en los dispositivos que requieren baterías y prolongado tiempo de trabajo [55].</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Bluetooth v1.0 o v1.0b</i>: fueron las primeras versiones creadas. Estos dispositivos presentaban problemas de comunicación entre sí, además que al conectarse perdían el anonimato [55]. ▪ <i>Bluetooth v1.1</i>: solucionó varios problemas de la 1.0 y fue el primer <i>bluetooth</i> funcional [55]. ▪ <i>Bluetooth v1.2</i>: se aumentó el caudal de datos a 1 Mbit/s y se añadió la tecnología de espectro ensanchado por salto de frecuencia. Se cambiaron las frecuencias de radio para eliminar interferencias sirviendo de guía para el estándar IEEE 802.15.1 [55]. ▪ <i>Bluetooth v2.0</i>: la versión 2.0 tiene mejor funcionalidad a la hora de la unión con varios dispositivos y mejora el consumo de energía. Los dispositivos con 2.0 + EDR disfrutaban de caudales de hasta 3Mbit/s [55].

	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bluetooth v2.1: es similar al <i>Bluetooth</i> v2.0 en características, arquitectura y funcionamiento. Facilita la conexión bajando el número de procesos durante el proceso de unión. Reduce aún más el consumo de energía [55]. ■ Bluetooth v3.0: introduce un nuevo controlador llamado <i>AMP</i> que permite la combinación del estándar IEEE 802.11 como transporte de alta velocidad para llegar a alcanzar los 24 Mbps [55]. ■ Bluetooth v4.0: en esta versión se incluye una versión de <i>bluetooth</i> de bajo consumo (<i>low energy</i>) y está enfocado principalmente a elementos que funcionen con <i>IoT</i> alcanzando de igual manera los 24 Mbps [55]. ■ Bluetooth v4.1: se caracterizó por dirigirse sobre todo al mundo del Internet de las cosas (<i>IoT</i>), el cual permite la conexión entre dispositivos pequeños sin intermediarios por medio de un enlace físico conocido como “<i>broadcast</i>”, siendo un esclavo sin conexión proporcionando un transporte unidireccional [55]. ■ Bluetooth v4.2: Es una actualización del <i>Bluetooth</i> v4.1. que incorpora la conexión por nodo seguro para transporte físico e implementó el protocolo IPv6 para permitir la conexión directa a través de internet [55]. ■ Bluetooth v5.0: igual que las versiones anteriores, está dirigido a ambientes que operen con <i>IoT</i>. logrando un aumento en velocidad hasta 50 Mbps , cuadruplicando el alcance a 240 metros y siguiendo con un bajo consumo [55]. ■ Bluetooth v5.1: busca saber la ubicación de dispositivos conectados entre sí, encontrados a poca distancia y saber desde dónde se dirigen las señales que busca [55].
<p><i>WI-FI</i> / 802.11</p>	<p>Tecnología de bajo consumo energético ampliamente aplicable en hogares, oficinas o áreas locales. Es una de las redes más populares para el acceso a los servicios <i>WLAN</i> y de banda ancha, satisfaciendo requerimientos QoS (<i>Quality of Service</i> - Calidad de Servicio) [56].</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 802.11a: conocido como <i>WI-FI</i> 5 su misión es crear un estándar de <i>WLAN</i> en la banda de 5 GHz y alcanzar hasta 54 Mbps [57]. ■ 802.11b: conocido como <i>WI-FI</i> pensado en el estándar <i>WLAN</i> en la banda de 2.4 GHz y alcanzar 11 Mbps [57]. ■ 802.11d: busca definir nuevos requerimientos en la capa física para lograr implementarla en países que no cuenten con 2.4 GHz [57]. ■ 802.11e: busca mejorar la calidad de servicio, dando prioridad de transmisión a unos paquetes de datos que a otros [57]. ■ 802.11f: funciona bajo el estándar 802.11g y aplica la intercomunicación entre puntos de acceso de diferentes fabricantes [57]. ■ 802.11c: procedimientos específicos MAC [57]. ■ 802.11g: capaz de mantener compatibilidad con 802.11b logrando alcanzar hasta 54 Mbps [57]. ■ 802.11h: evolución de 802.11a que permite la asignación dinámica de canales y control automático de potencia para mejorar las comunicación con posibles interferencias[57]. ■ 802.11i: permite incorporar mecanismos de seguridad para redes inalámbricas, mejorando los mecanismos de autenticación y seguridad como lo es <i>WEP</i>, trabajando con <i>Temporal Key Integrity Protocol (TKIP)</i> [57]. ■ 802.11x: busca la mejora de seguridad con protocolos de seguridad extendida (EAP) [57].

<i>Z-Wave</i>	Es una red de malla para comunicación en dispositivos de uso doméstico. Que trabaja mediante ondas de radio de bajo consumo energético. También es una red inalámbrica similar al <i>WI-FI</i> y el <i>bluetooth</i> , con protocolos de seguridad, pero con incapacidad de mandar o recibir grandes cantidades de información como el <i>WI-FI</i> [58]. Existen dos tipos de nodos en las redes <i>Z-Wave</i> : nodos de control o pasarelas y nodos esclavos. Como es una red de topología en malla, los nodos pueden enviar información a otros no necesariamente accesibles por el nodo de control. Para tener superposición de la red cada red <i>Z-Wave</i> consta de una ID de inicio único de 32 bits especificada en el control. De igual manera, una red <i>Z-Wave</i> puede tener múltiples nodos de control pero solo uno puede ser el control principal [58].
<i>Zigbee</i>	Es una opción común para la automatización doméstica y dispositivos médicos. También es idónea para redes de área personal de corto alcance con dispositivos pequeños de bajo consumo y poco ancho de banda. Es un estándar desarrollado por <i>zigbee Alliance</i> (samsung, philips, motorola, <i>texas instruments</i> y otras) con el objetivo de caracterizarse con un bajo costo, bajo consumo y bidireccional confiable, siendo adecuado para aplicaciones de corto alcance. Es un estándar abierto y aprobado por la IEEE basándose en la IEEE 802.15.4, logrando funcionar con baterías de alta duración y un apoyo máximo de 65000 nodos en la red.

Cuadro 9: Tecnologías de corto alcance y bajo consumo

Para complementar la información se presenta los siguientes componentes que incorporan a la capa física, respecto a la red de tipo *WI-FI*.

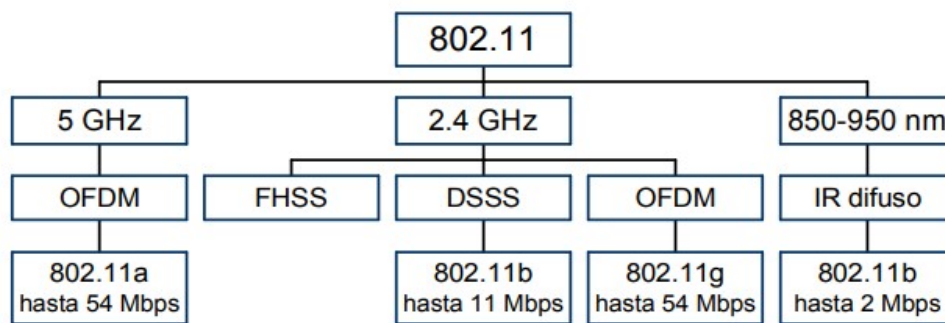


Figura 3: Diagrama de la capa física

2. Redes de área extensa y de bajo consumo:

Por otro lado, tenemos las redes de tipo de área extensa de bajo consumo, las cuales permiten la comunicación en un radio mínimo de 500 metros requiriendo de una tasa de consumo energético bajo, generalmente son utilizadas dentro de la mayoría de los dispositivos *IoT*. Por ejemplo, las redes de área extensa de largo alcance (*LoRaWAN*) que conectan dispositivos móviles, seguros y con batería bidireccional, ganando esta forma, popularidad en las industrias dado largo alcance y bajo costo, permitiendo comunicaciones de 10 a 40 Km en zonas

rurales, 1 a 5 Km en zonas urbanas y siendo adecuado para la transmisión de pequeñas cantidades de datos a largo plazo [59].

Los siguientes ejemplos son tecnologías integrantes a las categorías pertenecientes de las redes de área extensa y de bajo consumo:

Tecnología	Definición / Clasificación
4G LTE para <i>IoT</i>	protocolo de alta capacidad y baja latencia. siendo excelentes para aplicaciones de <i>IoT</i> donde se necesiten datos en tiempo real [60].
5G LTE para <i>IoT</i>	es un nuevo protocolo el cual busca mayor velocidad de descargas y mayor conexión de dispositivos en un área [60].
<i>sigfox</i>	ofrece redes inalámbricas para conexión de objetos de bajo consumo que reciben o envían datos constantemente [59].

Cuadro 10: Tecnologías de alcance extenso y bajo consumo.

Arquitectura *IoT* con modelo *OSI*

Aplicación.	Protocolo.
Nivel de aplicación usuario - dispositivo	Advanced Message Queuing Protocol (AMQP): nivel de software con el cual pueden funcionar múltiples aplicaciones juntas [61].
	Protocolo de aplicación restringida (CoAP): protocolo de red diseñado para dispositivos de capacidad limitada para la comunicación máquina a máquina [61].
	Distribución de datos (DDS): protocolo punto a punto, capaz de ejecutarse en pequeños dispositivos o conectarse a redes de alto rendimiento, siendo confiable, óptima y no muy compleja [61].
	Message Queue Telemetry Transport (MQTT): protocolo usado en redes de poco ancho de bandas con ubicaciones remotas para mensajería ideal para dispositivos que requieran eficiencia en baterías [61].
Nivel de transporte.	Protocolo de control de transmisión (TCP): es el protocolo más común para la conexión a internet, teniendo comunicación entre <i>hosts</i> y dividiendo los datos durante su transmisión [62].
	Protocolo de datagrama de usuario (UDP): permite la comunicación entre procesos y utiliza el IP mejorando la velocidad de transferencia por <i>TCP</i> , siendo ampliamente aplicados para evitar la pérdida de datos [62].
Nivel de red.	6LoWPAN: versión de IPv6 que reduce los tiempos de transmisión [53].
	IPv6: protocolo de actualización de IP capaz de redirigir el tráfico e identificar dispositivos [53].
Nivel de unión de datos.	IEEE 802.15.4: estándar de radiofrecuencia para dispositivos de bajo consumo capaz de insertarse a otros estándares [53].
	LPWAN: comunicación con una distancia mínima de 500 mts [53].

Nivel físico.	Bluetooth Low Energy (BLE): similar al <i>Bluetooth</i> clásico pero con menor consumo energético. Nativo en todos los sistemas móviles en la actualidad [53].
	Ethernet: su interconexión se da por medio de cableado [53].
	Evolución a largo plazo (LTE): estándar de banda ancha inalámbrica que admite multidifusión [53].
	Transmisión de datos en proximidad (NFC): utiliza campos electromagnéticos y logra comunicar dispositivos a menos de 4cm [53].
	Identificación por radio frecuencia (RFID): utiliza campos electromagnéticos para el seguimiento de etiquetas principalmente [53].
	Wi-Fi/ 802.11: más usado en hogares y oficinas con alcance limitado [53].

Cuadro 11: Modelo de arquitectura *OSI*.

1.3.4. Internet industrial de las cosas *IIoT*

IIoT es parte de un concepto mas amplio de tecnologías de *IoT*, donde la diferencia radica en el propósito u entorno sobre el cual aplicar, en este caso la industria. Con el fin de monitorizar, detectar y controlar todos los equipos industriales, estos dispositivos tienen en cuenta características específicas como: la adaptación hardware al entorno industrial y la configuración lógica (software) necesaria a la calidad robusta de la industria. Ya que al ser diseñadas para cosas mas grandes que los dispositivos de comunicación inalámbricos, su enfoque principal es conectar maquinas o sistemas industriales como motores, redes y otros [63].

Entre las principales características por las cuales es utilizado *IIoT* es su confianza en los entornos industriales, como: el desarrollo en sistemas integrados, manejo de computación en la nube, fabricas inteligentes, entre otros. *IIoT* no solo debe funcionar para la producción autónoma, sino también permitir brindar información en tiempo real a los usuarios, consumidores y proveedores, permitiendo ejecutar un diagnostico de las posibles vulnerabilidades que puedan presentarse en los dispositivos de campo como daños físicos, robos o interferencias. [63].

Semejanza de *IIoT* y *IoT*:

Además de tener un nombre similar, el desarrollo de los dos se enfoca en la conectividad y la nube. Por otro lado, los protocolos para establecer el enlace, también comparten estándares de comunicación usados por ambas tecnologías, tales como: infraestructura (*IPv4*, *IPv6*, *6LoWPAN*, *UDP*), descubrimiento (*mDNS*, *HyperCat*, *UPnP*), y protocolos de datos (*MQTT*, *XMPP*, *LLAP*, *REST*, *SOAP*), logrando así la comunicación entre dispositivos [64].

La mayoría de los estándares de comunicación utilizados por ambas tecnologías son de código abierto, con lo cual se facilita la adquisición de los datos para trabajarlos. También en algunos casos se utilizan el mismo tipo de sensores para el procesamiento de los datos según las características y necesidades a requerir.

Diferencia de IIoT y IoT:

IoT es una tecnología mas cercana a las actividades cotidianas de los humanos, como su participación con los relojes inteligentes, dispositivos móviles o productos asociados a electrodomésticos y computadoras. *IoT* Busca satisfacer las necesidades de las personas con la integración a dispositivos comunes, razón que a diferencia *IIoT* se enfoca en conectar los sistemas de producción industria [64].

Características IoT

- Su aplicación esta centrada en dispositivos portales, robots o maquinas.
- Su implementación es de bajo riesgo para los usuarios.
- Utilizado a pequeña escala.
- Fácil programación.
- Altos volúmenes de datos.
- No requiere altos niveles de requisitos o seguridad.
- Tiempo de vida reducido.
- Su nivel de confiabilidad es menor.
- Son dispositivos mas enfocados a *Plug and Play*, no están diseñados para un alto grado de personalización.

Características IIoT

- Su aplicación esta centrada en industria, fabricación, centrales eléctricas, petroleo y gas, etc.
- Su implementación se realiza en equipos o dispositivos de un alto grado de amenaza o emergencia en caso de falla, utilizando sensores con mayor exactitud y sensibilidad.
- Se utiliza a gran escala.
- Programación remota.
- Volúmenes de datos medio y altos.
- Alto nivel de seguridad para protección de los datos.
- Los requisitos son estrictos.
- Tiempo de vida largo.
- Alta confidencialidad.
- Cuentan con un alto grado de personalizaron, ya que deben ser configurados según el lugar en que vayan a ser colocados, la función o integración.

1.3.5. Aplicaciones de *lean Manufacturing* con IoT

***Lean manufacturing* integrada con Internet de las cosas (IoT)**

Es importante reconocer que la evolución de *lean manufacturing* es un ideal ya estudiado por diferentes autores [65], [66]. Siendo una integración visionada en diversas investigaciones con la necesidad de rendir al enfoque industrial actual [35], [40], [39], [37], [40], es por esta razón, que son analizados los desarrollos involucrados a estas nuevas técnicas y tecnologías de aplicación industrial.

Una de las investigaciones referenciadas al estudio de este proyecto propone un análisis de la implementación de *lean manufacturing* con las tecnologías *IoT*, siendo esta investigación evocada a la industria de la aviación. Dado que los requisitos de calidad y seguridad de las aeronaves aumentan constantemente, los fabricantes se interesan en las posibilidades de controlar más el funcionamiento de los principales sistemas y partes de las aeronaves lanzadas al mercado, donde la nave pueda comunicarse con su fabricante informándole del requisito de un mantenimiento preventivo. Esta acción se puede ejecutar mediante el uso de sensores dentro de las distintas áreas que requieran notificar ciertas magnitudes de sobrecalentamiento, vibración, desgaste prematuro en nodos particulares o presencia de sonidos inusuales. Gracias al sistema digital inteligente, la máquina realizará un auto diagnóstico informando el estado actual desde el centro de control operativo correspondiente [66]. A esta investigación los diferentes métodos de simulación a los cuales aplica para su desarrollo pueden variar y ser dependientes a las necesidades de cada proceso, tomando elegir el método que mejor se adapte a cada uno. Para corroborar este proyecto de investigación a desarrollar, se parte de referencia de la investigación *lean IoT* aplicada a industria de la aviación [66], los diversos métodos de simulación para validar la capacidad de las herramientas *lean* y la tecnología *IoT*, reverenciando las simulaciones como: programación lineal, simulación de eventos discretos (DES), sistemas dinámicos y mapeo del flujo de valor [66].

Otro ejemplo de integración de los sistemas ciberfísicos complementados con *Jidoka* proponen una arquitectura con tecnologías claves que respalda la estandarización, la capacidad de cambio y la modulación del sistema. Insistiendo en el desarrollo de nuevas herramientas para lograr una implementación ágil y mayor eficiencia al analizar remotamente un proceso, pero agregando la consideración de ciertas ventajas de los mecanismos de seguridad, tales como: la seguridad de detección, seguridad de comunicación, seguridad de control de actuación y seguridad de retroalimentación [67]. Esta investigación propone una arquitectura que interviene en los sistemas de producción mediante la industria 4.0, la tecnología *IoT*, la herramienta *Jidoka* y los sistemas ciber-físicos (CPS). Propuesto para una línea de ensamble automatizada, la unificación de estos elementos brinda la tecnología capaz de recolectar la información de los materiales o los recursos de ensamble, mediante el uso de sensores *RFID*, los cuales permiten transmitir las señales interpretadas hacia una unidad principal de monitoreo y control, logrando así, analizar y detectar anomalías presentes en la producción con la intervención de la metodología *Jidoka*, siendo un sistema completo y capaz de brindar las acciones automáticas e inteligentes a realizar como solución. [67].

Otro caso de integración se presenta en [65], donde *lean six sigma* habilitado para los sistemas de producción típicos con *IoT*, pues brinda la posibilidad de manejar, analizar, controlar y monitorear tanto de manera inteligente como autónoma, la producción y la cadena de suministro. Mediante el uso de sensores *RFID* y tecnología *GSM*, las unidades de materiales producidas que serán tanto transportadas como monitoreadas hasta su destino, serán esca-

neadas con la finalidad de que la empresa tenga una completa supervisión y registro de la información desde un portal de la nube, logrando ventajas tales como: la comunicación en tiempo real, la recopilando en minería de datos, prevención de falsificación de los productos, optimización de la logística y la producción, entre otros efectos interesantes tanto para el proveedor como los clientes [65].

El uso de la herramienta *Kanban* intervenida con tecnología *IoT*, ha sido otra propuesta en [4], siendo una solución logística para la recolección de residuos sólidos con la finalidad de reducir, automatizar y generar una fábrica inteligente que supervise el flujo del material de residuos que se expone al final de la línea de producción con los clientes, buscando rendir la eficiencia que propone *Kanban* sobre la reducción de estos desechos. Esta investigación trae una arquitectura sobre el control de transporte desde la obtención de los residuos del cliente hasta los puntos o contenedores donde se centra la información de los materiales, para luego, concluir en una sección final dónde se ofrece el servicio de vertedero, reciclaje o re-manufactura. Es importante reconocer que este trabajo expone una articulación interesante del *IoT*, donde su función suple la necesidad de brindar comunicación constante y adquisición de información hacia la nube, con la finalidad de supervisar en tiempo real el proceso [4].

Por último, en [68] se propone un concepto de igual pensamiento *lean IoT*, con la finalidad de generar una cadena de suministro ajustada con gestión desde el diseño del producto hasta la obtención del producto a manos del cliente, obteniendo en respuesta menor desperdicio, reducción al costo y el ciclo operativo, mejorar el valor del cliente y fortalecer la ventaja competitiva de la empresa [68].

Cada estudio propone una implementación de *lean manufacturing* con *IoT*, enfocado a diferentes contextos sobre la producción, todo derivado de un pensamiento de construcción que brinda altas expectativas por sus beneficios individuales tanto de la metodología como la tecnología.

Herramientas propuestas dentro de la interacción *lean IoT* y futuros desafíos

Uno de las investigaciones anteriormente referenciadas, que implica la propuesta *lean IoT* enfocado al uso de los métodos *Jidoka*, presenta una arquitectura *Jidoka* y propone la intervención de las herramientas o sistemas inteligentes basados en CPS o sistemas ciberfísicos [69]. El método brinda de forma rentable y eficaz la capacidad de mejorar la flexibilidad de los sistemas de producción en el contexto de la industria 4.0. Por otro lado, aprovecha las tecnologías para evolucionar su flexibilidad en la producción, ampliando así, sus contenidos y desarrollando el término de ser más “inteligente”. Resumiendo lo anterior *Jidoka* se enfoca en la capacidad de detectar anomalías, pero hoy en día gracias a la tecnología, puede congeniar los recursos tecnológicos, brindando comunicación, monitoreo, optimización, entre otros beneficios y resultados [69], [67].

Otra investigación [17], propone un marco para gestionar las tecnologías que incorporan la transformación digital, siendo enfocadas hacia el pensamiento *lean* mediante 5 pilares expuestos como herramientas ajustadas a la integración de la arquitectura del marco. El objetivo de este, es proporcionar una mejora al desarrollo de la gestión, la competencia, la economía y

todo lo relacionado a un nuevo modelo de negocio que beneficie a las empresas o industrias [17].

Esta investigación propone trabajar con *Hoshin Kanri*, una técnica que tiene como objetivo transformar la visión corporativa en objetivos y acciones que se relacionan en forma de cascada dentro de la jerarquía de una organización para lograr un ciclo PDCA (planear, hacer, comprobar y corregir) multinivel [17].

Otra herramienta propuesta para analizar, evaluar y tratar los riesgos, es la herramienta *VSM*, usada para la identificación de riesgos, ya que permite observar el estado actual y las oportunidades de mejoras al obtener el estado futuro que se desea [17]. Recordemos que *Value Stream Mapping (VSM)* es un método que se utiliza para ilustrar, analizar y mejorar los pasos requeridos en el proceso para entregar un producto o servicio de la manera más eficiente. Los mapas de flujo de valor permiten a los equipos identificar el flujo de los pasos del proceso y la información desde su origen hasta la entrega del producto o servicio a su cliente final [17].

