

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**APLICACIÓN DEL SIX SIGMA EN PROYECTOS DE
CONSTRUCCIÓN**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

AUTORA:

Valeria Maria Mujica Plasencia

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

AUTORES:

Jose Manuel Cirilo Yactayo

Stefanno Ramiro Castillo Morales

Dilan André Ocrosoma Baldeón

Miguel Alberto Calderón Pintado

ASESOR:

Pablo Fernando Orihuela Astupinaro

Lima, Diciembre, 2021

Resumen

En un sector tan importante como el de la construcción se hace cada vez más necesario, de acuerdo a la exigencia del mercado, alcanzar procesos de clase mundial donde se busque que el porcentaje de error sea casi inadmisibles. En este contexto, en el presente trabajo de investigación desarrolla como objetivo principal la implementación del uso del Six Sigma en la variabilidad de la construcción. Como aplicación puntual, se toma como referencia la construcción de un edificio residencial en Lima para que, mediante la metodología Six Sigma, se haga un diagnóstico acertado de las principales causas de variabilidad en la productividad, principalmente de la mano de obra.

Si bien, el sector construcción cuenta con procesos complejos que dependen de diversos factores, un primer paso para reducir la variabilidad consiste en la identificación de causas especiales, que son las primeras que deben ser corregidas. Es así que, mediante el uso de gráficos de control y herramientas estadísticas de Six Sigma, que suponen una distribución de datos normal, se busca implementar este enfoque a algunos gráficos usuales en el control de una obra de construcción, como por ejemplo el Porcentaje de Plan Cumplido (PPC) y el rendimiento de la partida “Concreto pre mezclado para losas macizas” con el fin de identificar las causas especiales de variación por las cuales los valores se encuentran fuera de los límites esperados.

Luego del análisis, se obtiene que las principales Causas de No Cumplimiento de las partidas de construcción asociadas a las causas especiales son las relacionadas con los factores de Mano de obra y Tarea previa. Asimismo, el rendimiento se ve fuertemente influenciado por el Ajuste de cuadrillas por inicio de trabajos. Finalmente se encuentra que para el PPC y el rendimiento de la partida en mención, el nivel sigma es cercano a 2, lo cual debe ser mejorado por lo menos a un nivel de 3 (Hernandez y Oliveres 2018), mediante estrategias que eliminen las causas especiales en su totalidad, y en general, la variabilidad en los procesos constructivos.

ÍNDICE

1. Generalidades	5
1.1. Introducción	5
1.2. Justificación.....	5
1.3. Alcance.....	6
1.4. Objetivos	6
1.5. Metodología	7
2. Revisión de literatura – El Six Sigma.....	7
2.1. Introducción al Six Sigma	7
2.2. Esquemas de trabajo.....	16
2.3. Herramientas Six Sigma.....	20
3. Revisión de literatura – La variabilidad en los proyectos de construcción	32
3.1. Variabilidad en la construcción	32
3.2. Aplicación del Six Sigma a la construcción.....	33
3.3 Antecedentes de la aplicación de Six Sigma en la construcción.....	34
4. Aplicación del Six Sigma en la construcción de edificaciones.....	38
4.1 Aplicación de Six Sigma para el análisis del Porcentaje de Plan Cumplido	38
4.2 Aplicación de Six Sigma en la partida Concreto pre mezclado en losas macizas ...	49
5. Discusión de resultados.....	52
6. Comentarios y conclusiones	57
7. Referencias.....	60
8. Anexos	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del Ciclo DMAIC. Fuente. Bianca Minetto 2019.	16
Figura 2. Esquema de Value Stream Mapping. Fuente: Lean Manufacturing.....	19
Figura 3. Mapa de procesos de la constructora Icafal Sicomaq. Fuente. Página web Constructora Icafal Sicomaq (2021).	21
Figura 4. Diagrama SIPOC para el funcionamiento de una cafetería. Fuente. Página web Kanban tool (2021).	22
Figura 5: Diagrama de Ishikawa sobre las causas de la insatisfacción del cliente. Fuente. Constanza et al. (2021)	28
Figura 6: Diagrama de Pareto de una empresa textil. Fuente. Página web de Portafolio (2017).....	29
Figura 7: Carta de Control para porcentaje de errores por lote. Fuente. Página web de Ingenioempresa	31
Figura 8: Grafico de control estadístico de la productividad observada en el mes de Julio. Fuente: Kim et. al 2016.....	36
Figura 9. PPC/Rolled PPC en el tiempo. Fuente. Elaboración propia.....	43
Figura 10. Cuadro de control de PPIC. Fuente. Elaboración propia.....	46
Figura 11. PPC a lo largo de la secuencia de obra. Fuente. Elaboración propia	48
Figura 12. Cuadro de control de Rendimientos para la partida Concreto pre mezclado en losas macizas. Fuente. Elaboración Propia	52
Figura 13. Recurrencia de Causas de No cumplimiento. Fuente. Elaboración propia	55
Figura 14. Recurrencia de Causas de bajo rendimiento. Fuente. Elaboración propia	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nivel Sigma y DPMO.....	8
Tabla 2. Porcentaje de productos sin defectos según el número de pasos de un proyecto ..	9
Tabla 3. Acreditación Six Sigma para los distintos cargos dentro de una empresa.....	12
Tabla 4. Logros de empresas pioneras en el Six Sigma.....	15
Tabla 5. Ejemplo de toma de datos para PPC.....	35
Tabla 6. Toma de datos para el PPC en un edificio residencial.....	40
Tabla 7. Cálculo del Rolled PPC	42
Tabla 8. Cálculo de Límites e índices semanales	45
Tabla 9. Clasificación del PPC y relación de este con los retrasos en obra.....	47
Tabla 10. Rendimientos e indicadores estadísticos por fecha.....	51
Tabla 11. Causas de no cumplimiento por fecha	54
Tabla 12: Causas de bajo rendimiento por fecha	55

1. Generalidades

1.1. Introducción

La industria de la construcción presenta procesos con altos requerimientos de calidad y plazos amplios, y es afectada por diversos factores como la ubicación y el clima que producen tiempos improductivos, lo que a su vez genera ineficiencias en la administración de los recursos involucrados y en la dirección general de las obras (Cantú et al., 2018). Asimismo, estos hacen a la industria menos predecible a comparación de otras en donde las actividades son más repetitivas. Por ejemplo, para la construcción civil, los miembros de los equipos generalmente cambian con cada proyecto, así como también la maquinaria y los materiales a emplear acorde a los requerimientos del cliente. Entonces, debido a que las condiciones son distintas, esta variabilidad ocasiona que los procesos constructivos generen desperdicios y disminuyan su productividad. Por esto mismo, en la presente investigación, se va a estudiar la manera de aplicar el Six Sigma como una herramienta de diagnóstico y gestión de la variabilidad de los procesos constructivos.

1.2. Justificación

Six Sigma es considerada como una poderosa estrategia de negocio que usa una metodología de mejora continua estructurada para reducir la variabilidad de procesos y minimizar desperdicios. En aras de este objetivo es fundamental la aplicación de herramientas estadísticas y técnicas. En otras palabras, es una filosofía de calidad que garantiza el primer nivel en todos los procesos (Koch, 2004). Los distintos enfoques del Six Sigma coinciden en agrupar resultados o aspectos medibles que ayuden a la definición de límites que sean adecuados para clasificar los procesos o productos de estudio como óptimos o defectuosos. De esta manera, mediante un procedimiento sistemático de cinco pasos: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (DMAIC), se buscan causas raíces a ser mejoradas para perseguir el perfeccionamiento. Cada etapa del DMAIC está relacionada con el análisis de datos y emplea la base estadística de la desviación estándar (sigma) para establecer criterios con el cual se califican las tendencias actuales de los resultados que da la empresa y reducir así, los defectos a un margen de error muy pequeño. La idea de tomar 6 desviaciones estándar como límites da un valor equivalente a 3,4 errores por millón de oportunidades o probabilidades de defecto. Es decir, el área que queda dentro de los límites entre +3 sigma y -3 sigma sería del 99.9997% (Almudéver, C).

1.3. Alcance

El alcance de este documento consiste en la revisión de la bibliografía acerca de los principales conceptos del enfoque Six Sigma. Esto abarca principalmente herramientas para el control estadístico de variabilidad en un proceso. Asimismo, analiza los motivos que fundamentan su aplicación en el sector de la construcción. En adición, profundiza en la revisión de data sobre el cumplimiento de actividades de la planificación y la productividad de procesos constructivos. Finalmente, se realiza un análisis estadístico que contribuya a la propuesta de mejoras, en base a las causas especiales de variabilidad.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Presentar la metodología Six Sigma como una alternativa para gestionar la variabilidad en procesos de construcción, a fin de identificar las principales causas de esta.

Objetivos específicos

Utilizar la metodología Six Sigma en el porcentaje de plan cumplido (PPC) de la construcción de un edificio multifamiliar, a fin de encontrar las causas especiales, cuya eliminación, garantice una reducción de variabilidad en la planificación de una obra.

Utilizar la metodología Six Sigma en la partida de construcción “Concreto premezclado para losa maciza” en el análisis de datos de productividad, a fin de encontrar las causas especiales, cuya eliminación garantice una reducción de variabilidad en el rendimiento de la partida.

1.5. Metodología

En primer lugar, se solicitó la información con respecto a mediciones de productividad realizadas en el sector construcción por una empresa peruana (Motiva S.A.). En segundo lugar, se analizaron tanto el PPC como las partidas cuya data estaba disponible y es apropiada para efectuar un análisis de variabilidad. En tercer lugar, se utilizaron herramientas estadísticas como el cuadro de control y métricas Six Sigma para definir causas especiales. Finalmente, se volvió a contactar con la empresa para requerir información de Causas de No Cumplimiento y factores que comprometieron el rendimiento de manera considerable. De esta manera, se hizo un análisis para encontrar las principales causas de variabilidad en la construcción de un edificio multifamiliar en la ciudad de Lima.

2. Revisión de literatura – El Six Sigma

2.1. Introducción al Six Sigma

2.1.1. Definición

Six Sigma es un enfoque desarrollado por la empresa tecnológica Motorola, específicamente por el ingeniero Bill Smith, en el año 1985 que busca obtener la mínima cantidad de defectos en productos y asegurar flujos de trabajo en procesos, principalmente en los relacionados con la industria de la manufactura (Oguz et al., 2012). Para lograr este propósito, se basa en herramientas estadísticas que controlan la variabilidad (Bravo, Euphrosino y Pucharelli, 2020); y por ende, facilitan la selección de las maneras más idóneas de reducirla.