Otras investigaciones proponen métodos de simulación como herramienta dentro de su desarrollo, el cual permite demostrar la eficacia de *lean* y las tecnologías de fabricación con *IoT*. Los métodos de simulación son herramientas que son utilizadas para el diseño del sistema y mejora, implementando nuevas tecnologías que imitan sobre un modelo. Por tanto, ayuda a comprender cómo las nuevas técnicas y las herramientas pueden realizar los ajustes en la práctica real [66].

Por ultimo, el estudio [4] propone dentro de la interacción *lean IoT*, desarrollar un trabajo con la herramienta *Kanban* para mejorar la recolección de residuos solidos. Ya que *Kanban* permite generar un sistema de información que interactúa con la metodología *Heijunka*, proporcionando una herramienta visual conformada por una estructura de datos que registra y monitorea el comportamiento del flujo de cada residuo adquirido entre puntos de recolección y unidades de desecho [4].

La siguiente investigación [70], propone un diseño de metodología *lean* para modelos de negocio y su aplicación al desarrollo de modelos de negocio de *IoT*, cuyo fin es reducir el costo y agilizar los proceso de diseño de un modelo de negocio incorporando la herramienta *Lean Startup* sobre las técnica *BMG (Business Model Generation)* y *BMC (Business Model Canvas)*. Con el fin de lograr estos objetivos la investigación [70] plantea el uso de *XBMC* y *SMC*, siendo un conjunto de modelos de visualización para una arquitectura empresarial.

1.4. Conclusiones

Luego de identificar las herramientas incorporadas en cada investigación que se alude al tema *lean IoT* [68], [4], [67], [66], se deduce que existen diversos estudios enfocados al mismo objetivo del proyecto de investigación a desarrollar, ya que comparten la necesidad de reducir los desperdicios industriales mediante el aporte de la transformación digital, brindando así a los procesos de fabricación la comunicación, el flujo de información, la capacidad de almacenamiento y la realimentación de datos para un uso óptimo dirigido a la toma de decisiones inteligente.

Tomando como punto de partida el uso de las tecnologías *IoT* que se identifican en cada investigación [68], [4], [67], [66] dirigida al carácter de aplicación industrial al cual solucionar, se analizan diversos elementos tanto ejecutados como planteados, cuyo desarrollo no mantienen un orden reglamentado sobre el como ejecutar de manera formal, por tanto se hace necesario pensar en una estructura o modelo que conlleve a contribuir en un orden ejemplar el método de integración *lean* con *IoT*, para este caso un modelo de marco de referencia o modelo *framework*.

1.5. Aportes

Este capítulo aporta una investigación de los diferentes elementos que componen tanto a *lean manufacturing*, la industria 4.0 y *lean 4.0*. Se parte en explorar los métodos del pensamiento *lean* y luego de las herramientas tecnológicas de la industria 4.0, pasando por la evolución de *lean* a *lean 4.0* para al final, aportar sobre el análisis de los marcos o modelos desarrollados al concepto de integración de *lean* digital, *lean IoT* o *lean 4.0*.

2. Capítulo 2: Procedimiento para desarrollar el marco de referencia

2.1. Conceptos generales

Para la elaboración del marco propuesto, primero se deben definir algunos conceptos de los cuales partir para su desarrollo, como los conceptos genéricos referentes a la estructura de un marco de referencia y el análisis de todas aquellas investigaciones propuestas cercanas al objetivo *lean IoT* o *lean digital* que involucren implementación o desarrollo de modelos de marcos de referencias. Además, se pueden incluir métodos de selección que permitan definir las técnicas de *lean manufacturing* mas apropiada a la necesidad a resolver.

2.1.1. Marco de referencia

El marco de referencia o *framework* es un esquema conceptual que simplifica la elaboración de una tarea o desarrollo de investigación, este permite ser complementado mediante el análisis de los antecedentes, teorías, lineamientos o protocolos de un proyecto de investigación, de un programa de acción o de un proceso a desarrollar [71], [72], [13].

Su principal función es ser un formato u esquema de los estudios otorgados a un tema y a partir de esta recolección de información, el investigador pueda explorar y complementar el marco con conceptos que sustenten y simplifiquen el desarrollo de la investigación [71], [72], [13].

En algunas investigaciones como [73] resume los marcos de referencia como rutas conceptuales que se proponen como pasos o fases de implementación detallada, estos son dirigidos hacia un proceso de investigación específico, en este caso, hacia una transición sobre las implementaciones de *lean manufacturing* en las industrias [73].

2.1.2. Métodos de selección

Existen diferentes técnicas o métodos de selección que permiten cuantificar los criterios de evaluación que componen a un elemento en específico, brindando así la identificación de la competencia prioritaria sobre la cual desempeñar o ejecutar [74]. Mediante el uso de estos métodos de selección se permite reducir la subjetividad en la toma de decisiones, puesto que se crea una serie de filtros que ayudan a elegir los elementos que cumplen los criterios estipulados entre alternativas y son altamente calificados para el desarrollo del propósito de investigación [75].

Existen diferentes ejemplos concretos de métodos de elección dedicados a este tipo de función de la selección de criterios, entre estos se presentan los siguientes:

- Método de decisión multicriterio (*MDMC*): es una metodología normativa que sirve de guía en el proceso y facilita la obtención de una decisión consecuente con los objetivos establecidos [76].
- Método de la suma ponderada: consiste en la suma ponderada, combinando diferentes entradas para crear un análisis integrado [77].

- Técnica de preferencia de orden por similitud (*TOPSIS*): es una técnica de programación matemática, que busca medir ciertas distancias de de la alternancia establecidas, hasta la solución ideal. [78].
- Técnica simple de calificación de atributos múltiples (*SMART*): para obtener el valor de clasificación de una alternancia, se obtiene a través de la media algebraica ponderada de los valores de utilidad asociados con ella [78].
- Método analítico jerárquico (*AHP*): El método de selección analítico jerárquico de *Saaty* es uno de los más promocionados dentro de las investigaciones y será el designado para abordar dentro de este desarrollo de investigación, *Saaty* proporciona su intervención a múltiples estudios de selección de alternativas con múltiples criterios cuantitativos o cualitativos, Permitiendo ser aplicado a diferentes campos de uso en la investigación, como la psicología, la ingeniería, la matemática, entre otros [78].

2.2. Procedimiento para el desarrollo y evaluación del marco de referencia

Para el desarrollo y evaluación del marco de referencia, se implementan los siguientes pasos:

- Primero, identificar, mediante una revisión bibliográfica, las investigaciones que aborden objetivos direccionados o cercanos al objetivo del proyecto de investigación a elaborar (remitirse al capítulo 1).
- Segundo, analizar la información correspondiente a la revisión bibliográfica para estipular criterios, herramientas, limitaciones y futuras investigaciones que proporcionaran al proyecto elementos fundamentales para justificar el desarrollo del marco de referencia (remitirse al capítulo 1).
- Tercero, estipular los componentes que conformarán la estructura de referencia del proyecto a desarrollar. Dentro de esta sección abordaremos los items estipulados dentro del subíndice caracterización de herramientas *Lean I4.0*.
- Cuarto, establecer los componentes del marco de referencia. Aquí se abordaran los conocimientos básicos y generales para conformar la estructura del marco de referencias.
- Quinto, evaluar el marco de referencia. En esta sección se referencian los métodos de evaluación aplicados por las investigaciones referentes al tema y se determinará el método para evaluar el marco a desarrollar.
- Sexto, definir las actividades correspondiente a puntos de mejora sobre el marco de referencia propuesto.

2.2.1. Caracterización de herramientas *Lean I4.0*

Al identificar y analizar la información que incorporará la estructura básica de la referencias para el proyecto, se inicia con proporcionar un estudio a los siguientes datos:

- Herramienta *lean manufacturing* a utilizar.
- Criterios de selección y métodos de clasificación.
- Herramientas y protocolos de las tecnologías de *IoT*.

2.2.2. Diseño marco de referencia

Según la investigación [72] “un marco de referencia para la implementación de *lean manufacturing*”, la siguiente información presenta una derivación de componentes para incorporar su correspondiente marco de investigación o marco conceptual, obteniendo así los presentes elementos:

- **Conceptualización:** Enfocado en presentar y reconocer los elementos generales que incorporan la información del tema a desarrollar, capturando tanto los beneficios, como ventajas y datos relevantes que brinden un concepto básico del tema a explorar.
- **Analizar la conceptualización:** se destina en analizar todos los componentes de investigación identificados referentes a los objetivos consultados y ligados al estudio a proponer, desarrollar o realizar.
- **Criterios a proponer:** al analizar cada elemento de la conceptualización se determina ciertos criterios requeridos a necesitar para fortalecer la hipótesis a justificar o plantear dentro de la investigación.
- **Diseño de implementación:** Dentro de esta fase se hace pertinente usar métodos de análisis e identificación para aclarar la selección del componente a desarrollar dentro del tema. En resumen, es común dentro de esta sección validarse de herramientas, técnicas o métodos de selección para el desarrollo de la investigación.
- **Implementación y evaluación:** Dentro de esta fase se construyen los pasos o componentes a ejecutar del tema seleccionado. Abordando elementos de interés que construyan o aporten indicadores de aplicación que permitan garantizar, la hipótesis planteada. Ejemplo la eficiencia, eficacia, etc.
- **Lógica y características del marco propuesto:** Se plantea un análisis sobre los resultados tras la implementación del marco, objetando características de mejoras proporcionadas por la investigación.

2.2.3. Evaluación en un caso de estudio

Las actividades dispuestas para evaluar el correcto funcionamiento de los pasos del marco de referencia se traza mediante la aplicación de un caso de estudio, con el fin de corroborar lo planteado en el marco. Como muchas otras investigaciones, se usa este método para validar sus conocimientos de investigación [4], [66], [67], [72], ya que el marco va enfocado a ser un modelo base para implementar dentro del proceso industrial, y es por ello que se requiere proponer algún método de evaluación rentable o favorable para evidenciar la eficiencia del marco. Para hacer esto posible, se parte en establecer los criterios básicos de la estructura del modelo para la planta de simulación industrial, permitiendo capturar resultados puntuales para evidenciar la garantiza de que los desarrollos impartidos en la estructura del marco brinden conocimiento y resultados eficientes a la hora de ser aplicados.

2.2.4. Mejora del marco propuesto

Luego de aplicar el marco de referencia en el caso de estudio propuesto, se realizará un análisis en cada una de las etapas integradas al modelo del marco ejecutado, permitiendo así identificar caracteres puntuales a proponer como mejoras para otras investigaciones. En otros

terminos, el marco de referencia queda sujeto a otras nuevas investigaciones aportantes al tema desarrollado.

2.3. Conclusiones

Los elementos de investigación proporcionados dentro del capítulo permiten definir las características que incorporan el proceso de desarrollo y evaluación de un marco de referencia. Para establecer estos elementos, el marco de referencia a plantear es tomado de distintas referencias de casos de estudio donde se integran desarrollos particulares de las herramientas *lean* y las tecnologías *IoT*.

2.4. Aportes

Los aportes otorgados en este capítulo se centran en los componentes del marco de referencia a desarrollar, los siguientes pasos como: conceptualización, analizar la conceptualización, criterios a proponer, diseño de implementación , implementación y evaluación, lógica y características del marco propuesto, corresponden a los elementos a incorporar como estrategia de guía para el marco del proyecto.

3. Capítulo 3: Desarrollo del marco de referencia.

Luego de establecer los pasos o fases para desarrollar un marco de referencia, presente en el capítulo 2, se continua con definir el marco de referencia propuesto.

En esta sección se va a seguir el procedimiento establecido para diseñar la estructura o el contenido del marco de referencia del proyecto de investigación.

3.1. Caracterización de herramientas *lean* seleccionadas.

Para la elaboración del marco de referencia propuesto, primero se debe definir una serie de pasos correspondientes al procedimiento del desarrollo en el capítulo 2, los cuales brindarán, como base, un cimiento de selección para los componentes del método *lean* y las tecnologías que incorporan los protocolos de *IoT*. La herramienta *lean* a tomar en cuenta es la que tenga mayor afinidad con la tecnología de *IoT* como se muestra en el cuadro 12.

El cuadro 12 representa la correlación de algunas herramientas *lean* evaluadas mediante una matriz de impacto. Esta otorga un valor de los métodos *lean* conforme al grado de interacción que poseen con ciertas tecnologías que integran la industria 4.0 [5]. La matriz divide las tecnologías en 3 secciones diferentes, denominadas: “adquisición y procesamiento de datos”, “comunicación maquina a maquina” e “interacción hombre-maquina”. Con lo anterior, se permite discernir a mayor profundidad los métodos *lean* óptimos para la selección de estudio dentro de la investigación.

Herramientas	Adquisición y procesamiento de datos						Comunicación (M2M)			Interacción hombre-maquina (HMI)	
	Sensores y actuadores	Cloud computing	Big Data	Análisis	Integración vertical	Integración horizontal	Realidad virtual	Realidad aumentada			
5's	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Medio**	Alto***			
<i>Kaizen</i>	Bajo*	Medio**	Alto***	Alto***	Alto***	Alto***	Alto***	Alto***			
<i>Jit</i>	Medio**	Medio**	Alto***	Alto***	Alto***	Medio**	Bajo*	Medio**			
<i>Jidoka</i>	Bajo*	Alto***	Alto***	Alto***	Medio**	Medio**	Bajo*	Bajo*			
<i>Heijunka</i>	Medio**	Medio**	Alto***	Alto***	Alto***	Medio**	Medio**	Bajo*			
Estandarización	Medio**	Alto**	Alto***	Alto***	Medio**	Medio**	Alto***	Alto***			
<i>Takt time</i>	Bajo*	Bajo*	Alto***	Alto***	Alto***	Alto***	Alto***	Bajo*			
<i>Pull flow</i>	Medio**	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Alto***	Alto***	Bajo*	Bajo*			
Separación hombre-máquina	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Alto***	Alto***			
Personal y equipo de trabajo	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Bajo*	Alto***	Alto***			
Reducción de desperdicios	Bajo*	Bajo*	Medio**	Alto***	Alto***	Alto***	Bajo*	Bajo*			

Cuadro 12: Matriz de impacto de herramientas *lean* sobre tecnologías *IoT* [5]

Como primer paso se debe reconocer el grado de compatibilidad que tienen los métodos *lean* con las tecnologías *IoT*.

Como segundo paso se deben estipular una serie de criterios razonables, sujetos al deseo de las competencias a desempeñar con la herramienta *lean* a seleccionar, tales como:

- Un criterio enfocado a la automatización. Diferentes referencias comparten las posibilidades y las prácticas de los métodos *lean* llevados a cabo con la automatización, presentando un escenario importante que debe relacionarse con la herramienta a trabajar. [79], [80].
- Identificar una herramienta que tenga mayor desempeño al requerimiento o genere un mayor aporte al proceso.
- La reducción de *stocks* es un elemento importante a tener en cuenta respecto a la herramienta a elegir en el proyecto de investigación.
- La reducción en los tiempos es un elemento de gran importancia para lograr beneficios en las líneas de producción y lograr mejoras en el proceso.

Al decidir los criterios a orientar en la investigación, por ultimo, se complementa el desarrollo con el método de selección multicriterio, permitiendo evaluar cuantificadamente el valor de las herramientas *lean* con base al peso que los criterios seleccionados aporten fuertemente sobre ellas, de esta manera se ayudara a escoger la herramienta que mejor se adapte a la necesidad que cada proceso según requiera.

3.2. Diseño de marco de referencia.

Acompañando el propósito de plantear un marco de referencia integrado por las etapas aptas a implementarse sobre cualquier tipo de proceso o industria, da pie a plantear el diseño practico del modelo del marco de referencia bajo los conocimientos estudiados y referenciados anteriormente sobre la filosofía *lean*, la tecnología *IoT* y los conceptos integrados a la estructura de los marcos de referencia o *frameworks*.

3.2.1. Selección de herramienta *lean*.

Para seleccionar una de las herramientas ofrecidas por *lean manufacturing* se propone usar un método de selección multicriterio. En estos métodos de selección es importante estipular una serie de criterios que ofrezcan un análisis de los diferentes métodos *lean* en las industrias. Por esto la selección de la herramienta se deben tomar en cuenta las áreas a mejorar, y con respecto a estas, definir los criterios de selección.

En este caso, el método selecto de evaluación es el *Analytic Hierarchy Process* o método del proceso analítico jerárquico (*AHP*), dado que ofrece la ventaja de poder usar criterios cuantitativos y cualitativos para la selección de la herramienta que mejor se adapte a una correcta implementación.

Proceso analítico jerárquico - *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

Es una técnica conocida también como método de *Saaty* con la cual de forma estructurada se busca llevar a cabo una selección de decisiones, logrando de esta manera la selección de la mejor solución según las necesidades y el problema.

Este método ofrece un marco de referencia racional y comprensivo para: dar solución a los problemas de decisión; relacionar elementos a los objetivos generales; evaluar alternativas de solución; y cuantificar los elementos [81], haciendo una comparación entre criterios y posibles soluciones para cumplir los objetivos como se muestra en la figura 5.

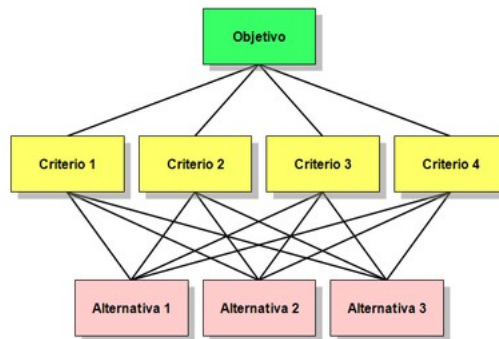


Figura 4: Diagrama de comportamiento del *AHP*.

Esquema general del método:

- Definir una jerarquía de decisión con niveles
 1. Objetivo en el nivel 1.
 2. Criterios implicados en el nivel 2 (cuantitativos o cualitativos).
 3. Las alternativas o opciones posibles en el nivel 3.
- Estimar la preferencia de los criterios comparándolos por pares por una cierta escala, para determinar el peso o importancia de cada criterio.
- Contrastar las alternativas por parejas dependiendo del empleo de cada criterio y con el uso de una escala de comparación.
- Selección de la mejor alternativa, es decir, la alternativa que tiene mayor peso.

Esquema de comparación por pares del método *AHP*:

Como primer paso se deben disponer los criterios en forma de matriz cuadrada para lograr definir las correspondientes comparaciones entre cada uno de los criterios. por este motivo, la matriz recibe el nombre de comparación por pares. además, para dar solución a esta matriz, *Saaty* creó una escala de medición para determinar los valores correspondientes, denominada

“escala fundamental” como se muestra en la tabla 12, [81].

Escala fundamental del método *AHP*.

Juicio verbal	Valor numérico
Extremadamente importante	9
	8
Muy fuertemente mas importante	7
	6
Fuertemente mas importante	5
	4
Moderadamente mas importante	3
	2
Igualmente mas importante	1

Cuadro 13: Escala de valoración de *AHP*.

De esta manera, se comienzan a asignar los valores a cada par de criterios mediante las evaluaciones adecuadas, llenando la matriz con los valores correspondientes a los criterios de la primera fila con los de cada columna. A esta matriz desarrollada se le denominara “matriz inicial pareada” y se representa a continuación [81].

	C ₁	C ₂	C ₃	W
C ₁	1	3	6	0.60
C ₂	1/3	1	3	0.23
C ₃	1/6	1/3	1	0.17

Cuadro 14: Comparación pareada criterio a criterio.

Dado el anterior ejemplo expuesto en el cuadro 14, se puede interpretar que el criterio asignado sobre de la primera columna “**C1**” a comparación con el criterio de la primera fila “**C1**” es igual de importante. Es por esto, que al relacionarlo con la escala fundamental del *AHP* se le otorga un valor de **1** al espacio fila-columna **C1**, **C1**. Pasando a la siguiente fila sobre la misma columna **C1** se considera que el criterio de la fila **C2** es moderadamente menos importante que el de la columna **C1**, asigna entonces a la primera columna y segunda fila el valor de **1/3** según la escala de *AHP*, pasando a la siguiente fila sobre la misma columna **C1** se considera muy fuertemente más importante que el criterio de la fila **C3**, de esta manera se asigna un valor de **1/6**. Para cambiar el valor a **6** implicaría que el criterio **C3** fuera **6** veces más importantes que el criterio **C1**, pero dado el caso expuesto es totalmente lo contrario. Por lo tanto, ya definidos los elementos del vector de la primera columna se tendrán asignados los valores para $v1 = (1; 1/3; 1/6)$ y **W** es el peso asignado a cada uno de los criterios [81].

Después de obtener la matriz inicial pareada con los valores de la escala fundamental del método *AHP* se procede a normalizarla. Cuando se refiere al término de normalizar, se define que para cada elemento de la matriz debe ser dividido por la sumatoria de todos los elementos de la respectiva columna en la cual se ubica el valor del elemento a normalizar. Para sinteti-

zar lo mencionado, se presenta la ecuación siguiente el cual resume el cálculo anteriormente expresado [81]:

$$V_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum a_{ij}} \quad (1)$$

Por tanto, los pasos para determinar la denominada “matriz normalizada”, se parte de lo siguiente [81]:

1. Al tener la matriz inicial pareada con los valores de la escala de *AHP*, se suma todos los valores de cada columna.
2. Se divide cada elemento de la matriz inicial pareada por el total de la suma de su respectiva columna anteriormente calculada.
3. Los valores anteriormente calculados se integran a conformar la matriz de normalización, siendo ubicados dentro del lugar de elemento correspondiente.
4. Al tener la matriz normalizada se calcula con los valores obtenidos el promedio de cada fila.

De esta manera, se determina el criterio con mayor importancia a partir del promedio calculado en el paso 4.

Vector promedio de la matriz normalizada de criterio a criterio:

$$\begin{matrix} \text{Criterio}_1 \\ \text{Criterio}_2 \\ \dots \\ \text{Criterio}_m \end{matrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \\ P'_m \end{bmatrix}$$

Donde \mathbf{m} es el número de criterios y P'_j es la prioridad de cada criterio con respecto a el objetivo global. Al determinar el “vector promedio” de la matriz inicial pareada de los criterios, se procede a calcular la matriz pareada con los mismos pasos anteriormente mencionados, pero a comparación de las alternativas con cada uno de los criterios. esto quiere decir [81]:

1. Que se debe aplicar nuevamente la escala de *AHP* (*Saaty*) para obtener una matriz pareada, pero esta vez valorada respecto a la importancia según un criterio. por tanto, tantos criterios tengamos serán la cantidad de matrices que saldrán respecto a estos.
2. Luego se obtendrá la matriz normalizada para cada matriz pareada.
3. Se procederá a obtener el vector de promedio que corresponde a los valores de cada fila de la matriz normalizada.

Después de tener el vector peso correspondiente a los promedios de todas las matrices normalizadas dependientes al criterio por el cual se evaluó, se procede a calcular la “matriz de prioridades” mediante el contraste de alternativas con respecto a los criterios [81].

Comparación pareada criterio a criterio:

$$\begin{array}{c}
n/m \\
\text{Alternativa}_1 \\
\text{Alternativa}_2 \\
\dots \\
\text{Alternativa}_n
\end{array}
\begin{bmatrix}
\text{Criterio}_1 & \text{Criterio}_2 & \dots & \text{Criterio}_m \\
P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\
P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\
\dots & \dots & \dots & P_{3m} \\
P_{1n} & P_{2n} & \dots & P_{nm}
\end{bmatrix}$$

Donde P_{ij} es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j para cada posible opción. Esto quiere decir que cada columna se compone de los vectores promedios resultado de las matrices normalizadas de las alternativas obtenidas anteriormente. Como siguiente paso se obtendrá la prioridad global dependiente a cada una de las alternativas. para hacer este calculo, se debe multiplicar la matriz de prioridad con el vector de prioridad o vector promedio obtenida de la matriz normalizada de los criterios. Donde Pg_i , entonces, es el resultado de la prioridad global con respecto a las alternativas evaluadas para cada criterio [81].

Matriz de prioridad global:

$$\begin{bmatrix}
P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\
P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\
\dots & \dots & \dots & P_{3m} \\
P_{1n} & P_{2n} & \dots & P_{nm}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
P'_1 \\
P'_2 \\
\dots \\
P'_m
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
Pg_1 \\
Pg_2 \\
\dots \\
Pg_n
\end{bmatrix}$$

Es muy importante resaltar que el “vector de prioridad” o “vector de promedio” extraído de la matriz normalizada de los criterios debe resultar con un grado de consistencia para ser permitida en la evaluación de los cálculos siguientes y así obtener el vector de prioridad global [81].

Es por esto que para la toma de decisiones de todo el proceso de cálculo, se debe tener en cuenta la denominada “consistencia” como requisito de juicio para la matriz de comparación pareada. La consistencia nos brinda la capacidad de evaluar la veracidad de esta matriz pareada. Si el valor de consistencia es aceptable, el proceso tiene una calidad aceptable y se puede continuar, pero si el valor es inaceptable, se deben modificar los datos en la comparación pareada [81].

Por lo tanto, $A_{n \times n}$ es consistente si

$$a_{ij} * a_{jk} = a_{ik} \quad (2)$$

para

$$i, j, k = 1, 2..n. \quad (3)$$

Para hallar el grado de consistencia es necesario crear una medida cuantificable para la matriz de comparación $A_{n \times n}$, dado que la matriz es perfectamente consistente produce una matriz $N_{n \times n}$ normalizada de elementos W_{ij} de tal forma que todas las columnas son idénticas [81].

Por último, la matriz de comparación correspondiente a \mathbf{A} , se puede determinar a partir de \mathbf{N} dividiendo los elementos de la columna i entre W_i . esto quiere decir que se debe tomar la

Matriz pareada de los criterios (**A**) y multiplicarla por el vector promedio **W**, obtenido de la matriz **N** (normalizada) [81].

Matriz **A** de comparación para calcular vector $A * P$:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_1/W_2 & 1 & \dots & W_2/W_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

y la definición para **A** sería:

$$\begin{bmatrix} 1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_1/W_2 & 1 & \dots & W_2/W_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nW_1 \\ nW_2 \\ \dots \\ nW_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, se dice que **A** es consistente si y solo si

$$A * W = n * W \quad (4)$$

Donde **W** es el vector columna de los pesos relativos W_i se aproxima con el promedio de los **n** elementos de la fila de la matriz normalizada **N** haciendo [81].

$$A * W = \lambda_{max} * W \quad (5)$$

Donde $\lambda_{max} \geq n$ por lo tanto entre más cercano se encuentre λ_{max} a **n**, más consistente será la matriz de comparación **A**. Para calcular el valor de λ_{max} se deben sumar los valores obtenidos tras la multiplicación de la matriz **A** con el vector **W** (**A*W**). Como resultado se obtiene el valor de λ_{max} , para luego proceder a calcular la razón de consistencia (**RC**) como el cociente entre el índice de consistencia de **A** y el índice de consistencia aleatorio [81].

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad (6)$$

IC = índice de consistencia de **A**:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

La expresión matemática para calcular el valor λ_{max} es la siguiente:

$$A * W = \lambda_{max} * W \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n a_{ij} * W) = \lambda max * \sum_{i=1}^n W_i \quad (9)$$

Esto quiere decir que para calcular λ_{max} se debe calcular primero el vector columna \mathbf{A} y después sumando sus elementos. ICA es el índice de consistencia aleatoria y \mathbf{A} es el índice de consistencia de una matriz de comparación pareada generada de manera aleatoria donde ICA depende del numero de elementos que se comparan con los siguientes valores [81].

Nº de elementos	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ICA	0,58	0,89	1,11	1,24	1,32	1,40	1,45	1,49	1,513	1,535	1,555

Cuadro 15: Valores ICA o de Índice de Consistencia de Aleatoriedad.

Por último, recordar que en el cuadro 15 el valor de n deriva de la cantidad de criterios estipulados a calcular en el método de *Saaty* [81].

Identificación del procedimiento de la herramienta *lean*.

El método de selección *AHP* aporta una correcta elección de la herramienta *lean* a requerir, de esta manera, se arroja una selección mediante valores cuantificables que aportados al criterio mejor destacado brindan una clara elección de la requerida herramienta *lean*. Luego, se deben identificar mediante referencias o investigaciones previas los pasos correspondientes al procedimiento de implementación que conlleva a desarrollar la herramienta *lean* escogida.

Un punto clave dentro del proceso de identificación es consultar los avances que también ha tenido la herramienta con las tecnologías *IoT*, permitiendo conceptualizar más el apoyo de la información y brindar así, un mejor entendimiento de las áreas sobre las cuales implementar mencionadas tecnologías.

3.2.2. Integración de la tecnología *IoT* en la herramienta *lean*.

Para esta sección, se debe, como primer paso, identificar los protocolos y las capas del modelo *OSI* con el cual la herramienta puede tener interacción. Recordando que el modelo *OSI* cuenta con los siguientes capas: capa física, capa de enlace, capa de red, capa de transporte, capa de sesión, capa de presentación y capa de aplicación. Para esto es necesario tener claro y conocer los procedimientos de la herramienta *lean*.

Luego se identifican los niveles que pueden tener interacción con los protocolos de *IoT*. Teniendo los siguientes niveles: cosas, conectividad, infraestructura global, gestión de datos, análisis de datos, aplicación y personas o procesos. De esta manera, se identifican las etapas a implementar con la tecnología *IoT*, respondiendo a los correspondientes protocolos de comunicación. Estos varían dependiendo de de las necesidades del proceso y cliente, garantizando la aplicación de la tecnología *IoT* de una manera correcta.

Representación gráfica del flujo general de la herramienta.

Al obtener la herramienta seleccionada con ayuda del método anterior se debe realizar un diagrama de flujo en el cual se identifique el proceso para la implementación de la herramienta con *IoT* mostrando cada capa en la que tiene interacción.

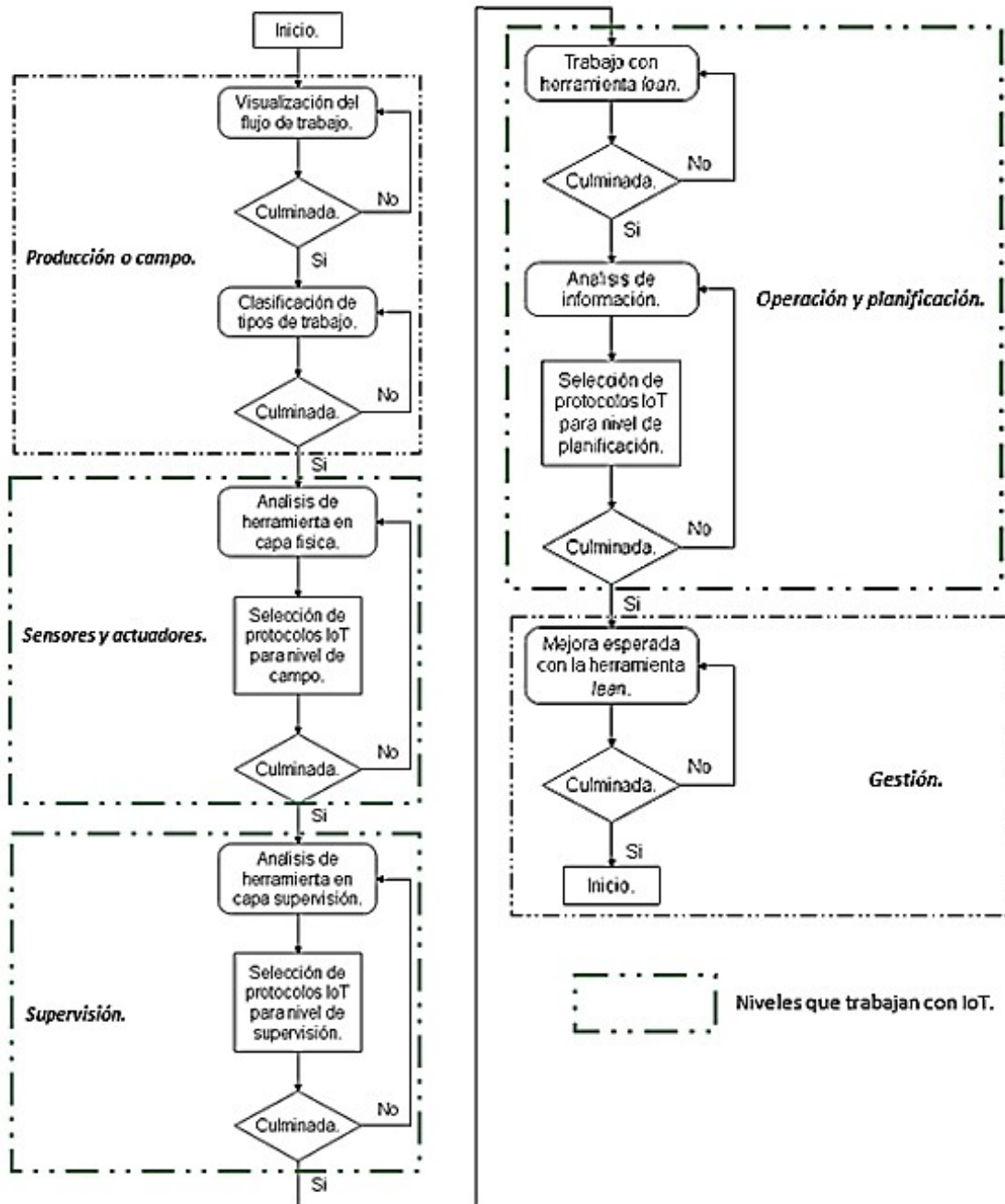


Figura 5: Estructura de arquitectura general de *lean* y *IoT*, fuente propia.

3.2.3. Selección de la tecnología *IoT*.

En esta etapa se debe identificar las necesidades de cada procesos para reconocer si es necesario implementar las configuraciones especiales de *IIoT*. Para lograr esto, se tiene presente las características a requerir de las distintas operaciones de fabricación, como la sensibilidad y la seguridad de la información al cual se le hace seguimiento. De esta manera, se analiza y concluye que el soporte que brindan las dos tecnologías en función de las configuraciones que se ofrece en el proceso industrial, *IoT* se desarrolla de una manera similar a *IIoT*, permitiendo tanto simular con mayor facilidad y menos complejidad los objetivos específicos a cumplir con la investigación.

Por otra parte, debido a la dificultad del contexto del proceso a estudiar a la hora de evaluar el marco de referencia propuesto, se decide optar por la tecnología *IoT*, dado que el proceso es sencillo y las complejidades para simular los dispositivos de *IIoT* en procesos reales con mayores exigencias tanto físicas (robustez, resistencia y adaptación al ambiente) y seguridad del manejo de información son mucho mayores.

IoT presenta una variedad de conocimientos referente a su modelo de protocolos, donde independiente a cada capa, se le analiza una versatilidad diferente y un enfoque dependiente al uso de implementación [3], [82]. Generando, con ello, una variedad de aplicaciones que se encuentran ligadas a la necesidad que requiera el cliente, ya sea para uso físico, inalámbrico, de bajo consumo energético o alto consumo energético, con una proyección de corto o largo alcance, como la gestión del flujo de mensajes o datos dispuesto a una estructura global intercomunicada, entre otros.

De igual manera, se debe identificar los niveles del modelo *TCP/IP* y los protocolos que pueden ser utilizados en cada nivel. Los niveles presentes en el modelo *TCP/IP* son: capa de acceso a la red, internet, transporte y aplicación.

La figura 6, plasma una comparación de los modelos *OSI*, *TCP/IP* e *IoT*.

Niveles.	Modelo osi.	Modelo TCP/IP.	Protocolo IoT.
Nivel 7.	Capa de aplicación: CoPA, XMPP.	Capa de aplicación: <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">capa de aplicación web: HTTP.</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">transferencia de archivos: FTP, TFTP.</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">correo electronico: SMTP, POP, IMAP.</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">configuración de host: BOOTP, DHCP.</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px;">sistema de nombres: DNS.</div>	Personas y procesos: toma de decisiones basada en APPS y datos.
Nivel 6.	Capa de presentación: HTTP, MQTT.		Aplicación: aplicaciones personalizadas apartir de datos.
Nivel 5.	Capa de sesión: DDS, AMQP.		Análisis de datos: reporte, minería, aprendizaje automatico.
Nivel 4.	Capa de transporte: TCP, UDP.	Capa de transporte: TCP, UDP.	Gestión de datos: Big Data, almacenamientos de datos.
Nivel 3.	Capa de red: 6LoWPAN, IPv4, IPv6.	Internet: IP, NAT, ICMP, OSPF, IPv4, IPv6, ICMPv4, ICMPv6.	Infraestructura global: nube (publica, privada, hibrida.)
Nivel 2.	Capa de enlace: IEEE 802.15.4, LPWAN.	Capa de acceso a la red: ARP, PPP, WLAN, ethernet, controladores de interfaz.	Conectividad: comunicación, protocolos, M2M, WIFI.
Nivel 1.	Capa física: bluetooth, ethernet, LTE, NFC, RFID, WIFI.		Cosas: sensores, controladores, actuadores.

Figura 6: Protocolos de *IoT* [3].

Protocolos de *IoT* - secciones de sensores, operaciones y supervisión

Como se observa en el diagrama de la figura 17, existen tres (3) secciones, en los cuales se encuentra distribuido el sistema *Kanban* con los protocolos de *IoT* “nivel de sensores, nivel de supervisión y nivel de operación y planificación” y que se explican a continuación en dos grupos principales según los protocolos que se pueden implementar [3]:

Sección 1. sensores y actuadores: para la implementación de una herramienta *lean* en el nivel de sensores y actuadores, se busca identificar los sensores y los protocolos de comunicación más adecuados para su correcto funcionamiento, de acuerdo a las características que se necesitan en el proceso y necesidades del cliente, como lo son: estándar, frecuencia de banda, red, topología, velocidad de transmisión, alimentación, rango y aplicaciones como se puede identificar en la figura 7 [3].

CARACTERÍSTICAS.	6LoWPAN.	ZigBee.	BlueTooth.	RFID.	NFC.	SigFox.	Celular.	Z-Wave.
<i>Estándar.</i>	IEEE 802.15.4.	IEEE 802.15.4.	IEEE 802.15.1.	RFID.	ISO/IEC 14443 A&B/IS X-6319-4.	SigFox.	3GPP y GSM, GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA (3G), LTE (4G).	Z-Wave.
<i>Frecuencia de banda.</i>	868 Mhz (EU), 915 Mhz (USA), 2.4 Ghz (Global)	2.4 Ghz.	2.4 Ghz.	125 KHz, 13.56 Mhz, 902-928 Mhz.	125 KHz, 13.56 Mhz, 860 Mhz.	868 Mhz (EU), 902 Mhz (USA).	Banda común de celular.	868 Mhz, 908 Mhz.
<i>Red.</i>	WPAN.	WPAN.	WPAN.	De proximidad.	Red P2P.	LPWAN.	WNAN.	WPAN.
<i>Topología.</i>	Red de malla o estrella.	Red de malla, estrella o árbol.	Red de bus o estrella.	Red P2P.	Red P2P.	Red de estrella.	NA.	Red de malla.
<i>Velocidad de transmisión.</i>	250 Kbps.	250 Kbps.	1 Mbps.	4 Mbps.	106, 212 o 424 Kbps.	100 bps (UL), 600 bps (DL).	NA.	40 Kbps.
<i>Alimentación.</i>	1-2 años de vida con batería, bajo consumo.	30 mA, bajo consumo.	30 mA, bajo consumo.	Ultra bajo consumo.	50 mA bajo consumo.	10 mW, 100 mW.	Alto consumo de energía.	2.5 mA, bajo consumo.
<i>Rango.</i>	Rango corto 10 – 100 m.	Rango corto 10 – 100 m.	Rango corto 15–30 m.	Rango corto hasta 200 m.	Rango corto 0-10 Cm, 0-1 m, 10 Cm – 1 m.	Rango largo 10 Km (urbana), 50 Km (rural).	Rango de varios Km.	Rango corto 30 m (interiores), 100 m (exteriores)
<i>Aplicaciones comunes.</i>	Monitoreo y control vía internet.	Casa, industria, monitoreo y control.	Producto inalámbricos, aplicaciones de audio.	Seguimiento, inventario, acceso.	Pagos y acceso.	Alumbrado público, medidores de energía.	M2M.	Casa, monitoreo, control.

Figura 7: Protocolos *IoT* para nivel de campo (fuente propia)

Sección 2 y 3: Supervisión, operación y planificación: existen múltiples protocolos de comunicación con los cuales se pueden trabajar, los cuales pueden variar de acuerdo a la necesidad de cada cliente o proceso. En la figura 8 se muestran algunos de los principales protocolos utilizados en la actualidad para las áreas de supervisión, operación y planificación, donde se muestran con sus principales características con las que se mejoraría el proceso de selección [3].







CARACTERÍSTICAS.	 DeviceNet.	 ModBus.	 ProfiNet.	 ProfiBus.	 Serial Attached Scsi (SAS).	 Ethernet.
Topología.	Troncal, puntual, bifurcación.	Bus, estrella, árbol, red con segmentos.	Bus, árbol, anillo y estrella.	Bus, estrella y anillo.	Bus.	Bus, estrella, malla y árbol.
Soporte.	Par trenzado, fibra óptica.	Par trenzado, coaxial.	Par trenzado, fibra óptica e inalámbrico.	Par trenzado, fibra óptica.	Coaxial, SATA.	Coaxial, par trenzado y fibra óptica.
Max dispositivos.	2048 nodos.	250 p/segmento	50 unidades	126 p/segmento.	16 por bus. 127	400 p/segmento.
Velocidad de transmisión.	500 k.	1.2 Kbps - 115.2 Kbps	100 Mbps	500 Kbps.	22.5 Gbits	100 Mbps
Rango.	100 m – 500 m, 6 Km con repetidores.	350 m	100 m, 80 Km	24 Km	10 Km.	10 Km
Tipo de comunicación.	Maestro/esclavo, múltiple maestro, de igual/igual.	Maestro/esclavo.	Maestro/esclavo.	Maestro/esclavo, igual/igual.	Maestro/esclavo.	Maestro/esclavo, igual/igual.

Figura 8: Protocolos *IoT* para nivel de supervisión y operaciones . (fuente propia)

Luego de identificar la herramienta *lean* con su proceso y los distintos protocolos de comunicación pertenecientes a la tecnología *IoT*, se ejecuta como pro-siguiente a ello, las etapas que conllevan a la implementación y evaluación de la herramienta *lean IoT*, cabe resaltar que los resultados obtenidos a partir de estas secciones quedan dispuestos a dirección del implementador, con el fin de obtener información que tanto pueda ser requerida para analizar, estudiar o en uso de la toma de decisiones para realimentar dentro del proceso de control. Es por ello, que se resalta hacer un proceso de diagnostico del entorno sobre el cual aplicar la herramienta *lean*, con el fin de analizar los problemas puntuales a solucionar con las adaptaciones de la integración *lean* y la tecnología *IoT*.

3.3. Marco de referencia.

La figura 9, es la representación gráfica del marco de referencia propuesto, con el fin de implementar cualquier herramienta *lean* integrada con tecnología *IoT*. Donde se busca presentar alguna actividades secuenciales para brindar una implementación de herramienta *lean* con tecnología *IoT* de forma ordenada y estructurada. Por tanto, gracias a la referencia de artículos e investigaciones que incorporan el estudio de este trabajo, se plantea las siguientes 5 etapas para la estructura del marco de referencia diseñado.