Deming, creador de la estrategia de Gestión de la Calidad Total (TQM), definió en 1986 dos tipos de variabilidad: la de causa común y la de causa especial. La primera se relaciona con un tipo de fuente aleatoria y para resolverla se debe implicar un rediseño y cambio radical al proceso analizado. Por otro lado, la segunda tiene que ver con una fuente controlable que requiere de una mejora puntual para que la variación se normalice. En este contexto, el mismo experto sugiere que se deben tratar primero las variaciones de causa especial (Abdelhamid, 2003). El Six Sigma se centra en estos dos tipos de variabilidad basando sus dos metodologías principales: Definir, Medir, Analizar, Diseñar y Verificar (DMADV), que se centra en la variabilidad de causa común; y Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC), que se centra en la variabilidad de causa especial. Las siglas representan

la secuencia de pasos implicados y estos son explicados en el numeral 2.2. del presente trabajo de investigación.

Con respecto a términos en la estadística, la letra griega sigma representa la desviación estándar, indicador de variabilidad de una serie de datos con respecto a la media. Análogamente a esto, una de las principales métricas del Six Sigma es el nivel sigma. Este cuantifica la habilidad de una compañía de producir un producto o brindar un servicio con un límite de defectos tolerable. En este contexto, afirmar que un producto o proceso tiene un nivel de Six Sigma significa que el 99.99966% de estos no posee defecto alguno (Beary y Abdelhamid, 2006). Dicho de otra manera, de cada millón de oportunidades solo se presentan 3.4 defectos. Al eliminar estos, evidentemente, se mejora los niveles de producción y aumenta la calidad final del producto involucrado. De esta manera, se eleva la competitividad de cualquier empresa en el mercado globalizado actual (Bravo et al., 2020). En la **Tabla 1** se puede observar como a medida que el nivel sigma va en aumento, los defectos por millón de oportunidades decrecen de manera considerable. Nótese que esta relación no es lineal.

Tabla 1. Nivel Sigma y DPMO

Nivel Sigma	Porcentaje de productos sin defectos	Defectos por millón de oportunidades (DPMO)
1	30.9	690 000
2	69.2	308 000
3	93.3	66 800
4	99.4	6 210
5	99.98	320
6	99.9997	3.4

Nota. Adaptado de “Implementing and Applying Six Sigma in Construction”, por Pheng y Hui, 2004. pp 483.

Finalmente, es importante precisar que estos valores son exactos cuando se trata de un proceso de implica solo un paso. Como es lógico, de considerarse procesos con una mayor cantidad de pasos, el porcentaje de productos sin defectos decrecerá y el DPMO aumentará de manera notable, como se muestra en la **Tabla 2**. Asimismo, se puede inferir que cuando se tienen procesos con un número considerable de pasos, alcanzar un nivel de Six Sigma es más difícil; por lo que, el nivel esperado de un proceso se debe basar también en el costo beneficio de la solución a implementarse.

Tabla 2. Porcentaje de productos sin defectos según el número de pasos de un proyecto

Número de pasos	3 Sigma	4 Sigma	5 Sigma	6 Sigma
1	93.32	99.379	99.9767	99.99966
10	50.08	93.96	99.768	99.9966
100	0.10	53.64	97.7	99.966
1000	0.0	0.2	79.24	99.661

Nota. Adaptado de “Customer satisfaction measurement and analysis using Six Sigma”, por Behara, Fontenot y Greshman, 1995.

2.1.2. Principios

Los principios del enfoque Six Sigma se traducen como una serie de características o premisas, que las empresas deben desarrollar y tener en cuenta para poder garantizar resultados apropiados y la aplicabilidad de la metodología seleccionada. Según Gutiérrez y De la Vara (2009); además de Pheng y Hui (2004) destacan las siguientes:

a.-Liderazgo

Debido a que Six Sigma es un programa que, a grandes rasgos, sugiere cambios en la manera de abordar problemas relacionados con la producción. Es imprescindible que, desde los niveles más altos de la empresa, se contribuya con la difusión de este enfoque y se transmita el apoyo a los trabajadores para que se formen bajo el

concepto Six Sigma; pues este debe pasar a formar parte de la filosofía de la compañía.

b.-Estructuración y roles del equipo Six Sigma

Es necesario, hacer participar a distintos miembros de la empresa (de áreas y posiciones dispares) para crear un vínculo de compromiso con los resultados que se esperan obtener. Es usual que, dentro de los proyectos Six Sigma se designen los siguientes cargos, roles y responsabilidades.

- **Líder Ejecutivo**
Por lo general, es una de las personas más influyentes de la corporación y el encargado de manifestar la iniciativa de adoptar el enfoque Six Sigma. Asimismo, es el responsable de convocar un comité directivo para concretar una estrategia de implementación. Dentro de este comité, es imprescindible contar con un representante de finanzas que evalúe la viabilidad de la iniciativa. Del mismo modo; los miembros de este, designan a los campeones, a los maestros cinta negra y a sus discípulos (Los cinta negra).
- **Campeones**
Son ejecutivos medios y superiores que se encargan de seleccionar los proyectos a ejecutarse bajo el enfoque Six Sigma, también se hacen cargo de promover y supervisar el desarrollo de los mismos.
- **Maestros Cinta Negra**
Son expertos en el enfoque Six Sigma y en la aplicación de sus distintas metodologías, herramientas y métricas. Asesoran proyectos y son formadores técnicos de los trabajadores designados por la empresa a convertirse en cinta negra. Generalmente, son externos a la empresa y deben ser contratados provenientes de compañías netamente dedicadas a la capacitación o de corporaciones que hayan tenido un éxito comprobado en la implementación de este sistema.
- **Los Cinta Negra**
Los candidatos a ser entrenados para este rol son elegidos en base a la línea de carrera que tengan en la empresa. No es necesario dar prioridad a los ingenieros de calidad; sin embargo, se recomienda que estos se posicionen

en todas las áreas de organización y sean expertos en los distintos aspectos del negocio como atención a clientes, ingeniería, finanzas, etc.

- Los Cinta Verde

Al igual que los candidatos para el grado de cinta negra, los del grado de cinta verde pueden pertenecer a cualquier área de organización en la empresa. Son entrenados por sus superiores en cargo y la principal diferencia con estos es que, mientras los primeros se dedican a tiempo completo a las cuestiones de Six Sigma; los segundos, lo hacen de manera parcial, pues continúan ejerciendo su función tradicional en la empresa.

- Los Cinta Amarilla

Este grado está conformado por el personal cotidiano de la empresa del área crítica de mejora. Son entrenados bajo un enfoque práctico de solución de problemas y son parte fundamental al momento de saber si la metodología aplicada ha tenido éxito o no.

Entrenamiento y acreditación

Para entender el tipo de entrenamiento al cual los profesionales son sometidos es crucial el concepto de Currículo de Cinta Negra, que consiste en el desarrollo de un proyecto Six Sigma a nivel teórico y práctico. Para los Cinta Negra este entrenamiento consta en un promedio de entre 120 y 160 horas, que se suele repartir entre 4 y 5 semanas no consecutivas. Después de cada semana de entrenamiento, es usual que haya un mes de receso. Esto debido a que el entrenamiento es intensivo y se deben dejar de lado las responsabilidades cotidianas profesionales. Además, el tiempo de receso es ideal para poner en práctica lo aprendido de manera secuencial. En adición, se debe precisar que el entrenamiento se da independientemente del cargo que un profesional ocupe en la empresa.

Con respecto a la acreditación para el grado de Cinta Negra, no existe un proceso estandarizado que permita garantizar que un profesional cuente con suficiente conocimiento y experiencia para poseer el título en mención. No obstante, no debería ser menor que la presentada a continuación en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Acreditación Six Sigma para los distintos cargos dentro de una empresa

Cargo	Acreditación
Campeones	Aprobar examen práctico-teórico de Six Sigma y sus principales metodologías.
Maestros de Cinta Negra	<p>-Tener experiencia en la dirección de por lo menos un proyecto exitoso y en el asesoramiento de como mínimo 20 proyectos exitosos.</p> <p>-Aprobar examen práctico-teórico sobre el Currículo de Cinta Negra.</p>
Los Cinta Negra	<p>-Tener experiencia en la dirección de por lo menos 2 proyectos exitosos y en el asesoramiento de como mínimo 4 proyectos exitosos.</p> <p>- Aprobar examen práctico-teórico sobre el Currículo de Cinta Negra.</p>
Los Cinta Verde	<p>-Haber presentado habilidades de liderazgo en por lo menos dos proyectos exitosos.</p> <p>- Aprobar examen práctico-teórico sobre el Currículo de Cinta Negra.</p>
Los Cinta Amarilla	<p>-Haber participado en por lo menos en un proyecto.</p> <p>- Aprobar examen práctico-teórico sobre su entrenamiento básico.</p>

Nota. Adaptado de “Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma”, por Gutiérrez y de la Vara, 2009. pp 423.

El cliente como centro

Una característica esencial del Six Sigma es orientar el funcionamiento de los distintos procesos a los requerimientos del cliente. Es así que se pueden jerarquizar las prioridades y determinar los puntos críticos, donde buscar obtener un nivel de Six Sigma. Es decir, se debe procurar que las formas en que se miden los requerimientos (calidad, cantidad, servicio, etc.) sean las más adecuadas y que estas, presenten la mínima cantidad de defectos.

Correcto procesamiento de datos

Es de carácter obligatorio seleccionar los procesos a ser mejorados con sustento basado en datos. Seleccionar métricas adecuadas para identificar los puntos críticos es tan importante como encontrar soluciones. Es por esto que, el apoyo para la toma de decisiones basados en datos es parte fundamental del Six Sigma.

Selección de metodología adecuada

El apoyo en las herramientas estadísticas para el procesamiento no es suficiente. Es pertinente delimitar de manera correcta el problema a solucionar y elegir la metodología de Six Sigma que más se adecue a las necesidades de la empresa. En el numeral 2.2 de la presente investigación se hace hincapié en tres de los más importantes esquemas de trabajo del Six Sigma y su aplicabilidad.

Implicancia directa en costos

Una de los beneficios más potentes del Six Sigma es que puede solucionar problemas de producción de forma casi permanente. Al disminuir defectos, las ganancias y ahorros de una corporación se pueden incrementar sustancialmente; pues es una realidad que los defectos de una serie de productos tienen injerencia directa en el costo de calidad. Un proceso de nivel 3 Sigma implica un costo de calidad de entre 25 y 40% de las ventas. Por otro lado, un proceso de nivel Six Sigma, tiene una implicancia menor del 5% en el mismo rubro.

Reconocimiento de profesionales involucrados

La vigencia del Six Sigma recae en la experiencia de los trabajadores que lo aplican de manera exitosa en diversos proyectos. En este sentido, cuando un proyecto tenga éxito, los líderes de las corporaciones deben dar el reconocimiento adecuado. Este,

según la teoría de las 4P, puede manifestarse de distintas formas: palabras de felicitación (palmadita), la presentación de logros ante pares y superiores (presentación), una compensación monetaria (peso); o inclusive, un aumento de responsabilidades que se traduce en un ascenso (puesto).