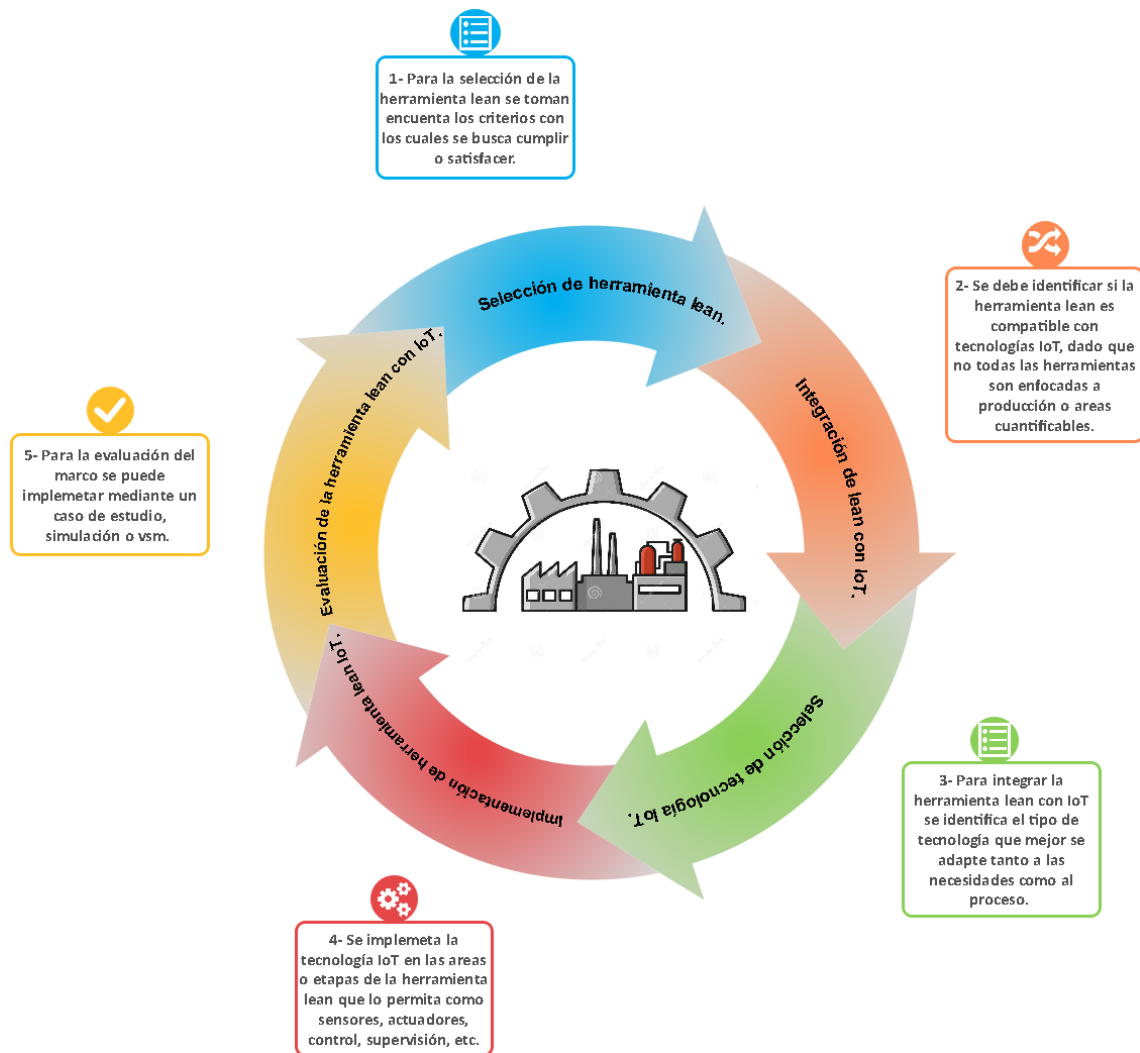


Figura 9: Representación gráfica del marco de referencia.

El marco de referencia propuesto en la figura 9, es un punto de partida en la estandarización para la aplicación de cualquier herramienta *lean* integrada con *IoT*, partiendo en establecer que los criterios y la tecnología a seleccionar deben ser razonables a los fines sobre el cual se quiera obtener en el proceso, como rendimiento, minimización de desperdicios, entre otros.

Partes:

Selección de herramienta *lean*: como primer paso se hace la selección de la herramienta a aplicar. Esto, mediante la identificación de criterios según cada proceso y las necesidades de estos, garantizando que la herramienta seleccionada sea la mejor opción para la mejora que se quiere lograr.

Integración de *lean* con *IoT*: en la integración de la herramienta *lean* con *IoT* se deben identificar en el proceso las etapas y componentes, de igual manera las características de la herramienta seleccionada *lean* y de esta manera seleccionar las etapas donde se aplicada la herramienta *IoT*.

Selección de herramienta *IoT*: después de tener claro los dos pasos anteriores, se debe seleccionar la tecnología que mejor se adapte al proceso, teniendo en cuenta velocidades de transmisión, capacidad de datos y costo de implementación.

Implementación de herramienta *lean IoT*: en esta etapa después de identificadas las etapas y características del proceso, se implementa la tecnología *IoT* donde el proceso lo requiera y según las características de la herramienta a aplicar.

Evaluación de la herramienta *lean con IoT*: por ultimo se debe evaluar la eficiencia de la herramienta *lean IoT*, donde se pueda comparar su comportamiento antes y después de la implementación e identificando posibles mejoras adicionales.

La representación gráfica del marco de referencia propuesto es de manera cíclica, dado que cuenta con una etapa de evaluación con la cual se busca analizar posibles errores o mejoras.

3.4. Conclusiones.

Se logra identificar que tanto para la selección de la herramienta *lean* como de las tecnologías de *IoT*, existen múltiples criterios a tener en cuenta, cada uno dependiendo de las necesidades o características de los procesos, las cuales deben ser identificadas para lograr desarrollar de manera correcta el marco de referencia propuesto.

Para el diseño del marco de referencia, se debe identificar las herramientas y el procedimiento de la herramienta seleccionada. De igual manera, se identifican las capas en las que se puede implementar la tecnología *IoT* y protocolos de comunicación, para lograr la integración de la manera mas óptima con la herramienta.

También se aportan características enfocadas a las tecnologías *IoT*, con la cual se busca mejorar el método de selección al escoger el tipo de tecnología que mejor se adapte al proceso, teniendo en cuenta criterios como la distancia, la velocidad de transmisión, bajo consumo energético, etc. Todo esto dependiendo de los protocolos que se desee utilizar ya sea mediante el modelo *TCP/IP*, *OSI* o *IoT*.

A través del procedimiento para el desarrollo definido anteriormente se logro llegar al marco de referencia que fue diseñando.

3.5. Aportes

El presente capítulo logra proponer el marco de referencia que expone el como implementar de manera estandarizada la selección de *lean con IoT*, todo esto organizado, mediante una serie de pasos identificados dentro de investigaciones y evidenciadas referenciadas introducidas al

capítulo. Por otra parte, se diseña de manera gráfica el marco de referencia propuesto, con el fin de presentar un claro concepto de lo que aborda la estructura del marco al introducir la integración *lean IoT*.

4. Capítulo 4: Evaluación del marco de referencia en un caso de estudio

4.1. Aplicación del marco de referencia en un caso de estudio

El presente capítulo se enfoca en la aplicación del marco de referencia establecido en el capítulo 3. Para cumplir debidamente esta estructura a implementar, primero, se parte con la selección de la herramienta *lean* mediante el uso del método *AHP*, para ello, se debe establecer sus respectivos criterios de selección acordes al interés o el enfoque *lean* a fortalecer, segundo, seleccionar la tecnología *IoT* y tercero, identificar los protocolos de comunicación mejor adaptados al desarrollo del caso de estudio planteado. En este caso el objeto de estudio analizar, es una proceso de ensamble virtual simulado a través de la herramienta *factory I/O*.

4.1.1. Selección de herramienta *lean*

Para seleccionar la herramienta *lean*, los criterios definidos para su elección de acuerdo al proceso de simulación, son los siguientes:

- Que la herramienta *lean* sea una herramienta enfocada al uso dentro de la producción.
- Que la herramienta tenga un alto grado de interacción con las tecnologías que incorporan la industria 4.0
- Que la herramienta este orientada a enfocarse también a desarrollos de la automatización.
- Que la herramienta cumpla un grado de eficiencia al interés del uso de las industrias.
- Que la herramienta intervenga sobre la regulación o disminución de *Stocks*.
- Que la herramienta intervenga en la reducción de los tiempos de producción.

Para cumplir los siguientes criterios se hizo necesario profundizar diferentes referencias bibliográficas [1], [15] que aseguraran las experiencias de las herramientas *lean* bajo sus distintos entornos de uso y conocimiento.

Enfocándose en analizar el primer criterio que abarcar consultar una herramienta con la capacidad de intervenir sobre la producción, se identifica sobre algunas investigaciones de *lean* un conjunto de orden denominado arquitectura “casa *lean*” [1], [15], que proporciona la clasificación de las herramientas que integran como elementos fundamentales a la metodología. Tomado de lo anterior, se menciona un pequeño grupo de técnicas que son participes en su uso dependiendo el tipo orientación al cual serán aplicadas, entre estas categorías se encuentran las herramientas operativas, las herramientas de diagnostico y las herramientas de seguimiento:

Para las herramientas operativas se contempla los siguientes elementos:

- 5's
- *SMED*
- *Kanban*

- *TPM*

Las herramientas de diagnóstico:

- *VSM*

Las herramientas de seguimiento:

- Control visual
- *KPI*

Al categorizar las herramientas y establecer los criterios anteriores, se procede a ejecutar el método de selección, en este caso el denominado proceso analítico jerárquico. Primero se obtiene una matriz de comparación pareada entre los seis (6) criterios cuya función indicara el mejor criterio a seleccionar como alternativa, luego se proseguirá a evaluar este criterio escogido entre los demás planteados, ver cuadro 16.

Comp. Pareada.	Producto	Tecnología	Automatización	Eficiencia	Elim stock	Red de tim de prod
Producto.	1	1/2	5	5	7	5
Tecnología.	2	1	5	3	9	6
Automatización.	1/5	1/5	1	1/3	4	3
Eficiencia.	1/5	1/3	3	1	5	3
Elim stock.	1/7	1/9	1/4	1/5	1	1/3
Redu de tim de prod.	1/5	1/6	1/3	1/3	3	1

Cuadro 16: Comparación pareada entre criterios.

Al destacar los valores de la matriz pareada se da inicio luego a encontrar el vector propio, siendo este calculo el responsable a presentar el criterio con mayor importancia o peso como se muestra a continuación en el cuadro 17.

Criterios.	Pesos.
Producción.	0,3079.
Tecnología	0,3753.
Automatización	0,0906.
Eficiencia	0,1401.
Elim. De stocks	0,0294.
Redu. De tim de pro.	0,0567.

Cuadro 17: Peso de cada criterio.

En el cuadro 17 se determina que el criterio con mayor peso a desempeñar es el segundo, “Que la herramienta tenga un alto grado de interacción con las tecnologías que incorporan la industria 4.0”. Ahora como siguiente paso, se presentan las matrices a comparar con cada alternativa entre si, y a su vez, teniendo en cuenta la dependencia a cada criterio preestablecido. Por tanto, se obtienen dentro del el ejercicio seis (6) matrices de comparación presentes en los cuadros 18, 19, 20, 21, 22, 23.

Criterio 1	<i>Kaizen</i>	<i>JIT</i>	<i>Jidoka</i>	<i>Heijunka</i>	Estandarización	<i>Takt Time</i>	<i>Poka-Yoke</i>	<i>VSM</i>	<i>TPM</i>	<i>Kanban</i>
<i>Kaizen</i>	1	2	3	2	3	4	5	3	3	1/3
<i>JIT</i>	1/2	1	1	4	1/3	5	3	1/3	1/3	5
<i>Jidoka</i>	1/3	1	1	3	2	3	1	1/4	4	6
<i>Heijunka</i>	1/2	1/4	1/3	1	1/5	1	3	1/3	1/5	1/5
Estandarización	1/3	3	1/2	5	1	5	4	1	2	1/3
<i>Takt time</i>	1/4	1/5	1/3	1	1/5	1	1/5	1/7	1/5	1/6
<i>Poka-Yoke</i>	1/5	1/3	1	1/3	1/4	5	1	1/5	1/7	1/7
<i>VSM</i>	1/3	3	4	3	1	7	5	1	1	1/3
<i>TPM</i>	1/3	3	1/4	5	1/2	5	7	1	1	3
<i>Kanban</i>	3	1/5	1/6	5	3	6	7	3	1/3	1

Cuadro 18: Comparación de alternativas con respecto al criterio 1.

Criterio 2	<i>Kaizen</i>	<i>JIT</i>	<i>Jidoka</i>	<i>Heijunka</i>	Estandarización	<i>Takt time</i>	<i>Poka-Yoke</i>	<i>VSM</i>	<i>TPM</i>	<i>Kanban</i>
<i>Kaizen</i>	1	3	4	3	1/2	4	4	4	6	1
<i>JIT</i>	1/3	1	6	4	1/2	4	5	8	4	2
<i>Jidoka</i>	1/4	1/6	1	1/3	1/4	3	3	5	2	1/4
<i>Heijunka</i>	1/3	1/4	3	1	1/3	4	4	6	4	1
Estandarización	2	2	4	3	1	4	5	6	2	3
<i>Takt time</i>	1/4	1/4	1/3	1/4	1/4	1	1	3	2	1/3
<i>Poka-Yoke</i>	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1	1	3	2	1/4
<i>VSM</i>	1/4	1/8	1/5	1/6	1/6	1/3	1/3	1	1/2	1/5
<i>TPM</i>	1/6	1/4	1/2	1/4	1/2	1/2	1/2	2	1	1/4
— <i>Kanban</i>	1	2	4	1	1/3	3	4	5	4	1

Cuadro 19: Comparación de alternativas con respecto al criterio 2.

Criterio 3	<i>Kaizen</i>	<i>JIT</i>	<i>Jidoka</i>	<i>Heijunka</i>	Estandarización	<i>Takt time</i>	<i>Poka-Yoke</i>	<i>VSM</i>	<i>TPM</i>	<i>Kanban</i>
<i>Kaizen</i>	1	1	1/3	3	1/5	3	3	5	2	1/3
<i>JIT</i>	1	1	3	5	2	5	3	7	4	3
<i>Jidoka</i>	3	1/3	1	5	2	4	5	6	6	2
<i>Heijunka</i>	1/3	1/5	1/5	1	1/3	3	3	2	3	1/3
Estandarización	5	1/2	1/2	3	1	4	4	5	5	3
<i>Takt time</i>	1/3	1/5	1/4	1/3	1/4	1	1	3	3	3
<i>Poka-Yoke</i>	1/3	1/3	1/5	1/3	1/4	1	1	4	3	2
<i>VSM</i>	1/5	1/7	1/6	1/2	1/5	1/3	1/4	1	3	1/3
<i>TPM</i>	1/2	1/4	1/6	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/3
<i>Kanban</i>	3	1/3	1/2	3	1/3	1/3	1/2	3	3	1

Cuadro 20: Comparación de alternativas con respecto al criterio 3.

Criterio 4	<i>Kaizen</i>	<i>JIT</i>	<i>Jidoka</i>	<i>Heijunka</i>	Estandarización	<i>Takt time</i>	<i>Poka-Yoke</i>	<i>VSM</i>	<i>TPM</i>	<i>Kanban</i>
<i>Kaizen</i>	1	3	3	3	3	4	5	1/5	3	1/2
<i>JIT</i>	1/3	1	3	3	1/3	1	5	1/5	3	1/5
<i>Jidoka</i>	1/3	1/3	1	3	1/3	3	1	1/5	1/3	1/5
<i>Heijunka</i>	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/6
Estandarización	1/3	3	3	3	1	4	1/4	1/7	1/5	1/6
<i>Takt time</i>	1/4	1	1/3	3	1/4	1	1/3	1/7	1/5	1/7
<i>Poka-Yoke</i>	1/5	1/5	1	3	4	3	1	1/5	1/3	1/4
<i>VSM</i>	5	5	5	7	7	7	5	1	4	1
<i>TPM</i>	1/3	1/3	3	5	5	5	3	1/4	1	1/3
<i>Kanban</i>	2	5	5	6	6	7	4	1	3	1

Cuadro 21: Comparación de alternativas con respecto al criterio 4.

Criterio 5	<i>Kaizen</i>	<i>JIT</i>	<i>Jidoka</i>	<i>Heijunka</i>	Estandarización	<i>Takt time</i>	<i>Poka-Yoke</i>	<i>VSM</i>	<i>TPM</i>	<i>Kanban</i>
<i>Kaizen</i>	1	1/3	3	1	5	5	3	2	5	1/3
<i>JIT</i>	3	1	5	3	5	3	3	3	3	1/3
<i>Jidoka</i>	1/3	1/5	1	1/2	4	3	3	1/3	3	1/3
<i>Heijunka</i>	1	1/3	2	1	3	3	3	1/3	3	1/5
Estandarización	1/5	1/5	1/4	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5
<i>Takt time</i>	1/5	1/3	1/3	1/3	3	1	1/3	1/5	1/3	1/5
<i>Poka-Yoke</i>	1/3	1/3	1/3	1/3	3	3	1	1/3	1/3	1/5
<i>VSM</i>	1/2	1/3	3	3	3	5	3	1	1/2	1/5
<i>TPM</i>	1/5	1/3	1/3	1/3	5	3	3	2	1	1/3
<i>Kanban</i>	3	3	3	5	5	5	5	5	3	1

Cuadro 22: Comparación de alternativas con respecto al criterio 5.

Criterio 6	<i>Kaizen</i>	<i>JIT</i>	<i>Jidoka</i>	<i>Heijunka</i>	Estandarización	<i>Takt time</i>	<i>Poka-Yoke</i>	<i>VSM</i>	<i>TPM</i>	<i>Kanban</i>
<i>Kaizen</i>	1	1	3	2	3	1/3	3	3	3	1/3
<i>JIT</i>	1	1	3	1	3	1/3	1/3	1/3	1	1/3
<i>Jidoka</i>	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/5	3	1/3	1/3	1/3
<i>Heijunka</i>	1/2	1	3	1	3	1/3	4	1	3	1/2
Estandarización	1/3	1/3	3	1/3	1	1/5	3	1/3	1/3	1/4
<i>Takt time</i>	3	3	5	3	5	1	3	3	2	1/3
<i>Poka-Yoke</i>	1/3	3	1/3	1/4	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3
<i>VSM</i>	1/3	3	3	1	3	1/3	3	1	1	1/4
<i>TPM</i>	1/3	1	3	1/3	3	2	3	1	1	1/3
<i>Kanban</i>	3	3	3	2	4	3	3	3	3	1

Cuadro 23: Comparación de alternativas con respecto al criterio 6.

Por último, se obtiene del resultado de la ejecución del método *AHP* de *Saaty* que como mejor alternativa el cual desarrollar dentro del proyecto de investigación es la herramienta *Kanban*, dado su mayor peso de responder cada criterio frente a los demás resultados en comparación. Seguido a este valor se obtiene como segunda respuesta u opción es la herramienta *Kaizen*. Ver cuadro 24:

Alternativas.	Resultados.
<i>Kaizen.</i>	0,1168.
<i>JIT.</i>	0,0818.
<i>Jidoka.</i>	0,0894.
<i>Heijunka.</i>	0,0311.
Estandarización.	0,0778.
<i>Takt time.</i>	0,0269.
<i>Poka-Yoke.</i>	0,0323.
<i>VSM.</i>	0,1047.
<i>TPM.</i>	0,0797.
<i>Kanban.</i>	0,1288.

Cuadro 24: Resultados por método del *AHP*.

Identificación del procedimiento de la herramienta *lean*.

Como resultado de ejecutar el método de selección *AHP* se obtuvo que *Kanban* proporciona una excelente oportunidad de integración y desempeño conforme a los criterios establecidos en

la sección 4.1.1. Por tanto, prosiguiendo a desarrollar la segunda etapa del modelo del marco de referencia propuesto, es pertinente primero identificar las características de la herramienta *lean* seleccionada, con el fin de profundizar y definir el respectivo proceso implementación acorde a las necesidades del marco de referencia.

En el siguiente ítem se identifica los pasos claros del comportamiento tradicional de la herramienta seleccionada:

Pasos para implementación de *Kanban*

Paso 1: Visualización del flujo de trabajo.

Para crear el tablero *Kanban*, se debe identificar el flujo de trabajo desde el comienzo hasta el final, identificando así, cada uno de los pasos o áreas involucradas en el proceso de fabricación. Al aclarar esto, luego se prosigue a intervenir cada área como las columnas del tablero de visualización *Kanban* [3].



Figura 10: Visualización del flujo de trabajo. (fuente propia)

Paso 2: Clasificación del tipo de trabajo.

Identificar cada tipo de trabajo que se realiza por cada área, un ejemplo de esto es el siguiente: pedido al proveedor, transporte, llegada, ensamble u otras [3].

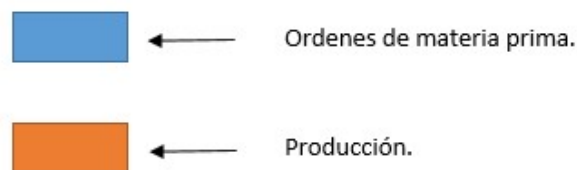


Figura 11: Clasificación del tipo de trabajo. (fuente propia)

Paso 3: Creación de tarjetas.

Existen dos clases de sistemas de tarjetas *Kanban* como “*Kanban* de transporte” el cual consta de transportar la tarjeta por cada una de las etapas de un proceso. La otra se llama “*Kanban* de producción” que consiste en controlar de forma armónica la fabricación de productos y es utilizada para ordenar la producción de la parte retirada por el proceso posterior. Estos dos

tipos de *Kanban* están siempre unidos a los contenedores que llevan las piezas [83].

Al identificar el tipo de tarjetas *Kanban* se crean el número de tarjetas necesarias donde se tiene cada una de las actividades a realizar en el proceso, como información del producto e información que se considere relevante. Estas pueden ser físicas o virtuales [3].

Paso 4: Visualización de tareas en tablero *Kanban*.

Escribir las tareas que se está realizando en cada área y ubicarlas en la columna correspondiente del proceso, dando prioridad a las tareas inmediatamente ejecutadas [3].



Figura 12: Visualización de tareas en tablero *Kanban*. (fuente propia)

Paso 5: Trabajo con ayuda del tablero *Kanban*.

Se trabaja con las tareas de la parte superior y cuando esta es culminada se pasa a la siguiente columna en la parte inferior, manteniendo un flujo de trabajo contante [3].

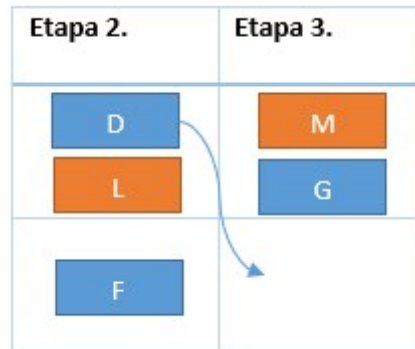


Figura 13: Trabajo con ayuda del tablero *Kanban*. (fuente propia)

Paso 6: Análisis de información.

Se analiza la información presentada por el tablero *Kanban*, identificando los posibles problemas que se puedan encontrar como cuellos de botella y la posible causa de estos, logrando así, plantear una correcta solución para cada uno y con ello permitir almacenar esta información

en registros de bases de datos [3].

Paso 7: Mejora el flujo de trabajo.