Capacidad de integración

Las características del Six Sigma lo hacen un enfoque flexible que le permite complementarse con distintas estrategias ya puestas en marcha con anterioridad en una empresa. Por esta razón, cuando ha de implementarse el Six Sigma, debe tratar de reforzar las iniciativas tradicionales que se han adoptado para asegurar la calidad. Un ejemplo claro de esto, se da en el ámbito de la construcción, donde el enfoque de Lean Construction da origen a una nueva metodología (Lean Six Sigma) aplicable para reducir la variabilidad de los procesos constructivos.

Comunicación

Como se vio antes, el entrenamiento y capacitación de los profesionales en Six Sigma debe fundamentarse en distintos mecanismos de comunicación. Es solo así que los nuevos conocimientos que acarrea este enfoque pueden llegar a ser entendidos por todos los trabajadores. En un primer lugar, se debe transmitir los beneficios y conceptos prácticos de Six Sigma. En segundo lugar, los proyectos específicos donde se aplicarán estos conceptos. Finalmente, los avances y resultados. En el interino de estos tres procesos debe haber un constante intercambio de ideas que contribuyan a la solución del problema planteado.

2.1.3. Evolución

La concepción inicial de Six Sigma es contribuir al TQM y al principio de cero defectos. Desde su creación e implementación en Motorola a finales de los 80's, la metodología en mención ha demostrado ser aplicable en distintos campos de la industria. Por ejemplo, en 1994 la empresa aeroespacial Allied Signal inició un programa para el desarrollo del Six Sigma. De manera secuencial, en 1995 la empresa General Electric hizo lo propio en aras de mejorar su producción (Gutierrez y De la Vara, 2009). Fue en estas tres empresas donde el enfoque Six Sigma entró en el ojo público y ganó notoriedad, después que se reportaran grandes sumas de dólares en ahorros (**ver Tabla 4**). Desde este momento inicial, este sistema de trabajo fue adaptado por diversos gigantes transnacionales como Toshiba, City

Bank y American Express. Años más tarde, el enfoque se trasladaría a Europa, a empresas como Telefónica e Iberia y Sudamérica, a empresas como la brasileña Mabe (Yepes, 2005).

Tabla 4. Logros de empresas pioneras en el Six Sigma

Empresa	Presidentes	Ahorros
Motorola	Bob Galvin	1 000 millones de dólares durante tres años
Allied Signal	Larry Bossidy	2 000 millones de dólares entre 1994 y 1999
General Electric	Jack Welch	2 570 millones entre 1997 y 1999

Nota. Adaptado de “Quslity Engineering”, por Hahn, Doganaksoy y Hoerl, 2000. Y Adaptado de “Six Sigma: A Breakthrough Strategy for Profitability”, por Harry, 1998.

El Six Sigma ha estado en constante evolución y desarrolló dos metodologías principales para adaptarse a las necesidades de distintas empresas. Con el DMAIC, se busca corregir errores puntuales (causas especiales) mientras que con el DMADV la prioridad es rediseñar un proceso o un producto de manera integral (causas comunes). Asimismo, la flexibilidad del enfoque lo ha hecho funcionar de herramientas de muchos otros sistemas de gestión de la calidad que buscan atacar la variabilidad como Lean Construction. Además, como soporte de la expansión de este enfoque, existe una robusta red de capacitación para instruir a cualquier profesional que desee incorporar el Six Sigma en su corporación.

Algunos desafíos de esta herramienta estadística consisten en su perfeccionamiento para trabajar con big data y no llevar a un cálculo de DPMO errado. Asimismo, **el enfoque se basa en que el valor ideal puede oscilar entre ± 1.5 sigmas**. Esto no ocurre siempre y depende del tipo de industria donde se esté tratando de reducir la variabilidad. Por último, es cada vez necesario que este enfoque se traslade a pequeñas y medianas empresas, donde todavía no hay un desarrollo adecuado de las diversas metodologías (Antwiwaa, Baiden Nani y Morgan, 2020).

2.2. Esquemas de trabajo

DMAIC

La metodología DMAIC, usada para la estrategia Six Sigma consiste en 5 etapas (ver Figura 1):



Figura 1. Esquema del Ciclo DMAIC. Fuente. Bianca Minetto 2019.

- **Definir** el propósito de aplicar Six Sigma, saber los parámetros, actividades a observar y las características críticas para la calidad enfocándose en quien recibe el producto y como estas permiten una mejora en los ingresos. Esta etapa es la parte inicial en donde se realiza la identificación de posibles mejoras para los procesos dentro de una compañía y, acorde a los objetivos de la empresa, se seleccionan las de mejores expectativas (Las partidas más convenientes a controlar en obra quedan pendientes a revisión). Estas mejoras tienen que resolver problemas que son visibles al momento de la identificación, deben de lograr beneficios y tener definidas las razones/etapas de la implementación. Herramientas como **Diagramas de Pareto** permiten conocer qué procesos son más críticos y que tanto afectan en la calidad.
- **Medir** las causas de los problemas, especificando el cómo se van a dar estas mediciones y el estudio de sus resultados mostrados de manera gráfica para así observar las tendencias del proceso. El proceso está compuesto de varias características, principalmente aquellas que el cliente percibe como clave para la calidad, las cuales son necesarias para medir la capacidad y el desempeño actual del proceso. Al finalizar esta etapa se debe tener claro el desarrollo del proceso con todos los pasos que lo componen. Del mismo

modo, conocer todos los indicadores de calidad, así como también las variables más críticas y la manera de medición para la obtención de información que puede apoyarse en el uso de herramientas como Matrices de priorización para conocer las variables críticas.