Con la aplicación de *Kanban* se busca mejorar los flujos de trabajo y que estos se mantengan. Dado que también brinda una ayuda visual logra que cada tarea sea culminada poniendo límites de actividades por cada columna del área respectiva, permitiendo con esto, llevar control de las actividades que se deben realizar como máximo en un periodo de tiempo determinado [3].

Al determinar los pasos básicos que incorporan el comportamiento tradicional y la ejecución de *Kanban*, como siguiente característica a resaltar son las oportunidades al beneficio de reducción de sus desperdicios y los efectos directos a los procesos subsecuentes y precedentes, ya que debe resaltarse los enfoques a cuales aspirar como oportunidad de beneficio.

Desperdicios que se reducen con la aplicación de *Kanban* 4.0.

Se debe seleccionar los procesos a los cual aplicar el sistema *Kanban*, para identificar los desperdicios a que enfocar y los criterios a los cuales trabajar [84].

Procesos subsecuentes:

Conocido como proceso río abajo en los procesos de manufactura, donde se debe considerar, que no se deben mandar productos defectuosos a las siguientes etapas, mandar la cantidad de material necesario y producir la cantidad de material necesario [84].

Procesos precedentes:

Se identifica en el proceso las secciones que reciben las partes ensambladas y se observa el proceso hacia atrás, lo cual lo hace precedente al proceso en el que se encuentra actualmente. Un proceso subsecuente en un caso particular podría ser el precedente al otro, dependiendo de la posición del flujo del proceso, donde la herramienta *Kanban* toma piezas de los procesos precedentes y las lleva a los procesos subsecuentes, teniendo así, constante comunicación en el flujo del proceso [84].

La herramienta *Kanban* permite:

- Calidad perfecta desde el comienzo hasta el final.
- Minimización de desperdicios.
- Mejora continua.
- Flexibilidad.
- Implementación a largo plazo.
- Reducción de *stocks*.
- Identificación de cuellos de botella.

Teniendo en cuenta los 8 desperdicios u 8 mudas de *lean manufacturing* anteriormente mencionados en el capítulo 1, se prosiguen a determinar los desperdicios a los cuales la herramienta *Kanban* ayuda a su disminución, los cuales son [4]:

- Desperdicios por sobre producción.
- Desperdicios por exceso de inventarios.
- Desperdicios por retrasos, esperas y paros.
- Desperdicios en transporte y envíos.

Es por esto que si bien *Kanban* es un sistema de control de la producción utilizado para la fabricación Justo a tiempo (*JIT*) y este aprovecha al máximo las capacidades de los operarios [83] permitiendo con ello, rendir en los tiempos de operación y mitigar el desperdicio referido a retrasos o esperas. Dentro del caso de estudio a realizar, el desperdicio dispuesto a mitigar con la aplicación *Kanban* integrado con *IoT* sera enfocado al aprovechamiento del recurso del tiempo de operación mencionado en esta sección de párrafo.

4.1.2. Integración de la tecnología *IoT* en la herramienta *lean*.

Al identificar el procedimiento de la herramienta *Kanban*, luego se procede a determinar las etapas de producción sobre el cual integrar la tecnología *IoT* y seguidamente se identifica la tecnología apropiada de los protocolos y sensores que son pertenecientes a los diferentes niveles de la estructura *IoT*.

Dentro de esta sección es importante resaltar tener identificado el comportamiento del proceso de la herramienta dentro de la pirámide de la automatización (ver figura 13), para con ello, así permitirse representar gráficamente el flujo general de operación y determinar las secciones sobre el cual la tecnología *IoT* permite ser introducida.

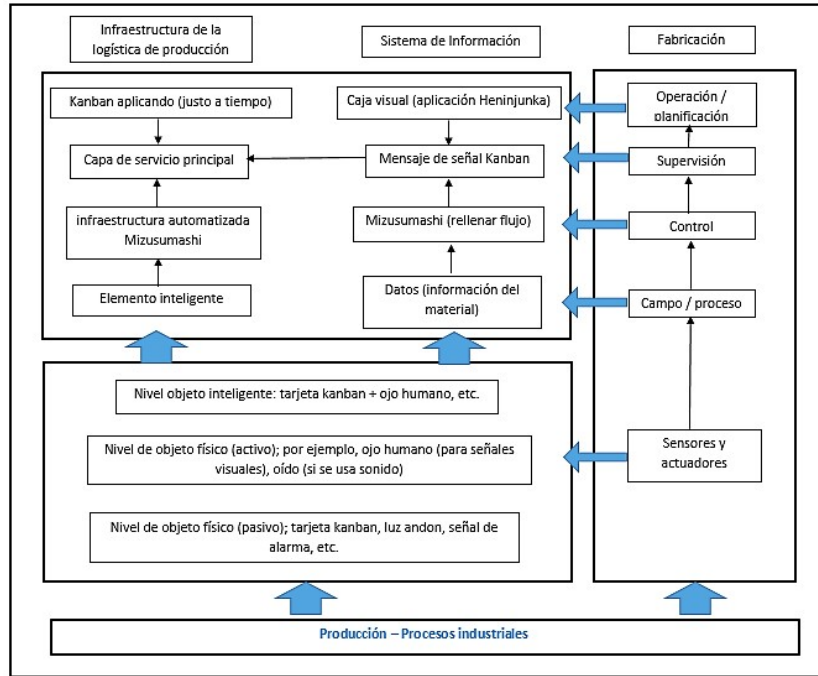


Figura 14: Arquitectura de *Kanban* [4].

Representación gráfica del flujo general de la herramienta *Kanban*.

Al diseñar todos los elementos que incorporan al marco formal a desarrollar dentro del proyecto de investigación, se establece la siguiente representación gráfica del flujo general del proceso de *Kanban*.

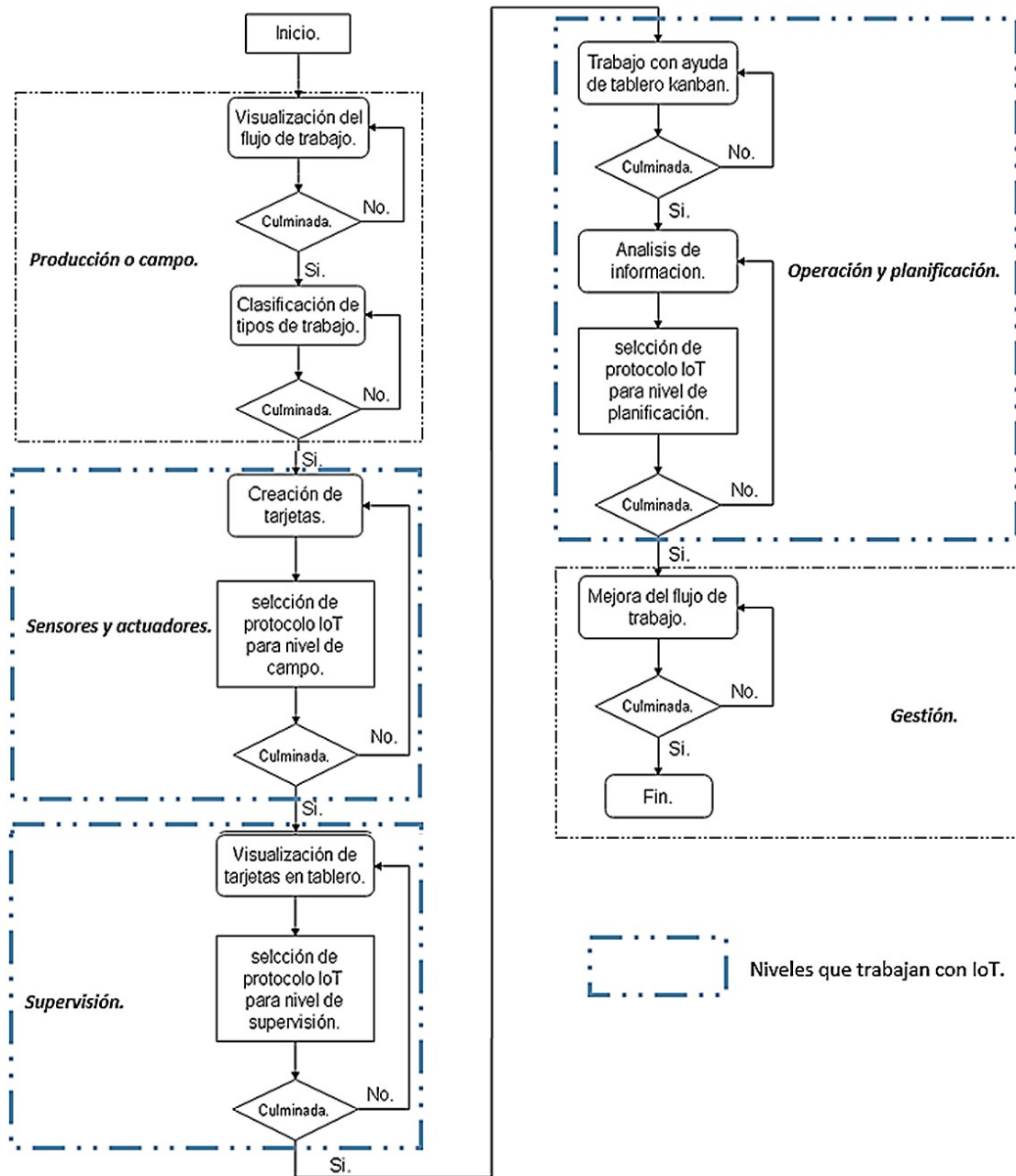


Figura 15: Estructura de arquitectura *Kanban IoT*, fuente propia.

Dentro de esta arquitectura planteada, se plasma de manera global los componentes seleccionados a integrar ya mencionados en la sub-subsección 3.2.2, permitiéndose interpretar lo siguiente:

1. Que las herramientas tecnológicas como sensores y actuadores, pertenecen al nivel mas bajo de la jerarquía y que cuya aplicación se ve reflejada dentro de su funcionamiento con la creación e integración de las tarjetas *Kanban* a los productos.
2. El nivel de campo o producción debe permitirse indicar el comportamiento del flujo del proceso de trabajo, permitiendo clasificarlo dependiendo la operación correspondiente a la cual se este visualizando el producto.
3. El nivel de supervisión, debe complementarse con la información dispuesta desde el nivel de producción, transportando e indicando el flujo de operación que lleve los productos dependiendo de su clasificación dentro del proceso.
4. El nivel de operación y planificación, debe incorporar la tecnología del tablero *Kanban*, cuya función se expresa en la visualización, el registro y la comunicación de la información del producto hacia los operarios o trabajadores. Permitiendo extraer desde este punto información relevante en beneficio de datos importantes el siguiente nivel.
5. El nivel de gestión, debe analizar el comportamiento de los productos supervisados en tiempo real y elaborar planes, soluciones y manejos del producto que se este desarrollando o fabricando.

Por tanto, según la arquitectura planteada, los niveles de campo, supervisión, operaciones y planificación, deben incorporar protocolos de tecnología *IoT*, esto mediante el complemento o uso de la estructura representada en la figura 14, la cual integra todos aquellos elementos *Kanban* a los niveles definidos dentro del diagrama de flujo de proceso expresados en la figura 15.

4.1.3. Selección de la tecnología *IoT*.

Al identificar la dificultad del proceso para la evaluación del marco de referencia propuesto, se decide utilizar la tecnología de *IoT*. Dado que el proceso es sencillo y no hay maneras de simular las dificultades que pueden soportar los dispositivos de *IIoT* en procesos reales tanto físicas como de seguridad.

Para la selección de dispositivos se deben tener en cuenta las anteriores figuras 7 y 8, las cuales exponen tanto las características como los protocolos para los distintos dispositivos a escoger, permitiéndose brindar una variedad de opciones.

Remitiéndose a la figura 16 “protocolos *IoT*” es claro definir en primer instancia los dispositivos que harán parte del nivel 2 de campo y los protocolos de comunicación correspondiente a los niveles. Además la figura 16, plasma una comparación de los modelos *OSI*, *TCP/IP* e *IoT* con respecto a *Kanban* para identificar los niveles sobre los cuales se integra.

Niveles.	Modelo osi.	Modelo TCP/IP.	Protocolo IoT.	Kanban.
Nivel 7.	Capa de aplicación: CoPA, XMPP.	Capa de aplicación: capa de aplicación web: HTTP.	Personas y procesos: toma de decisiones basada en APPS y datos.	Capa de aplicación: kanban y heurística avanzada.
Nivel 6.	Capa de presentación: HTTP, MQTT.	transferencia de archivos: FTP, TFTP. correo electrónico: SMTP, POP, IMAP.	Aplicación: aplicaciones personalizadas apartir de datos.	
Nivel 5.	Capa de sesión: DDS, AMQP.	configuración de host: BOOTP, DHCP. sistema de nombres: DNS.	Análisis de datos: reporte, minería, aprendizaje automático.	Capa de servicio principal: gestor kanban.
Nivel 4.	Capa de transporte: TCP, UDP.	Capa de transporte: TCP, UDP.	Gestión de datos: Big Data, almacenamientos de datos.	
Nivel 3.	Capa de red: 6LoWPAN, IPv4, IPv6.	Internet: IP, NAT, ICMP, OSPF, IPv4, IPv6, ICMPv4, ICMPv6.	Infraestructura global: nube (pública, privada, híbrida.)	
Nivel 2.	Capa de enlace: IEEE 802.15.4, LPWAN.	Capa de acceso a la red: ARP, PPP, WLAN, ethernet, controladores de interfaz.	Conectividad: comunicación, protocolos, M2M, WIFI.	Capa de enlace: automatización kanban.
Nivel 1.	Capa física: bluetooth, ethernet, LTE, NFC, RFID, WIFI.		Cosas: sensores, controladores, actuadores.	Capa física: bluetooth, ethernet, LTE, NFC, RFID, WIFI.

Figura 16: Protocolos de *IoT* [3]

Como se identifica en la tabla 16, se incorporan en la última columna los elementos de la herramienta seleccionada para el caso de estudio, en este ejemplo *Kanban*.

Dispositivos: Para la selección de tecnologías *IoT*, se busca implementar dispositivos que mejor se adapten a las necesidades del proceso, para este caso se cuenta con algunos ejemplos de criterios para selección.

- Frecuencia de banda media.
- Distancia corta o mediana de comunicación.
- Velocidad de transmisión media-alta.
- Bajo consumo energético.
- Costo de implementación bajo.

Se identifica que la tecnología que mejor se incorpora a estos según la figura 7 son los sensores de *NFC* y *RFID*. Siendo dispositivos que manejan la misma frecuencia y son los dispositivos más utilizados para el control de inventario y aplicaciones en cadenas de suministro [85].

Ambas opciones cuentan con características que se pueden adaptarse perfectamente al proceso, ya que pueden identificar objetos de manera única para un mayor control por medio de radio frecuencia, *NFC* puede funcionar como lector de etiquetas garantizando un intercambio seguro de información [85].

Las etiquetas activas *RFID*, cuentan con una fuente de poder propia logrando que el lector mande una señal y esta responda con información única del producto, de igual manera las etiquetas pasivas no cuentan con fuente, pero son alimentadas desde el lector *RFID* [85].cc

La tecnología *RFID* consta de 3 elementos [85]:

- Lectores: encargados de mediar la información entre las etiquetas y la computadora.
- Antenas: se encarga de la emisión y recepción de ondas electromagnéticas.
- Etiquetas: son microchips que contienen una micro antena y almacena datos.

Los sistemas *RFID* se clasifican en dos tipos según sus etiquetas activas y pasivas, las etiquetas activas contienen una batería y su campo magnético tienen un alcance de 100 metros, por lo contrario, las etiquetas pasivas no cuentan con ningún tipo de fuente de alimentación, esta recibe la energía de un campo electromagnético generado por el lector logrando un alcance de 3 metros [85].

Los lectores cuentan con 3 rangos principales:

- Baja 125 Khz.
- Alta 13,56 Mhz.
- Ultra alta UHF.

Siendo la de alta la más utilizada, logrando obtener datos de manera implícita sin grandes esfuerzos.

Los sistemas *NFC*: Esta tecnología trabaja en un rango de 5 a 10 centímetros. Trabaja principalmente en rango de 13,56 Mhz y transfiere datos hasta por una velocidad de 424 Kbits/seg y fue diseñada principalmente para ser compatible con etiquetas *RFID* [85].

Consta de dos elementos principales:

- El iniciador: encargado de iniciar y controlar el intercambio de información.
- El objetivo: es el encargado de responder las peticiones del iniciador.

La tecnología *NFC* tiene dos características que la diferencia de la *RFID* que son [85]:

- Un dispositivo *NFC* puede funcionar tanto de iniciador como de objetivo.
- Dos dispositivos *NFC* se reconocen de manera automática solo con acercarse a una distancia corta.

Selección de protocolo para supervisión, operación y planificación.

Para la selección de protocolos de comunicación igual que para la selección de dispositivos se debe tener en cuenta una serie de criterios los cuales pueden variar según las necesidades del proceso, algunos de estos criterios pueden ser [86]:

- Topologías flexibles.
- Velocidad de transición media-alta.
- Tipos de materiales de red amplios.
- Amplio rango de alcance.
- Amplio número de dispositivos.

Teniendo en cuenta los anteriores criterios, se decide escoger para el presente trabajo el protocolo con mayor adaptabilidad a los criterios como lo es *Device-Net*. Siendo uno de los protocolos más utilizados a nivel industrial. Utilizado ampliamente en la automatización para la conexión entre dispositivos de control. Este protocolo permite la comunicación entre sensores con dispositivos de control [86].

Existe un producto *IoT Gateway* o dispositivo *IoT* denominado *DeviceNet/MQTT-converter* [87], el cual ayuda a la integración de las redes *Device-Net* con el internet en las cosas. Donde al implementar estos convertidores se puede enviar y recibir información desde *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)* [88] hacia *Master Device-net*, como lo es un *PLC Rockwell*, las comunicaciones *MQTT* pueden ser cifradas mediante protocolos *TLS/SSL* garantizando una comunicación segura.

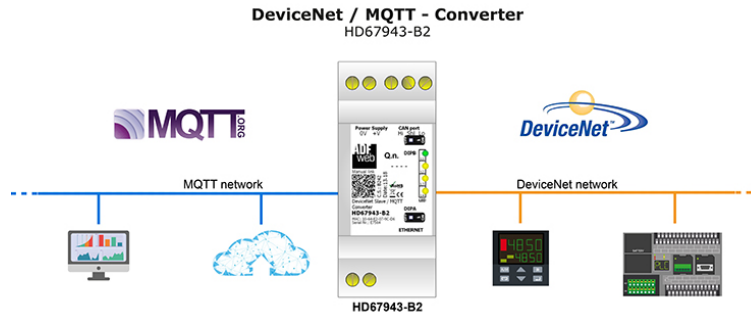


Figura 17: convertidor *Device-Net* a *IoT*.

4.1.4. Implementación de la herramienta *lean IoT*.

Luego de identificar las secciones del flujo de operación sobre el cual implementar la tecnología *IoT* y de haber seleccionado los respectivos protocolos y dispositivos a utilizar, se continúa a implementar la integración *lean IoT* escogida sobre cada una de las áreas del caso de estudio a simular virtualmente. Es por esta razón, que al proceder a realizar esta implementación primero se debe desarrollar previamente un proceso de diagnóstico del entorno de fabricación sobre el cual adaptar el marco de referencia, con la finalidad de extraer tanto descripción, etapas y problemas de la planta que brinden conocimiento del porque adaptar *lean IoT*.

Descripción de la planta.

El proceso virtual “ensamblaje de circuitos electrónicos impresos” se dedica a la fabricación y ensamblaje de placas de circuitos electrónicos mediante su respectivo proceso de impresión electrónica.

Dentro de la estructura del proceso de la línea de ensamble, se inicia produciendo los sustratos básicos que son utilizados en la fabricación de la placa base, los cuales serán conectados a los diferentes componentes electrónicos definidos por el circuito a elaborar. Este sustrato debe contar con características especiales a la hora de fabricar, como por ejemplo, que sea suficientemente rígido para soportar los elementos electrónicos, demostrar una resistencia a la humedad, ser fácil de taladrar, que presente una buena disipación térmica para el calor generado por pérdidas, resistencia al calor al operar con el soldador, entre otras. Los componentes electrónicos son ensamblados con soldadura que por lo general se compone de una aleación de estaño-plomo, para luego sobre la base de la placa, se implemente las pistas de cobre respectivas para la conducción eléctrica, por último, se imprimen los textos, etiquetas o esquemas que brindaran el indicativo de los componentes electrónicos, como por ejemplo los nombres y la configuración de cada elemento electrónico.

Problema

En los procesos de fabricación semi-automatizados que no presentan métodos idóneos de producción como lo son las herramientas *lean manufacturing*, estos presentan diferentes inconvenientes o debilidades generales, tales como:

- Debilidad en la recopilación de información, como los datos generados del resultado de toda activada ejecutada en la cadena de valor.
- Inconvenientes con la comunicación y control de los procesos de fabricación.
- Generación de *stocks*, paradas o cuellos de botella.

Entre otras debilidades a fines que pueden solucionar independientemente los métodos u enfoques de *lean manufacturing*.

Es por esta razón que como primer paso a desarrollar dentro de esta etapa del marco, se enfoca en analizar el entorno de fabricación sobre el cual implementar el marco de referencia, esto con la finalidad de brindar una identificación o diagnóstico de todos los inconvenientes, debilidades, problemas o acciones a fortalecer en el proceso.

Es por esto que al analizar el caso de estudio “Planta de fabricación de ensamble de circuitos electrónicos impresos” se identifica un proceso de fabricación cuyas actividades de operación son semi-automáticas y dependientes al factor humano en su responsabilidad para ejecutar correspondida actividad. Con esto, se reconoce que el tiempo requerido para desempeñar las actividades de fabricación generan una oportunidad de ser fortalecidas desde el punto de vista de los métodos *lean manufacturing*.

Pero lo anterior, no es suficiente dado que la herramienta *lean* en el caso de estudio, requiere brindar solución a los tiempos desperdiciados por las debilidades o problemas anteriormente mencionados en el primer párrafo de este ítem, es por ello que al ejecutar el marco de referencia se opta por seleccionar *Kanban*. Pero dado que *Kanban* se usa para brindar un diagnóstico al flujo de producción, los datos importantes del proceso están sujetos al factor humanos, en otras palabras, el tiempo que se emplea para ejecutar tanto actividades de operación como actividades de la herramienta *Kanban* están sujetos al ritmo de trabajo del operario. Por consiguiente es en este punto donde las tecnologías *IoT*, incorporan soluciones razonables a los medios del transporte de información, brindando así, un fortalecimiento considerable a los resultados de esta herramienta *Kanban*, ver figura 27.

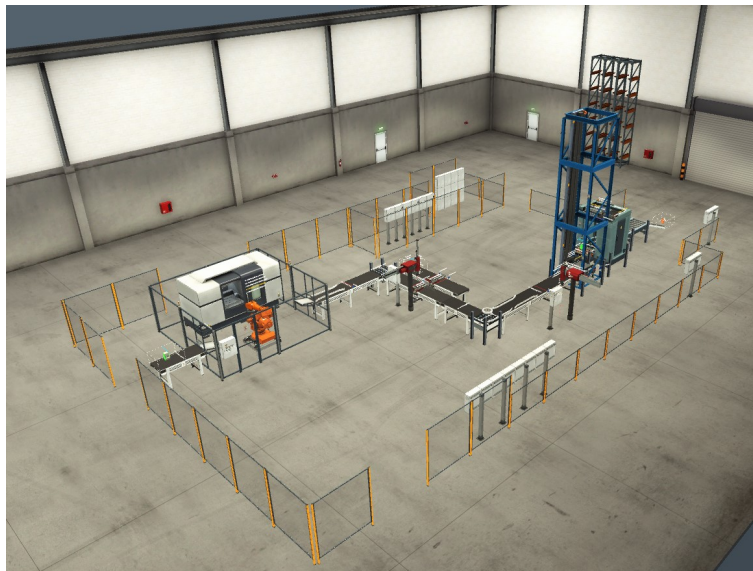


Figura 18: Planta de ensamblaje de circuitos electrónicos impresos

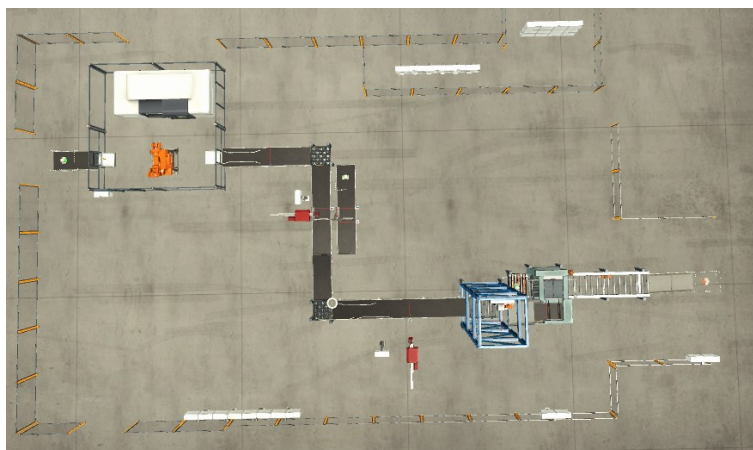


Figura 19: Vista superior de planta de ensamblaje de circuitos electrónicos impresos

Definición de etapas y operaciones:

Según las definiciones de etapas y operaciones, establecidas dentro del proceso de la planta virtual, se determina las siguientes:

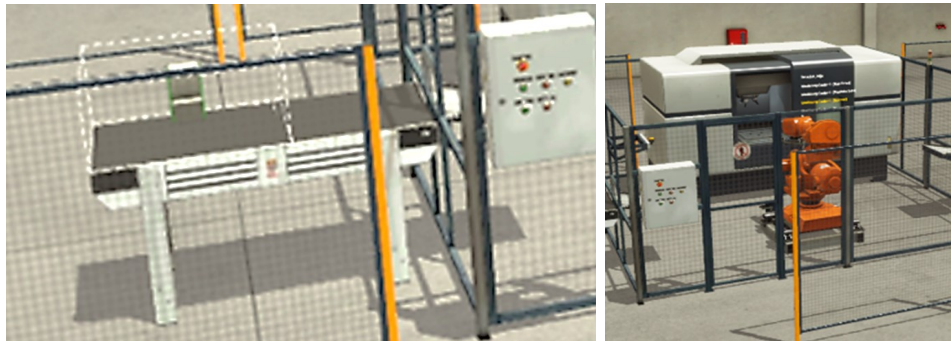
Unidades	Etapas	Descripción
Unidad de producción	1. Transporte A	Transporte por medio de bandas
	2. Cámara de producción	Cámara de producción de tarjetas
	3. Transporte B	Transporte por medio de bandas
Unidad de ensamble	4. Ensamble	Ensamble de circuitos
	5. Transporte C	Transporte por medio de bandas
Unidad de impresora	6. Impresión de texto	Impresiones de texto sobre placas
	7. Transporte D	Transporte por medio de bandas
Unidad de almacenamiento	8. Elevador	Elevador de placas ensambladas
	9. Paletizadora	Ordenar el producto terminado
	10. Transporte E	Transporte por medio de bandas

Cuadro 25: Etapas de línea de ensamble de circuitos de placas electrónicas.

Descripción de etapas:

Etapa 1: transporte A: se comienza con transportar los materiales sobre los cuales se construirá las placas para los circuitos impresos, estos son transportados por una banda hasta la cámara de producción (ver figura 20.a).

Etapa 2: cámara de producción: la cual se diseñará el tamaño de la placa y se implementaran las pistas de cobre necesarias para el funcionamiento de la placa (ver figura 20.b).



(a) Etapa 1. transporte

(b) Etapa 2. cámara de producción

Figura 20: Etapas 1 y 2

Etapa 3: transporte B: en la unidad de transporte se implementa una banda transportadora encargada de llevar los circuitos impresos que lleva la placa hasta un brazo de ensamble (ver figura 21.a).

Etapa 4: ensamble: el circuito llega hasta el brazo robótico y ensambla los componentes necesarios en la operación tomándolas desde una segunda banda transportadora (ver figura 21.b).

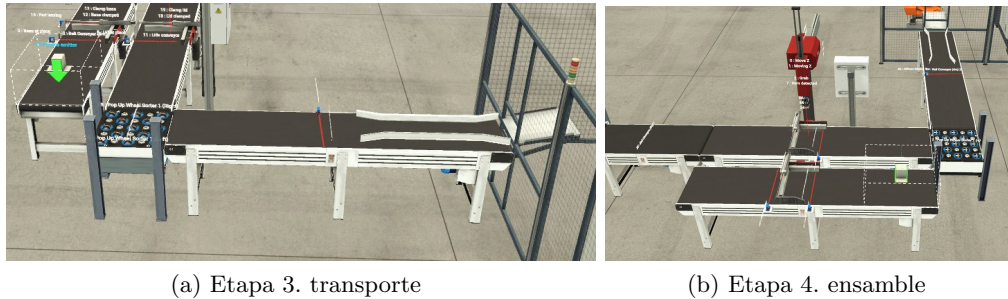


Figura 21: Etapas 3 y 4

Etapa 5: transporte C: en la unidad de transporte se implementa una banda transportadora encargada de llevar los circuitos ensamblados a la siguiente etapa de impresión y grabados de textos (ver figura 22.a).

Etapa 6: impresión de texto: en esta etapa al circuito con sus componentes se les hace el debido proceso para la impresión y grabados de texto por medio de un brazo robótico (ver figura 22.b).

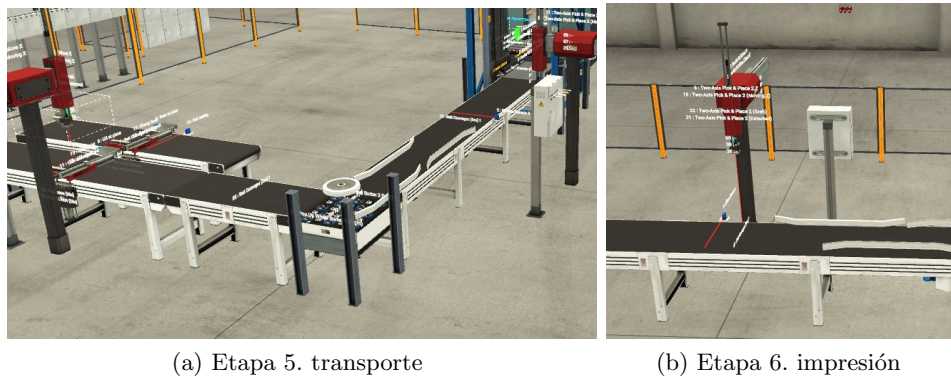
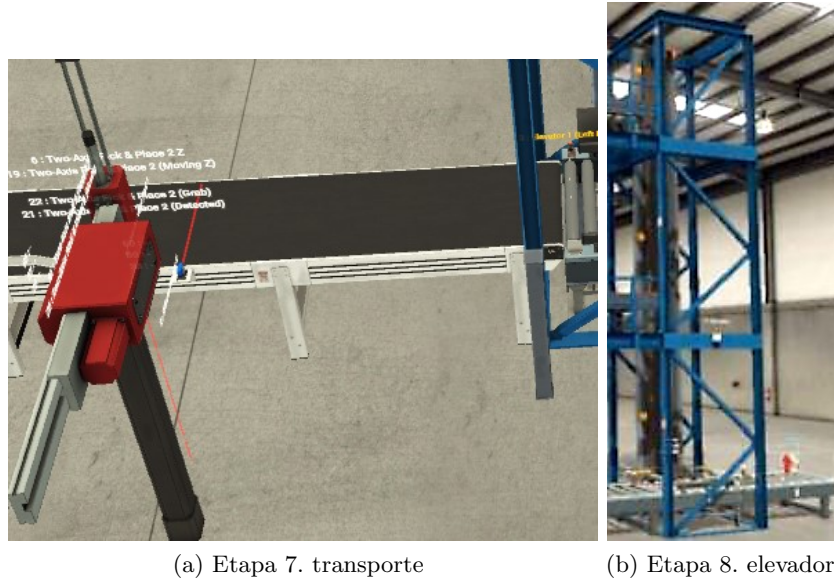


Figura 22: Etapas 5 y 6

Etapa 7: transporte D: en la unidad de transporte se implementa una banda transportadora encargada de llevar los circuitos ya terminados a la siguiente etapa (ver figura 23.a).

Etapa 8: elevador: en la etapa de elevador se toma el producto ya terminado y se eleva para pasar a la paletizadora (ver figura 23.b).



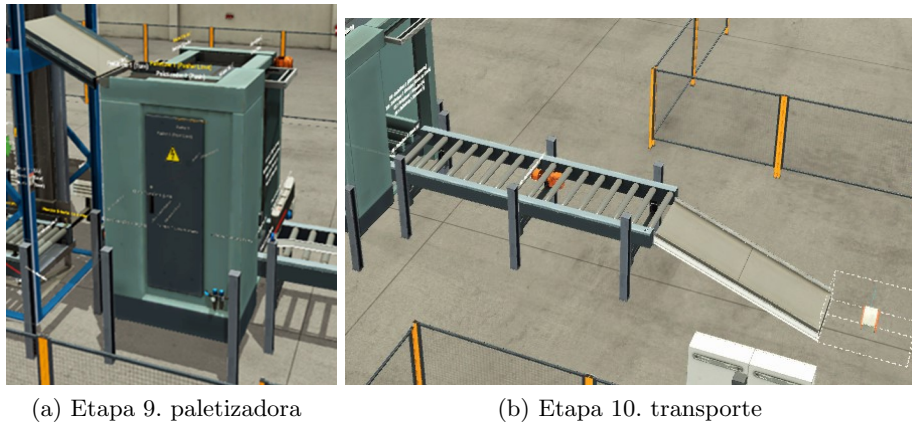
(a) Etapa 7. transporte

(b) Etapa 8. elevador

Figura 23: Etapas 7 y 8

Etapa 9: Estando las placas electrónicas en la paletizadora, esta se encarga de almacenarlas o depositarlas en cajas que son transportadas por un elevador de la misma (ver figura 24.a).

Etapa 10: transporte E: por último, se cuenta con una banda de rodillos con la cual se traslada la caja que sale de la paletizadora para su almacenamiento (ver figura 24.b).



(a) Etapa 9. paletizadora

(b) Etapa 10. transporte

Figura 24: Etapas 9 y 10

Al implementar el método integrado denominado *lean IoT* se debe tener en cuenta lo siguiente:

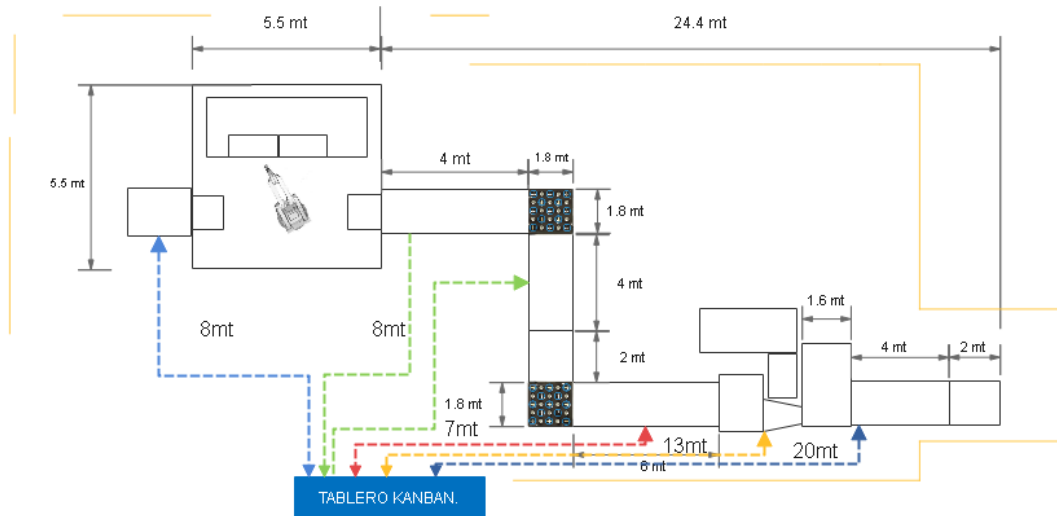


Figura 25: Distancia al tablero *Kanban*

En la figura 30, se logran identificar las distancias dispuestas a recorrer por el operario a la hora de proceder a ejecutar un *Kanban* tradicional, distancia que mediante la aplicación de la tecnología *IoT* no serían necesarias recorrer por el operario en cada etapa. pero de igual manera se puede implementar el mismo método de *Kanban IoT* para el control de *stocks*.

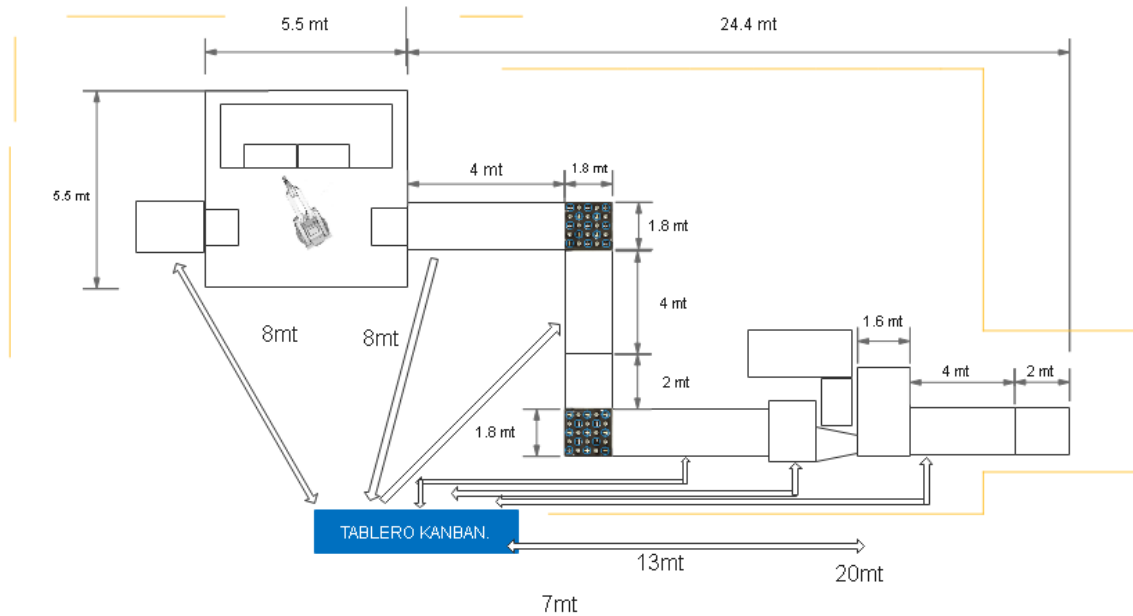


Figura 26: Diagrama de recorrido de *Kanban* tradicional

Ahora en la figura 31, se procede a dar una ubicación a cada uno de los sensores *IoT* con los cuales se va a implementar la integración *lean*, ubicándolos en puntos estratégicos para obtener la información requirente para analizar del proceso.

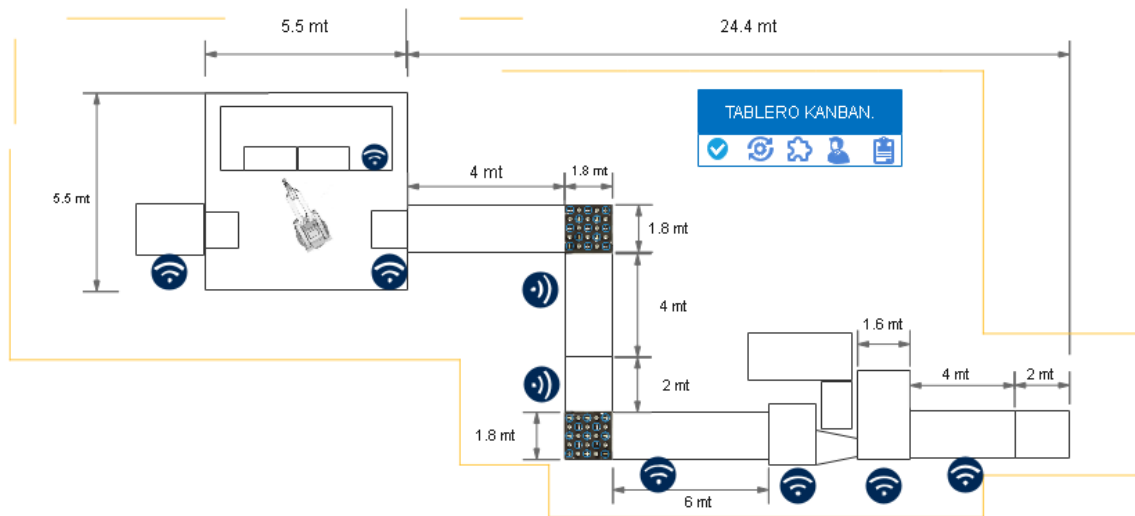


Figura 27: Diagrama de planta con sensores *IoT*

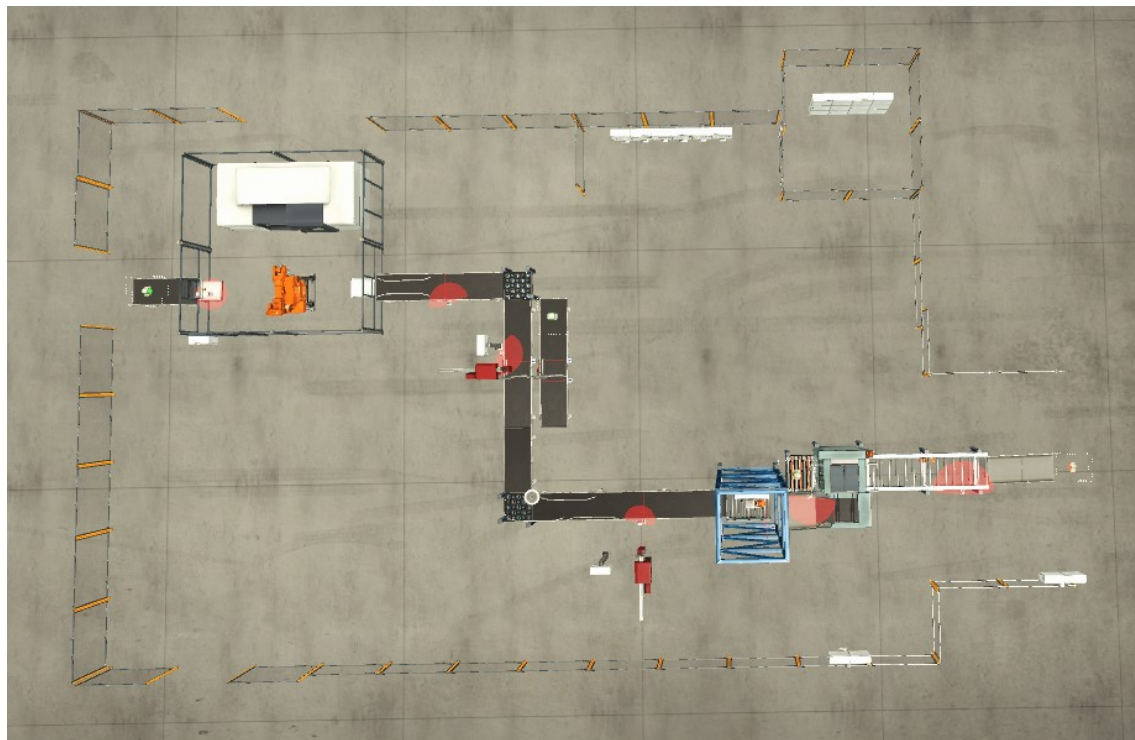


Figura 28: Vista superior de planta con sensores *IoT*

Ahora, se plantea el tablero *Kanban* según el número de etapas y prioridad el cual otorgar, esto debe ir a fin al requerimiento del producto. Por este motivo, se plantea el siguiente modelo de representación:

TABLERO KANBAN.										
Prioridad.	Etapa 1.	Etapa 2.	Etapa 3.	Etapa 4.	Etapa 5.	Etapa 6.	Etapa 7.	Etapa 8.	Etapa 9.	Etapa 10.
Critico.										
Medio.										
Baja.										

Figura 29: Tablero *Kanban*.

El tablero aplicado en el modelo simulado virtualmente del caso de estudio, quedaría diseñado de la siguiente manera:



Figura 30: Tablero *Kanban IoT*.