- **Analizar** si los procesos se están dando de manera adecuada, qué cosas pueden generar diferencias entre los resultados y, en caso, la variabilidad sea alta o existan varias muestras con errores, plantear cual puede ser el origen.

De los datos obtenidos en la anterior etapa se analiza la situación del proceso descubriendo las causas de los problemas y las opciones de mejora. En caso las causas determinen que el problema es recurrente y no aleatorio se puede continuar usando la metodología. En esta etapa es necesario estructurar un plan de mejora apoyado de la estadística sobre los factores más críticos en el desempeño del proceso tomando en consideración que variables se pueden controlar en cada paso detallado del proceso. Para esto, herramientas como diagramas de flujo, pruebas de chi-cuadrado y estudios de correlación son necesarios.

- **Mejorar** después del estudio de los problemas, los procesos con las recomendaciones y cambios, tomando en consideración los límites, riesgos e implicancias de la implementación. Dicha mejora es un proceso implementado en base al plan establecido anteriormente en pruebas piloto que deben de ser validadas para saber si la mejora es viable y obtener una propuesta de cambio como una solución a los problemas previamente definidos.

Se debe considerar el número de pruebas a realizar para que la variable de desempeño seleccionada represente un resultado positivo de acuerdo al cliente y las metas de la compañía. Las propuestas pueden ser identificadas en una lluvia de ideas, mediante una simulación de eventos y análisis de efectos.

- **Controlar** que la mejora implementada mantenga resultados en la calidad y producción, asimismo, ésta deberá ser continua y cuantificada para que los beneficios se vean reflejados constantemente en cada proceso de control.

Con la solución definida, se necesita una estrategia de control sobre el proceso para que en proyectos a futuro se mantenga la eficiencia lograda.

En esta etapa es necesario comparar los resultados obtenidos con los objetivos planteados inicialmente antes de la aplicación de la metodología y definir de qué manera se puede monitorear los defectos solucionados para que no se regrese a las condiciones iniciales. Las herramientas esenciales a usar en esta etapa son: Control estadístico como gráficos de resultados comparativos y Técnicas de estandarización de procesos con planes y mantenimiento ante contingencias.

2.2.1. **DMADV**

Alternativa al DMAIC, con diferencia en mejorar (Improve) y controlar (Control) al tener como nuevos pasos de la metodología el diseñar (Design) y verificar (Verify).

Por un lado, la idea de diseñar se da cuando el proceso no puede mejorar debido a que el proyecto es nuevo, a diferencia de proyectos donde los procesos son repetitivos y cíclicos, lo cual resulta en la necesidad de establecer un proceso desde el inicio detallado, buscando cual es el más óptimo según el tipo de proyecto. Por otro lado, verificar permite corroborar si este diseño previamente realizado en pruebas piloto cumple con los objetivos definidos al inicio de la metodología DMADV. Una vez implementado se tiene que monitorizar el nuevo proceso del mismo modo que con la anterior metodología.

2.2.2. **Lean Six Sigma**

A fin de complementar y lograr que la estrategia Six Sigma presente más eficiencia, sobre todo en la industria de la construcción, esta se ve reforzada con los conceptos y métodos del Lean Process. La metodología mencionada anteriormente tiene como objetivo disminuir los reprocesos y el tiempo de ciclo, ahorrar costos e incrementar la productividad, para lo cual se enfoca en la reducción de actividades innecesarias mediante la idea de identificar los desperdicios y visibilizarlos a fin de establecer una guía para la acción basada en los 05 principios propuestos por Jones (1996):

- Especificar el valor para cada producto específico (qué se agrega).
- Identificar el flujo del valor para cada producto (en qué etapas se agrega).
- Agregar valor en flujo continuo, ininterrumpido.
- Organizar el proceso para que el cliente jale valor desde el productor.
- Buscar la perfección

Value Stream Mapping

Otra herramienta dentro de esta metodología es el Value Stream Mapping o VSM, un diagrama de flujo que permite visualizar y mejorar la información en un proceso para conocer oportunidades de mejora. Las actividades que se realizan en los procesos son agregadas según el criterio del cliente de si añade o no valor al producto final para eliminar aquellas que no agreguen valor.

El VSM comienza con un diagrama actual del proceso en donde, una vez conocidos los problemas, la fuente de los desperdicios y las mejoras potenciales a realizar, se llega a desarrollar un diagrama ideal. Esta herramienta se utiliza para dar el mayor valor de la manera más eficiente al producto final, tomando en consideración el concepto de mejora continua para evitar errores repetitivos en el desarrollo de actividades posteriormente.

Para las actividades de construcción civil, el VSM puede aplicarse en diversos campos como producción, logística, desarrollo y administración. En estos se busca: Encontrar los desperdicios al analizar el manejo de materiales, reducir los retrasos, disminuir la necesidad de retrabajo y eliminar los pasos inútiles respectivamente en cada área mencionada anteriormente (**ver Figura 2**).