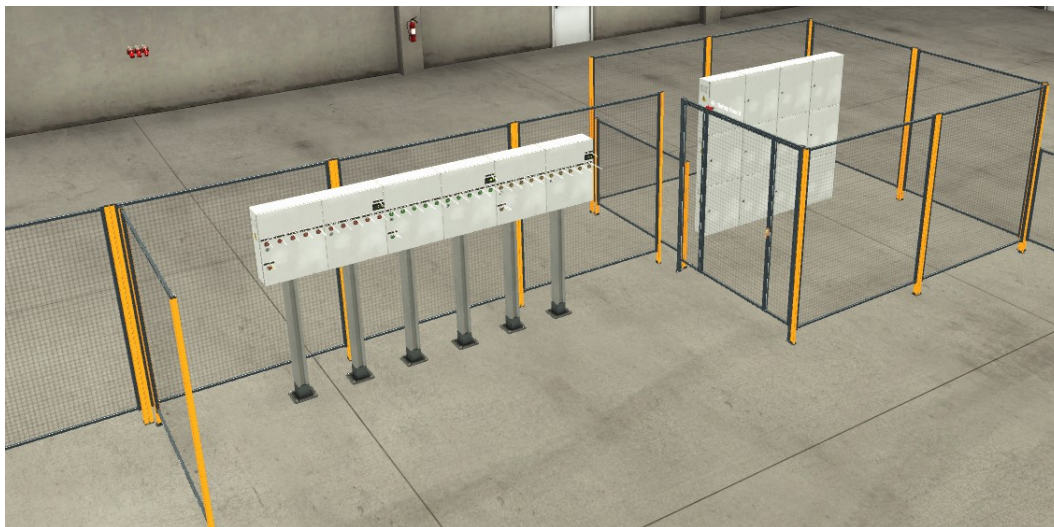


Figura 31: Ubicación de tecnologías *IoT*.

4.1.5. Evaluación de la herramienta *lean con IoT*.

Para evaluar el proceso de implementación de *Kanban IoT* dentro del caso de estudio, se tienen en claro los siguientes conceptos a la hora de analizar los resultados.

- El tiempo establecido para el recorrido normal de un operario conforme a su velocidad de trabajo es de 4km/h o en otras palabras 1.1m/s
- Que las rutas de operación son dependiente a la cantidad de responsabilidades de los trabajadores, es por esto que se identifica el espacio a recorrer por cada operario al ejercer su actividad a un producto, ver figura 30 y 31.

Al identificar los anteriores conceptos se determina la siguiente información en la tabla del cuadro 26, donde se expresa los tiempos dispuestos a recorrer por los operarios en cada etapa que requiera el uso de las tarjetas *Kanban* tradicional:

Unidad	Descripción	Tiempos
Unidad de producción	Transporte A	20seg (ida/retorno)
	Cámara de producción	NA
	Transporte B	20seg (ida/retorno)
Unidad de ensamble	Ensamble	NA
	Transporte C	NA
Unidad de impresora	Impresión de texto	NA
	mall Transporte D	41seg(ida/retorno)
Unidad de almacenamiento	Elevador	NA
	Paletizadora	NA
	Transporte E	60seg (ida/retorno)

Cuadro 26: Tiempos calculados para el recorrido de cada operarios según su actividad de operación.

Luego de calcular los anteriores tiempos del cuadro 26, como siguiente paso se debe estipular los tiempos reales a los cuales se sometería el proceso de operación por etapa en el entorno real.

Unidad	Descripción	Tiempos
Unidad de producción	Transporte A	15min
	Cámara de producción	
	Transporte B	
Unidad de ensamble	Ensamble	15min
	Transporte C	
Unidad de impresora	Impresión de texto	8min
	Transporte D	
Unidad de almacenamiento	Elevador	6min
	Paletizadora	
	Transporte E	

Cuadro 27: Tiempos estipulados para ejecución de cada unidad para desarrollar una actividad

Ahora bien, estos conceptos son otorgados a un *Kanban* tradicional, es por ello que al determinar el tiempo de recorrido conforme a la velocidad habitual que realiza una persona en operación, se debe modelar en escala al entorno de fabricación sobre el cual implementar. Dado que el caso de estudio es una planta simulada virtualmente, la debida actividad a realizar es escalar los tiempos de recorrido conforme a los periodos de simulación que tardan las piezas en cada actividad de fabricación.

Es por esta razón que los tiempo establecidos anteriormente en proporción a un entorno real (cuadro 26), se escalan nuevamente en proporción a los tiempos de simulación, obteniendo de esta manera las siguientes operaciones:

Para obtener el tiempo de la banda transportadora A, se determina que a partir de su referencia de longitud (2 metros de distancia), primero se simula el tiempo de transporte virtual y luego se determinar la velocidad del flujo de material:

Tiempo de recorrido total virtual, banda A: 5,19 segundos.

$$velocidad = \frac{(2m * 1seg)}{5,19seg} \quad (10)$$

$$velocidad = 0,38m/seg$$

Es importante resaltar que dentro de los procesos industriales la velocidad de las bandas varían dependiendo del flujo de producción de las piezas, es por esta razón que para determinar el tiempo que implica que un operario realice el intercambio de tarjetas de manera manual llevado a la escala del tiempo simulado, se debe primero calcular las siguientes operaciones:

Para la etapa 1 y 2 se distribuye un tiempo de 15 minutos de operación para el transporte y fabricación de la pieza, por otro lado, la simulación comparte un tiempo estimado de 62.32seg. A partir de estos valores se determina que que si en tiempo real consumido por el operario para ejercer *Kanban* son 20seg, entonces se debe realizar un proceso de conversión donde se compara el valor simulado equitativo al real y se calcula la proporción correspondiente del tiempo de tradicional frente al simulado (realizar una conversión de regla de tres sencilla).

$$Tiempo\ de\ operario\ A\ (virtual) = Tiempo\ virtual\ total\ A * Tiempo\ operario\ A\ (real) / Tiempo\ real\ total\ A$$

$$Tiempo\ de\ operario\ A(virtual) = \frac{(62,32seg * 20seg)}{900seg} \quad (11)$$

$$Tiempo\ de\ operario\ A(virtual) = 1,38seg \quad (12)$$

De esta manera se escalan todos los valores proporcionales de los tiempos estimados para la realización *Kanban* tradicional convertidos al entorno virtual simulado.

Etapa 3 y etapa 4:

$Tiempo\ de\ operario\ B(virtual) = Tiempo\ virtual\ total\ B * Tiempo\ operario\ B\ (real) / Tiempo\ real\ total\ B$

$$Tiempo\ de\ operario\ A(virtual) = \frac{(30,59seg * 20seg)}{900seg} \quad (13)$$

$$Tiempo\ de\ operario\ B(virtual) = 0,7seg \quad (14)$$

Etapa 7 y Etapa 8:

$Tiempo\ de\ operario\ D(virtual) = Tiempo\ virtual\ total\ D * Tiempo\ operario\ D\ (real) / Tiempo\ real\ total\ D$

$$Tiempo\ de\ operario\ D(virtual) = \frac{(58,11seg * 41seg)}{480seg} \quad (15)$$

$$Tiempo\ de\ operario\ D(virtual) = 5seg \quad (16)$$

Etapa 9 y Etapa 10:

$Tiempo\ de\ operario\ E(virtual) = Tiempo\ virtual\ total\ E * Tiempo\ operario\ E\ (real) / Tiempo\ real\ total\ E$

$$Tiempo\ de\ operario\ E(virtual) = \frac{(27,8seg * 60seg)}{480seg} \quad (17)$$

$$Tiempo\ de\ operario\ E(virtual) = 4,63seg \quad (18)$$

A partir de todos estos valores calculados anteriormente en las ecuaciones 11,12,13,14,15,16,17 y 18, se determina los tiempos más o menos promediados a simular de la planta virtual e iniciar el proceso de registro de comparación para evaluar entre una fabrica virtual *Kanban* tradicional y una fabrica virtual *Kanban IoT*.

Por ultimo, haciendo la comparación de los tiempos tanto de *Kanban* tradicional como con el *Kanban IoT* se obtienen los siguientes resultados:

Unidad	Etapas	<i>Kanban IOT/Seg</i>	<i>Kanban tradicional/Seg</i>	Diferencia/Seg
Unidad de producción	Transporte A	5.15 seg	6.749 seg	1.60 seg
	Cámara de producción	57.17 seg	57.166 seg	0.0 seg
	Transporte B			
Unidad de ensamblaje	Ensamble	30.59 seg	34.301 seg	3.71 seg
	Transporte C			
Unidad de impresora	Impresión de texto	58.11 seg	68.635 seg	10.53 seg
	Transporte D			
Unidad de almacenamiento	Elevador	120.90 seg	120.9 seg	0.0 seg
	Paletizadora			
	Transporte E	27.56 seg	32.567 seg	5 seg
-	Tiempo Total	299047 Seg	320.318 seg	20.85 seg

Cuadro 28: Comparación *Kanban* tradicional con *Kanban IoT*

Como se logra identificar en el anterior cuadro 28, se distinguen las etapas en las cuales la duración de los procesos logran brindar una reducción considerada en sus tiempos de fabricación, logrando a primera vista observar un resultado eficaz al proceso diseñado de *Kanban IoT* propuesto.

Al tener claros los tiempos y flujos de procesos, se pueden identificar las etapas críticas y las que necesitan mayor atención, de esta manera evitar los cuellos de botella y garantizar un flujo de proceso mas eficiente y continuo.

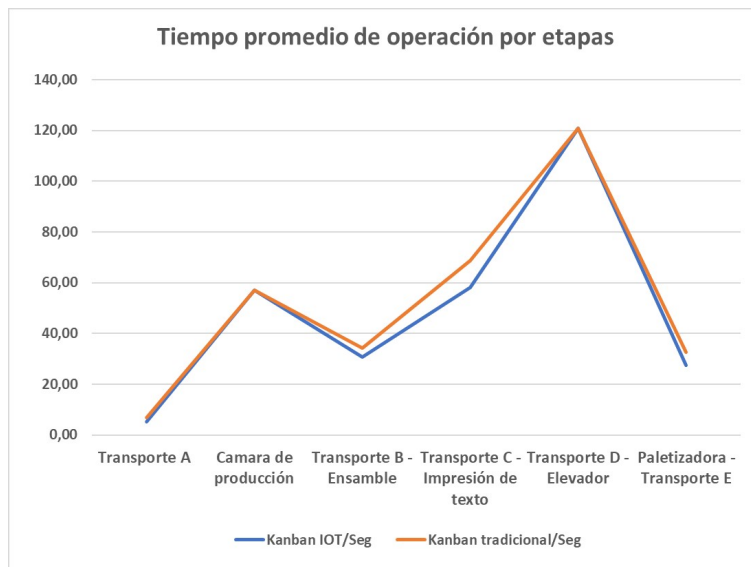


Figura 32: Comparación *Kanban* tradicional con *Kanban IoT*



Figura 33: Vista general de planta de circuitos aplicada con *Kanban IoT*

Por ultimo al analizar los resultados de las figuras 39 y 40, se identifica que los tiempos que toma realizar las actividades del proceso con *Kanban* tradicional comparado con el mismo proceso enfocado al propuesto con tecnología *IoT*, se comprueba una reducción del tiempo de transporte de las tarjetas por el personal de cada una de las áreas. De igual manera al utilizar *Kanban IoT* en los procesos, se identifican cuellos de botella con mayor facilidad y un control de *stocks* mas acertado, esto gracias al comportamiento periódico de flujo expresado en al figura 39.

Por otro lado, la implementación de *Kanban IoT* genera grandes beneficios a las empresas manufactureras, dado que con esto, se aumenta la flexibilidad en la fabricación lo cual es uno de los objetivos de la industria 4.0, permitir aumentar la personalización de los productos, ya que se obtiene un constante registro del flujo de operación de los productos que se llevan a fabricar según el pedido del cliente. es por esta razón que se brinda de manera descriptiva la siguiente subsección dentro de esta etapa.

Realimentación

A partir de los datos extraídos tras la aplicación del marco y la integración de *lean IoT* sobre el proceso a desarrollar, se prosigue a dependencia del implementador en disponer toda esta información como objeto de análisis y uso de investigación, con el fin de aportarle valores cuantificables que puedan permitir como indicadores visualizar y reducir los desperdicios e incluso brindar el beneficio hacia la toma de decisiones como retroalimentación dentro de los sistemas de control.

4.2. Evaluación del marco de referencia.

Para la evaluación del marco de referencia se debe tener presente la estructura fundamental de su constitución, en este caso, las diferentes etapas que integran al marco propuesto, con el fin de analizar correctamente su comportamiento.

Dentro de la etapa de la “selección de la herramienta *lean*”, el resultado brindó datos cuantitativos positivos según los criterios establecidos para las necesidades o desperdicios enfocados a solucionar, esto mediante la aplicación del método de selección denominado *AHP* o proceso analítico jerárquico. Por otro lado, se puede aclarar que es posible aplicar diferentes métodos de selección de criterios a parte del utilizado “*AHP*”, pero se recomienda consultar referencias de aplicación de estos métodos para obtener una mejor selección a la hora de implementar, tal como se realizó en esta investigación.

Para la etapa “integración de la tecnología *IoT* en la herramienta *lean*” se concluye lo siguiente: primero, que al identificar y analizar el comportamiento del proceso de fabricación o entorno sobre el cual ejecutar el marco de referencia, se lograron reconocer detalladamente los sectores sobre los cuales aplicar la tecnología *IoT*; y segundo, que esta integración ofrece un mejor panorama para implementar una adaptación de la herramienta *lean manufacturing* seleccionada, de manera que ofrece con mejor detalle y estándar el proceso de interacción *lean IoT* deseado en el entorno industrial. Aunque el uso de métodos estandarizados (como el *ISA88*, por ejemplo) garantiza un reconocimiento minucioso y altamente detallado del proceso de fabricación, en esta investigación se requirió una exploración enfocada solo al reconocimiento físico de las unidades, etapas y operación, permitiendo mejorar el análisis del comportamiento del flujo de fabricación, cumpliendo así el objetivo de la integración *lean IoT*.

Al ejecutar la tercera etapa “selección de la tecnología *IoT*” se brinda un cuadro de conocimiento referente a los diferentes tipos de protocolos y sensores que incorporan o se permiten trabajar con tecnología *IoT*. Por tanto, analizando el cuadro mencionado (Figuras 7 y 8), se evalúa que la información proporcionada ayude a la selección de la tecnología adecuada independientemente del proceso. Este paso es indispensable para forjar esta etapa del proyecto porque define características determinantes a la hora de seleccionar los protocolos según las necesidades del proceso sobre el cual se quiere implementar: estándar, frecuencia de banda, topología, velocidad de transferencia, tipo de alimentación, rango, entre otros valores. Luego, estos elementos serán dispuestos para implementarlos sobre las distintas áreas del proceso que fueron reconocidas en la etapa anterior.

Al llevar a cabo la cuarta etapa del marco de referencia “implementación de la herramienta *lean* con *IoT*”, se evalúa el comportamiento práctico de la integración *lean IoT* propuesto sobre el proceso seleccionado. Debido a que el proceso de investigación fue enfocado a un caso de estudio, se consideraron dos métodos para corroborar el funcionamiento de este proyecto: un proceso de fabricación real o una simulación virtual. Se optó por el simulado como opción sustentable para reconocer el comportamiento completo de la integración *lean IoT*, en este caso una planta de ensamble de placas de circuitos. El software implementado para la ejecución de esta etapa fue *Factory I/O* en complemento con el paquete *control I/O*. Esto permitió visualizar y programar el flujo del proceso de fabricación dando a obtener una mejor

representación de la aplicación práctica de la integración *lean IoT*.

Al analizar la última etapa “evaluación de la herramienta *lean* con *IoT*” se tienen presente los resultados obtenidos de la aplicación práctica. Al analizar estos datos se verifica el comportamiento de la integración *lean IoT*, según la conducta de la herramienta *Kanban*, se evidenció una disminución del tiempo de producción, uno de los desperdicios objetivo.

En resumen, al evaluar el comportamiento general del marco de referencia se analiza que los resultados han brindado aportes eficaces acorde a lo requerido en los objetivos del proyecto. De igual manera, es importante resaltar que estos resultados pueden variar según los criterios a fortalecer o mitigar dentro del proceso sobre el cual implementar, dado que en el proyecto la integración *lean IoT* fue la denominada *Kanban IoT*, el desarrollo está abierto para incorporar proceso en los que se deba alterar el proceso de fabricación a partir de otras herramientas *lean* trabajables con *IoT*, es por ello, que se sugiere para complementar un buen proceso de desarrollo, poder incluir una etapa de diagnóstico con el fin de recoger y consolidar el entorno de fabricación sobre el cual implementar o desarrollar el marco de referencia. Esto con la finalidad de proporcionar un estudio particular de los puntos o secciones sobre los cuales fortalecer o brindar un conocimiento inicial del proceso de fabricación, permitiendo así, analizar la posibilidad en disponer de una selección de herramienta *lean* como antes de; y reconocer puntualmente la actividades a mejorar de la producción cuando se consoliden acciones a ejecutar.

4.3. Conclusiones

Se analiza que el marco de referencia puede ser mejorado en múltiples maneras, ya que se descubre que es necesario una identificación de las etapas del proceso y/o el modelo de control, alcanzando con ello, observar más detalladamente las etapas o componentes con los cuales trabajara la integración de la herramienta *lean IoT*.

Por otra parte, se determina a partir de la aplicación del marco que se pueden brindar otros enfoque mediante el uso de ciertos métodos de simulación y herramientas software, permitiendo capturar otros indicadores mejor acoplados a las necesidades de la herramienta *lean* que pueda integrarse con *IoT*.

Además, al aplicar el marco se observa que los métodos para analizar el comportamiento del flujo de un proceso de fabricación pueden maximizarse, esto mediante el uso de estándares que permiten al proyecto elaborado compartir un empalme con métodos más organizados o normativos.

Por último, al aplicar el marco de referencia se obtienen resultados conformes a los objetivos expuestos en adquirir sobre esta investigación, concluyendo de este capítulo, que la implementación del marco construye un orden o guía que facilita el cumplimiento de una integración *lean IoT* enfocado a la aplicación de un entorno o proceso industrial.

4.4. Aportes

El capítulo aporta todo el contenido práctico de la implementación del marco de referencia, permitiendo reconocer mediante el uso del software *Factory I/O* todo el componente ejecutado de la integración *Kanban IoT*, por otro lado, el capítulo evalúa los resultados de la estructura del marco propuesto, permitiendo definir resultados a mejorar, a comprobar en cumplimiento de los objetivos propuestos del proyecto y aportes futuros sobre los cuales se puede seguir profundizando en la investigación.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Se establecieron los distintos componentes básicos de las herramientas *lean manufacturing*, tales como conceptos, definiciones y características básicas conformes a los pilares fundamentales de la casa *lean* con el fin de obtener resultados de conocimiento enriquecidos sobre la investigación. Paralelamente, se anexo saberes fundamentales de la industria 4.0, tales como conceptos y características de las tecnologías *IoT*.

Se identifica criterios como: el tiempo, el servicio a la automatización, entre otros valores. Siendo rasgos congenies entre los beneficios a resolver por la herramienta *lean* y la tecnología *IoT*, acoplando un empalme eficaz ante el resultado de esta integración *lean IoT*.

Se desarrollo un marco de referencia como método organizado para aportar apropiadamente sobre la implementación de la integración *lean IoT*, logrando brindar mediante una especifica serie de etapas, el empalme de los criterios *lean* e *IoT* a requerir dentro de un proceso industrial.

Por otra parte, al analizar el marco de referencia propuesto con otras referencias de investigación similar, se determina las siguientes conclusiones:

Con la investigación *lean IoT* enfocado a presentar una arquitectura *Jidoka* bajo la intervención de los *CPS* o sistemas ciberfísicos [67], se identifica una propuesta de investigación definida o fija hacia el método *lean* y la tecnología de la industria 4.0 sobre el cual desarrollarse, esto quiere decir que la investigación mencionada propone en termino fijo el modelo de trabajo “*Jidoka*”, nuestra investigación permite definir bajo métodos de selección cualitativos-cuantitativos la mejor opción de herramienta *lean manufacturing* a implementar en necesidad del proceso de fabricación. Por otra parte, este mismo estudio *Jidoka* trabajado con *CPS* menciona la necesidad u oportunidad de seguir abriendo investigaciones hacia estrategias enfocadas bajo la herramienta *Jidoka* que aporten una mejor secuencia de recolección de estados o información para la toma de decisiones, razón que a comparación del marco propuesto se brinda esta oportunidad mediante la misma versatilidad de proponer una guía de implementación a diferentes herramientas *lean manufacturing* sujetas a los criterios a mejor desempeñar dentro del proceso de fabricación.

En otro caso de investigación denominado *lean six sigma* habilitado para los sistemas de producción típicos con *IoT* [65], se brinda la posibilidad de manejar mediante solo el enfoque de la herramienta *lean six sigma*, el analizar, controlar y monitorear tanto de manera inteligente como autónoma, la producción y la cadena de suministro, teniendo relación con el desarrollo tecnológico *IoT* que aplica como búsqueda nuestro marco, el cual permite obtener mediante sensores *RFID* la adquisición de información crucial para analizar y visualizar el comportamiento del sistema, la diferencia es que el marco propuesto es claro en brindar un conocimiento amplio y flexible sobre las características y los tipos de tecnologías *IoT* sobre las cuales mejor enfocarse, como las áreas de producción al cual introducirse, brindando con esto, una mejor guía del pasos a paso para el reconocimiento de tecnologías y protocolos apostar sobre el desarrollo del proceso.

Con lo anterior se distinguen distintas investigaciones [17], [4], [66] donde no se identifica un proceso sistemático para el manejo o tratamiento en la selección de herramientas *lean* acorde a los criterios a requerir en conjunto con los distintos protocolos y tecnologías *IoT* a implementar, otras investigaciones plantean marcos de *lean IoT* orientados a los modelos [70] de negocios cuyos elementos no especifican un tratamiento específico o detallado de estas tecnologías informáticas y herramientas *lean*, debido a que su enfoque va dirigido más al tratamiento de los datos en los modelos de negocio y como disponerlos para la toma de decisiones.

Como trabajos futuros también se propone implementar múltiples herramientas de *lean manufacturing* en otros simuladores o en diferentes procesos pilotos en plantas reales, donde se pueda demostrar la viabilidad del estudio.