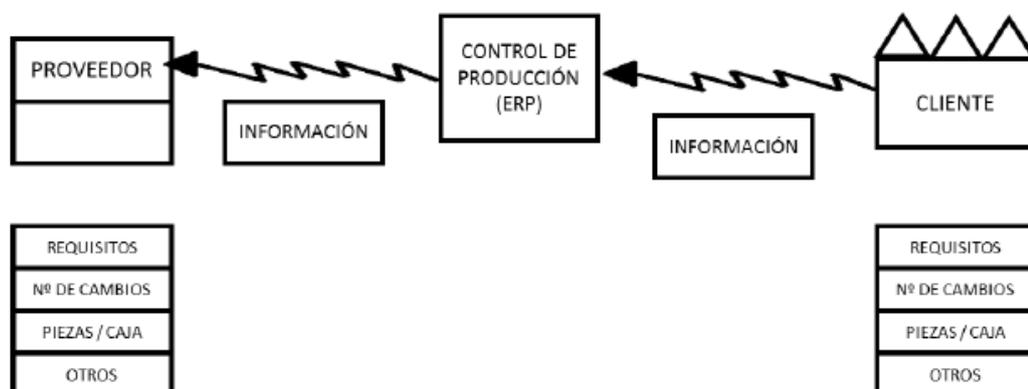


Figura 2. Esquema de Value Stream Mapping. Fuente: Lean Manufacturing.

La filosofía Lean en trabajo y producción es considerada como un conjunto de ideas necesarias para lograr una mejora en la calidad reduciendo los costos de producción al identificar y eliminar todo desperdicio producido en el desarrollo de las labores en una empresa. Desde Toyota, se identificaron los desperdicios antes mencionados y se tomó la iniciativa de implementar los conceptos Lean a fin de especificar valor, alinear acciones creadoras de valor en la mejor secuencia, evitar interrupciones y ser más efectivos (Gutiérrez y De la Vara, 2009). La presente filosofía posee 14 principios establecidos en el Toyota Production System entre los cuales resaltan:

- Las tareas estandarizadas son el fundamento de la mejora continua y autonomía del empleado.
- Desarrollar, hacer crecer y respetar a los líderes que comprendan el trabajo a la perfección y vivan la filosofía mientras enseñan a los demás.
- Crear procesos en flujo continuo para hacer que los problemas salgan a superficie de manera sencilla.

Al incluir dicha filosofía en el concepto de Six Sigma podemos aprovechar la mejora continua no solo en el desarrollo del producto a entregar, también en los equipos y líderes de trabajo, para así enfocarse en las mejores soluciones gracias al análisis de todas las etapas y que estas sean implementadas de manera práctica.

2.3. Herramientas Six Sigma

En el presente acápite se enumeran y se explican de manera breve algunas herramientas y métricas de desempeño que pueden ser de utilidad al momento de aplicar cualquiera de las metodologías Six Sigma, principalmente para la DMAIC. Según Gutiérrez y De la Vara (2009), Perales (2018), y Trujillo y Caballero (2020) acontecen las siguientes.

Las herramientas que se aplican en **la etapa de definir** se basan en delimitar el alcance del proceso a mejorar, teniendo en cuenta los requerimientos del cliente.

Mapa de Procesos

Permite visibilizar la interrelación de los diversos procesos que ejecuta una empresa, jerarquizándolos en tres niveles.

- Procesos estratégicos. - fundamentan a las políticas del negocio y a las estrategias de trabajo.

- Procesos operativos. - hacen referencia a los procesos clave de producción o de generación de servicios. Estos toman en consideración el uso de recursos y las distintas áreas funcionales de la empresa.
- Procesos de soporte. - ayudan a la ejecución de los procesos estratégicos y operativos.

En la **Figura 3** se muestra un mapa de procesos para la constructora chilena Icafal Sicomaq. Nótese que los procesos estratégicos se distribuyen en la parte superior; mientras que los procesos de soporte se colocan en la parte inferior. Dejando así, la parte central para los procesos operativos.



Figura 3. Mapa de procesos de la constructora Icafal Sicomaq. Fuente. Página web Constructora Icafal Sicomaq (2021).

SIPOC

Esta técnica representa por sus siglas en inglés el flujo Proveedor, Entrada, Proceso, Salida y Cliente. Al analizar cada proceso, se puede analizar elementos críticos que sugieran cuáles son los que tengan oportunidad de mejora. En la **Figura 4** se puede apreciar el diagrama SIPOC para el funcionamiento de una cafetería. Su facilidad de elaboración, lo hace constituirse como una herramienta idónea para identificar áreas de mejora en el flujo de trabajo.

Además de las mencionadas, es común que se usen también técnicas para delimitar aspectos críticos a mejorar como el Análisis Pareto, Mapa de Cadena de Valor y Mapa de Flujo de Valor.



Figura 4. Diagrama SIPOC para el funcionamiento de una cafetería. Fuente. Página web Kanban tool (2021).

En la **etapa de medir** se suelen incorporar métricas que midan el desempeño de un proceso. De esta forma se pueden validar sus deficiencias y mejorar la eficiencia.

Índice Z

Este valor cuantifica la distancia entre especificaciones y la media del proceso para estandarizarse considerando la desviación estándar. Esta es la métrica de mayor uso para evaluar la capacidad de un proceso.