Por último, ya que el marco de referencia promueve la identificación o el conocimiento del proceso, para brindar un mejor desarrollo a la investigación se propone promover el uso del estándar ISA88, con el fin de conocer la información del proceso, generalmente aquella que pertenece a los equipos y maquinarias involucradas sobre su control.

Referencias

- [1] J. Hernandez-Matias and A. Idoipe, *Lean Manufacturing: Conceptos, técnicas e implementación*, 12 2013.
- [2] A. I. Basco, G. Beliz, D. Coatz, and P. Garnero, *Industria 4.0: fabricando el futuro*. Inter-American Development Bank, 2018, vol. 647.
- [3] E. A. García Bernal, J. F. Arévalo Peña *et al.*, “Simulación y análisis de protocolos de transmisión para iot utilizando herramientas de simulación de redes inalámbricas.”
- [4] M. Thüerer, Y. Pan, T. Qu, H. Luo, C. Li, and G. Q. Huang, “Internet of things (iot) driven kanban system for reverse logistics: solid waste collection,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 30, no. 7, pp. 2621–2630, 2019.
- [5] T. Wagner, C. Herrmann, and S. Thiede, “Industry 4.0 impacts on lean production systems,” *Procedia Cirp*, vol. 63, pp. 125–131, 2017.
- [6] M. Yáñez, G. Villamaran, and C. Bocanegra, “Modelo metodológico de implementación de lean manufacturing,” *Revista EAN*, 11 2017.
- [7] D. Alonso Villafáfila, “Estudio de las innovaciones en el lean manufacturing a través de las tecnologías de la industria 4.0,” *Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales*, 2019.
- [8] A. Sanders, C. Elangeswaran, and J. Wulfsberg, “Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing,” *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, p. 811, 09 2016.
- [9] “Mecanismo de control dinámico ajustado habilitado para iot para sistemas de producción típicos,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*.
- [10] B. N. Green, C. D. Johnson, and A. Adams, “Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: secrets of the trade,” *Journal of Chiropractic Medicine*, vol. 5, no. 3, pp. 101 – 117, 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0899346707601426>
- [11] I. Escaida Villalobos, P. Jara Valdés, and M. Letzkus Palavecino, “Mejora de procesos productivos mediante lean manufacturing.” 2016.
- [12] S. Mostafa, J. Dumrak, and H. Soltan, “A framework for lean manufacturing implementation,” *Production & Manufacturing Research*, vol. 1, no. 1, pp. 44–64, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/21693277.2013.862159>
- [13] J. Tapia Coronado, T. Escobedo Portillo, E. Barra, G. Martañez Moreno, and v. Esteban copyright ortega, “Marco de Referencia de la Aplicación de Manufactura Esbelta en la Industria,” *Ciencia & trabajo*, vol. 19, pp. 171 – 178, 12 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492017000300171>.
- [14] J. L. del Val Román, “Industria 4.0: la transformación digital de la industria,” in *Valencia: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII*, 2016.
- [15] A. Arrepol Rivera, “Estudio de la irrupción de la industria 4.0 en la metodología lean manufacturing,” Ph.D. dissertation, 03 2020.

- [16] W. Rong, G. T. Vanan, and M. Phillips, “The internet of things (iot) and transformation of the smart factory,” in *2016 International Electronics Symposium (IES)*, Sep. 2016, pp. 399–402.
- [17] D. Romero, M. Flores, M. Herrera, and H. Resendez, “Five management pillars for digital transformation integrating the lean thinking philosophy,” 06 2019.
- [18] G. Miragliotta and F. Shrouf, “Using internet of things to improve eco-efficiency in manufacturing: A review on available knowledge and a framework for iot adoption,” in *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services*, C. Emmanouilidis, M. Taisch, and D. Kiritsis, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 96–102.
- [19] J. Ma, Q. Wang, and Z. Zhao, “Slae-cps: Smart lean automation engine enabled by cyber-physical systems technologies,” *Sensors*, vol. 17, p. 1500, 06 2017.
- [20] M. Sarria Yépez, G. Fonseca Villamarín, and C. Bocanegra-Herrera, “Modelo metodológico de implementación de lean manufacturing,” *Revista Escuela de Administración de Negocios*, no. 83, pp. 51–71, nov. 2017. [Online]. Available: <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revista/article/view/1825>
- [21] F. Pakdil and K. M. Leonard, “Criteria for a lean organisation: development of a lean assessment tool,” *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 15, pp. 4587–4607, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.879614>
- [22] M. Imai, “Gemba kaizen. a commonsense, low-cost approach to management,” 01 2007.
- [23] “Aplicación de principios lean y jit en la gestión de la cadena de suministro,” *International Journal of Management Research and Business Strategy*.
- [24] M. F. Suárez-Barraza, “Encontrando al kaizen: Un análisis teórico de la mejora continua,” *Escuela de Graduados en Administración y Dirección de Empresas EGADE Zona Centro, Tecnológico de Monterrey*, pp. 287 – 288, 2019. [Online]. Available: <http://revistas.unileon.es/ojs/index.php/Pecvnia/article/view/696>
- [25] M. R. Carreras, *Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad*. Ediciones Díaz de Santos, 2010.
- [26] M. Manzano Ramírez and V. Gisbert Soler, “Lean manufacturing: Implantación 5s,” *3C Tecnología*, vol. 5, no. 4, pp. 16–26, 2016.
- [27] F. R. Sacristán, *Las 5S. Orden y limpieza en el puesto de trabajo*. Fc editorial, 2005.
- [28] J. G. A. P. OSADA, “Interacción y conexiones entre las técnicas 5s, smed y poka yoke en procesos de mejoramiento continuo.”
- [29] D. McCarthy and N. Rich, *Lean TPM: a blueprint for change*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [30] J. A. Marín-García and R. Mateo Martínez, “Barreras y facilitadores de la implantación del tpm,” *Intangible Capital*, vol. 9, no. 3, pp. 823–853, 2013.
- [31] A. A. Borrego, C. L. Barrantes, W. P. Benites *et al.*, “Enfoque de estabilidad y enfoque de cambio en la perspectiva del ingeniero industrial. estudio exploratorio sobre propensión

- decisional,” *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, no. 17, pp. 127–138, 2016.
- [32] A. I. Medina Caicedo, “Evaluación financiera de un modelo de gestión operacional basado en un sistema andon para el control de producción del sector de calzado,” B.S. thesis, 2018.
- [33] “Análisis del flujo de producción a través del mapeo del flujo de valor: un caso de estudio de un proceso de fabricación ajustada,” *Procedia Engineering*.
- [34] L. Díaz Burgos, “Barreras, factores de éxito y estrategias en la implementación de lean en la construcción. una primera aproximación a la situación en españa,” 2018.
- [35] A. Mayr, M. Weigelt, A. Kühn, S. Grimm, A. Erll, M. Potzel, and J. Franke, “Lean 4.0 - a conceptual conjunction of lean management and industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 622 – 628, 2018, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118304736>
- [36] H. Künzel, *Erfolgsfaktor Lean Management 2.0*. Springer, 2016.
- [37] K. Żywicki, P. Rewers, and M. Bożek, “Data analysis in production levelling methodology,” in *World Conference on Information Systems and Technologies*. Springer, 2017, pp. 460–468.
- [38] A. Sanders, C. Elangeswaran, and J. P. Wulfsberg, “Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing,” *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, vol. 9, no. 3, pp. 811–833, 2016. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10419/188791>
- [39] T. Meudt, M. P. Röbller, J. Böllhoff, and J. Metternich, “Wertstromanalyse 4.0,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 111, no. 6, pp. 319–323, 2016.
- [40] D. Lucke, M. Defranceski, and T. Adolf, “Cyberphysische systeme für die prädiktive instandhaltung,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1*. Springer, 2017, pp. 75–91.
- [41] C. Feldmann, A. Gorj *et al.*, *3D-Druck und Lean Production*. Springer, 2017.
- [42] B. Teeuwen and C. Schaller, *S–Die Erfolgsmethode zur Arbeitsplatzorganisation*. Ansbach: Cetpm, 5.
- [43] E. I. Dorna, “Industria 4.0: ¿cómo afecta la digitalización al sistema de protección social?” *Lan harremanak: Revista de relaciones laborales*, no. 40, p. 1, 2018.
- [44] P. y. B. S. Vaidya, Saurabh y Ambad, “Industria 4.0: un vistazo,” *Procedia Manufacturing*.
- [45] D. Power, “Uso de big data para análisis y soporte de decisiones,” *Journal of Decision Systems*.
- [46] E. Zamora, A. A. Pérez, J. G. Close, M. R. Costa-jussá, J. Martínez-Miranda, H. Pérez Espinosa, and W. A. Luna-Ramírez, “Robots autónomos: Navegación,” *Komputer Sapiens, Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial*, 2015.
- [47] and , “International scientific journal industry 4.0,” 2016.

- [48] J. Salazar and S. Silvestre, “Internet de las cosas,” *Techpedia. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická*, 2016.
- [49] L. y. C. J. y. L. M. Vaquero, Luis M y Rodero-Merino, “Una ruptura en las nubes: hacia una definición de nube.”
- [50] “Computación en la nube: desafíos de investigación y de vanguardia,” *Diario de servicios y aplicaciones de Internet*.
- [51] V. M. Cabero-Alemanra, Julio y Díaz, “Blended learning y realidad aumentada: experiencias de diseño docente.”
- [52] J. Eterovic, M. Cipriano, and S. Nicolet, “Análisis de protocolos de comunicaciones para internet de las cosas,” in *XX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2018, Universidad Nacional del Nordeste)*., 2018.
- [53] M. Azure, “Protocolos y tecnologías de iot,” 2020.
- [54] J. Vega-Luna, M. Lagos-Acosta, G. Salgado-Guzmán, V. Tapia-Vargas, F. Sánchez-Rangel, and J. Cosme-Aceves, “Monitor de nivel en depósitos de agua usando iot.”
- [55] A. J. Narváez Pupiales, “Estudio del estándar “bluetooth 5”,” B.S. thesis, Quito, 2018., 2018.
- [56] S. Pérez, G. Mercado, H. A. Facchini, A. Dantiacq, G. Cangemi, and G. Quiroga Salomón, “Análisis comparativo de métricas de qos de redes wi-fi 802.11 e con capa física 802.11 ny 802.11 ac,” in *XVIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2016, Entre Ríos, Argentina)*, 2016.
- [57] S. K. Narváez Pupiales, “Estudio de qos basado en el estándar ieee 802.11e y alternativas de seguridad para las redes locales inalámbricas aplicado en la wlan de la universidad politécnica estatal del carchi,” Master’s thesis, PUCE, 2015.
- [58] J. D. Fuller and B. W. Ramsey, “Rogue z-wave controllers: A persistent attack channel,” in *2015 IEEE 40th Local Computer Networks Conference Workshops (LCN Workshops)*. IEEE, 2015, pp. 734–741.
- [59] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment,” *ICT express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [60] B. S. Chaudhari, M. Zennaro, and S. Borkar, “Lpwan technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations,” *Future Internet*, vol. 12, no. 3, p. 46, 2020.
- [61] A. Semle, “Protocolos iiot para considerar,” *Revista AADECA*, 2016.
- [62] A. J. González García, “Iot: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones,” 2017.
- [63] A. Valencia and P. Portilla, “Internet industrial de las cosas (iiot): Nueva forma de fabricación inteligente.”
- [64] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, and T. Watson, “The industrial internet of things (iiot): An analysis framework,” *Computers in industry*, vol. 101, pp. 1–12, 2018.

- [65] A. Jayaram, “Lean six sigma approach for global supply chain management using industry 4.0 and iiot,” in *2016 2nd international conference on contemporary computing and informatics (IC3I)*. IEEE, 2016, pp. 89–94.
- [66] A. Korchagin, A. Deniskina, and I. Fateeva, “Lean and energy efficient production based on internet of things (iot) in aviation industry,” in *E3S Web of Conferences*, vol. 110. EDP Sciences, 2019, p. 02124.
- [67] J. Ma, Q. Wang, and Z. Zhao, “Slae-cps: Smart lean automation engine enabled by cyber-physical systems technologies,” *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1500, 2017.
- [68] W. Lian-yue, “Think of construction lean scm based on iot,” in *2012 IEEE Symposium on Robotics and Applications (ISRA)*. IEEE, 2012, pp. 436–438.
- [69] M. Pisching, A. A. Tasca, M. A. Pessoa, F. Junqueira, and P. E. Miyagi, “Arquitetura para desenvolvimento de sistemas ciber-físicos aplicados na indústria 4.0,” *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente Inteligente*, pp. 326–331, 2017.
- [70] M. Ide, Y. Amagai, M. Aoyama, and Y. Kikushima, “A lean design methodology for business models and its application to iot business model development,” in *2015 Agile Conference*. IEEE, 2015, pp. 107–111.
- [71] C. A. C. Zuluaga, D. C. U. Cadavid, and J. A. C. Urrego, “Marco de referencia para el desarrollo de un sistema de apoyo para la toma de decisiones para la gestión de inventarios,” *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 30–42, 2014.
- [72] A. Sanders, C. Elangeswaran, and J. Wulfsberg, “Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing,” *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, p. 811, 09 2016.
- [73] S. Mostafa, J. Dumrak, and H. Soltan, “A framework for lean manufacturing implementation,” *Production & Manufacturing Research*, vol. 1, no. 1, pp. 44–64, 2013.
- [74] A. Medina-León, D. Nogueira-Rivera, A. Hernández-Nariño, and Y. Díaz-Navarro, “Consideraciones y criterios para la selección de procesos para la mejora: Procesos diana,” *Ingeniería Industrial*, vol. 33, no. 3, pp. 272–281, 2012.
- [75] B. M. Medina and M. R. García, “Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte,” *Pensamiento matemático*, vol. 6, no. 2, pp. 27–45, 2016.
- [76] B. G. G. Hoyos, F. d. J. V. Macías, and D. E. M. Quintero, “Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en la guajira (colombia),” *Ambiente y Desarrollo*, vol. 23, no. 44, 2019.
- [77] M. F. Serrano Guzmán, D. D. Pérez Ruíz, J. F. Galvis Martínez, and M. L. Rodríguez Sierra, “Método de sumas ponderadas para selección de sistemas energéticos no convencionales,” *Prospectiva*, vol. 15, no. 2, pp. 7–12, 2017.
- [78] S. Bernal Romero, D. F. Niño Sanabria *et al.*, “Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de ishikawa.”
- [79] J. M. Herrero Cuesta, “Estudio de un laboratorio de lean manufacturing: Mejoras hacia la automatización,” 2020.

- [80] P. Letelier Torres, “Una actividad para enseñar el uso de tableros kanban y diagramas de flujo acumulado,” in *Actas de las XXI Jornadas sobre la Enseñanza Universitaria de la Informática*. Universitat Oberta La Salle, 2015, pp. 288–295.
- [81] A. R. Fernández, R. M. Carballido, and A. A. Herrera, “Números neutrosóficos de valor único y proceso analítico jerárquico para la discriminación de proyectos,” *Investigación Operacional*, p. 751, 2020.
- [82] D. R. González, “Arquitectura y gestión de la iot,” *Telemática*, vol. 12, no. 3, pp. 49–60, 2013.
- [83] T. G. Ortiz Guerrero, “Sistema kanban en la línea de fabricación de transformadores eléctricos de la empresa ecuatran sa,” B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . . , 2018.
- [84] G. S. MONTES and L. R. V. PORTILLA, “Implantación del método kanban en una industria textil,” 2006.
- [85] S. W. N. Díaz, G. C. Juárez, R. H. Lucas, J. B. Rodríguez, F. Terán, M. L. López, J. P. Armenteros, S. M. Gutiérrez, and M. A. C. Gil, “Adaptabilidad de las tecnologías rfid y nfc a un contexto educativo: Una experiencia en trabajo cooperativo.” *Rev. Iberoam. de Tecnol. del Aprendiz.*, vol. 4, no. 1, pp. 17–24, 2009.
- [86] M. G. Gamboa Chiriboga, “Implementación de prototipos de drivers de comunicación y hojas de datos electrónicas (eds) devicenet de bajo costo para sensores industriales analógicos y discretos,” B.S. thesis, Quito, 2018., 2018.
- [87] A. S.r.l. (2021) Adf web. IoT Gateway DeviceNet / MQTT - Converte. [Online]. Available: https://www.adfweb.com/Home/products/DeviceNet_MQTT.asp?frompg=nav10_28&language=ESP
- [88] E. B. Sanjuan, I. A. Cardiel, J. A. Cerrada, and C. Cerrada, “Message queuing telemetry transport (mqtt) security: A cryptographic smart card approach,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 115 051–115 062, 2020.

6. Anexos

Registros de tiempos - Kanban tradicional													
Piezas #	Transporte A		Camara de producción		Transporte B - Ensamble		Transporte C - Impresión de texto		Transporte D - Elevador		Paletizadora - Transporte E		Tiempo total por paquete
	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	
Pieza 1	0:24:05-0:30:24	6,19	0:32:18-1:30:11	56,28	2:02:20-2:36:6	34,26	2:36:6-3:45:18	69,24	3:10:19-3:52:19	42			
Pieza 2	1:35:24-1:41:35	6,11	1:41:11-2:39:14	56,25	3:10:29-3:50:23	40,22	3:59:23-5:02:04	64	4:31:09-5:10:19	40			
Pieza 3	2:45:08-2:51:00	6,08	2:47:26-3:46:00	58,26	4:21:00-4:57:01	36,01	4:57:01-6:02:15	65,16	5:42:19-6:25:29	44,2			
									Promedio ciclo	126,20		6:25:29-6:58:22	32,21
Pieza 4	3:53:09-4:00:18	7,09	3:56:29-4:55:03	58,02	5:32:14-6:06:14	34,28	6:06:14-7:31:10	85,16	6:56:19-7:35:09	40			
Pieza 5	5:00:25-5:07:10	7,15	5:44:00-6:42:10	58,1	6:35:01-7:09:13	34,04	7:36:10-7:41:5	65,15	8:09:29-8:47:09	39			
Pieza 6	5:28:11-5:35:22	7,11	7:01:06-7:59:22	56,28	7:52:07-8:25:00	33	8:25:00-9:30:16	65,16	9:26:19-10:04:19	39			
									Promedio ciclo	118,0		10:08:19-10:41:01	33,2
Pieza 7	6:14:27-6:22:20	7,17	6:23:20-7:22:11	57,07	9:02:05-9:35:25	34	9:35:25-10:39:07	65,03	10:44:19-11:22:29	38,2			
Pieza 8	7:24:29-7:32:21	7,2	7:33:21-8:31:12	57,07	10:13:14-10:45:10	32	10:45:10-11:58:11	73,21	11:50:29-12:27:29	38,1			
Pieza 9	8:34:26-8:42:01	6,26	8:43:01-9:40:12	57,11	11:23:04-11:56:05	33	11:56:05-13:03:06	67,11	13:09:09-13:51:09	42,2			
									Promedio ciclo	118,5		13:51:09-14:23:20	32,29
Pieza 10	9:44:02-9:51:11	7,13	9:51:11-10:50:26	57,22	12:35:15-13:07:05	32,2	13:07:05-14:14:08	67,13	14:25:19-15:02:19	38,1			
	Tiempo promedio por pieza	6,75	Tiempo promedio por pieza	57,17	Tiempo promedio por pieza	34,3	Tiempo promedio por pieza	68,64	Tiempo promedio por pieza	40,08	Tiempo promedio paquete	32,567	320,32
									Tiempo promedio por ciclo	120,90			

Figura 34: Kanban tradicional.

Registros de tiempos - Kanban IoT													
Piezas #	Transporte A		Camara de producción		Transporte B - Ensamble		Transporte C - Impresión de texto		Transporte D - Elevador		Paletizadora - Transporte E		Tiempo total por paquete
	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	Tiempo reloj	Tiempo en segundos	
Pieza 1	0:24:05-0:29:24	5,19	0:32:18-1:30:11	56,28	0:37:19-1:07:15	30,3	2:15:29-3:10:19	56,2	3:10:19-3:52:19	42			
Pieza 2	1:35:24-1:40:35	5,11	1:41:11-2:39:14	56,25	1:48:00-2:17:14	29,14	3:25:29-4:31:09	67,08	4:31:09-5:10:19	40			
Pieza 3	2:45:08-2:50:00	5,08	2:47:26-3:46:00	58,26	2:59:06-3:29:14	30,2	4:42:19-5:42:19	60	5:42:19-6:25:29	44,2			
									Promedio ciclo	126,2		6:25:29-6:52:22	27,2
Pieza 4	3:53:09-3:58:18	5,09	3:56:29-4:55:03	58,02	4:10:11-4:39:25	29,14	5:59:29-6:56:19	57,2	6:56:19-7:35:09	40			
Pieza 5	5:00:25-5:05:10	5,15	5:44:00-6:42:10	58,1	5:19:28-5:49:24	30,14	7:13:09-8:09:29	56,2	8:09:29-8:47:09	39			
Pieza 6	5:28:11-5:33:22	5,11	7:01:06-7:59:22	56,28	6:29:14-6:59:10	30,04	8:28:19-9:26:19	58	9:26:19-10:04:19	39			
									Promedio ciclo	118		10:08:19-10:36:01	28,2
Pieza 7	6:14:27-6:20:26	5,25	6:21:26-7:19:11	57,07	7:39:00-8:09:20	30,2	9:45:09-10:44:19	59,1	10:44:19-11:22:29	38,2			
Pieza 8	7:24:29-7:30:23	5,22	7:31:25-8:29:12	57,07	8:49:23-9:20:01	31,22	10:57:29-11:50:29	53	11:50:29-12:27:29	38,1			
Pieza 9	8:34:26-8:40:07	5,03	8:40:29-9:38:12	57,11	10:05:13-10:38:12	32,29	12:11:09-13:09:09	58	13:09:09-13:51:09	42,2			
									Promedio ciclo	118,5		13:51:09-14:18:20	27,29
Pieza 10	9:44:02-9:49:18	5,22	9:49:26-10:47:26	57,22	11:27:08-12:00:05	33,22	13:29:09-14:25:19	56,3	14:25:19-15:02:19	38,1			
	Tiempo promedio por pieza	5,15	Tiempo promedio por pieza	57,17	Tiempo promedio por pieza	30,6	Tiempo promedio por pieza	58,11	Tiempo promedio por pieza	40,08	Tiempo promedio paquete	27,6	299,47
									Tiempo promedio por ciclo	120,9			

Figura 35: Kanban IoT