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \text{ y } Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma}$$

Donde:

Z_s : Z superior

Z_i : Z inferior

ES: Especificación superior

EI: Especificación inferior

μ : Media del proceso

σ : Desviación estándar del proceso

Se debe considerar trabajar con el valor Z, que se debe obtener de seleccionar el mínimo valor entre el Z_s y Z_i .

$$Z = \text{Min}(Z_s, Z_i)$$

Donde:

Z: Índice Z

Z_s : Z superior

Z_i : Z inferior

Además, se debe considerar que dependiendo de si se trabaja con la desviación estándar a corto o largo plazo, el valor de Z llevará el subíndice c o L según sea el caso. En función a la diferencia de estos valores se define el movimiento del proceso.

$$Z_m = Z_c - Z_L$$

Donde:

Z_m : Movimiento del proceso

Z_c : Z a corto plazo

Z_L : Z a largo plazo

Si no se puede calcular el movimiento del proceso, este se asume como 1.5. No obstante, de ser posible calcular este valor y que resulte menor que 1.5 solo indicará que se está utilizando un mejor control para el proceso del que requiere. Por otro lado, si el Z_m resulta mayor que 1.5 el control aplicado será deficiente.

Calidad Six Sigma

Para lograr la calidad Six Sigma se requiere que el índice Z_c sea igual a 6 o que el índice Z_L sea igual a 4.5. Como vimos anteriormente, en un proceso Six Sigma la media puede moverse en un rango de 1.5 la desviación estándar para que la teoría sea aplicable.

Para obtener el nivel de calidad en sigmas de corto plazo se debe conocer la cantidad de partes por millón fuera de especificaciones. De la siguiente manera:

$$Z_c = 0.8406 + \sqrt{29.37 - 2.221 \times \ln(PPM_L)}$$

Donde:

Z_c : Nivel de calidad en sigmas a corto plazo

PPM_L : Partes por millón fuera de especificaciones a largo plazo

Asimismo, si se desea conocer las PPM a largo plazo, se puede utilizar la siguiente fórmula basada en el Z_c .

$$PPM_L = \exp\left[\frac{29.37 - (Z_c - 0.8406)^2}{2.221}\right]$$

Donde:

Z_c : Nivel de calidad en sigmas a corto plazo

PPM_L : Partes por millón fuera de especificaciones a largo plazo

Con la presentación de estas fórmulas se puede inferir que los niveles de calidad medidos en sigmas también pueden resultar números con decimales. Se advierte que, esta métrica se adecua a procesos que presenten variables según la distribución normal.

En adición, según Harry (2000), pasar de un nivel sigma a otro mayor requiere de un margen de tiempo considerable; donde por ejemplo se ha demostrado que para pasar de 4 sigmas hasta 6 sigmas se requiere de aproximadamente 5 años.

DPMO

A diferencia del índice Z que usa para medir la calidad en función de variables continuas, se puede hacer lo propio cuando se trata de variables que son atributos. Para este caso se utiliza el concepto de DPMO, que como se señaló en acápites posteriores, hace referencia a los defectos por millón de oportunidades de error.

Si se define unidad como la parte de un proceso que es posible evaluar su calidad. Entonces se puede delimitar la métrica DPU que cuantifica los defectos con respecto al número de unidades evaluadas.

$$DPU = \frac{d}{U}$$

Donde:

DPU: Defectos por unidades inspeccionadas

d: Defectos

U: Unidades inspeccionadas

Sin embargo, el DPU no considera las oportunidades que se puede tener de concebir una unidad defectuosa. Entonces, al agregar esta variable se puede multiplicar por un factor para así encontrar el total de unidades defectuosas; si el proceso se realizara este un millón de veces. Por lo tanto:

$$DPMO = 1\,000\,000 \times \frac{d}{U \times O}$$

Donde:

DPMO: Defectos por millón de oportunidades

d: Defectos

U: Unidades inspeccionadas

O: Oportunidades de error por unidad

Es objetivo de la métrica Six Sigma alcanzar como máximo 3.4 DPMO para un proceso de clase mundial. Además, se suele utilizar la presente métrica para variables que se asemejen a una distribución de Poisson.

Para relacionar esta métrica con el nivel de calidad sigma se debe utilizar la distribución mencionada de la siguiente manera:

$$Y = e^{-DPU}$$

Donde:

Y: Rendimiento del proceso

DPU: Defectos por unidades inspeccionadas

Con esta fórmula se puede hallar el rendimiento en función del DPU. Acto seguido se puede utilizar la función inversa de la distribución normal para hallar el nivel de sigma a largo plazo. Se debe suponer que un desplazamiento adicional de 1.5 sigmas. De este modo se tendría:

$$P(Z < Z_Y) = Y \text{ o } P(Z > Z_Y) = 1 - Y$$

$$Z_c = Z_y + 1.5$$

Donde:

Z: Valor Z de la distribución normal estándar

Z_Y : Nivel de sigmas a largo plazo del proceso

Y: Rendimiento del proceso

Z_c : Nivel de sigmas del proceso

Rolled Throughput Yield

Esta métrica considera el rendimiento de las diversas etapas o subprocesos que engloba cada proceso. El rendimiento combinado, por su traducción del inglés, representa la probabilidad de que una unidad no contemple defecto alguno tras pasar por una secuencia de pasos. Por este motivo se debe calcular el rendimiento de manera independiente para cada subproceso.

$$Y_i = \frac{\text{Número de unidades que pasan a la etapa } i \text{ por primera vez}}{\text{Número de unidades probadas en la etapa } i}$$

Consecuentemente, el rendimiento combinado no es más que la multiplicación de cada rendimiento independiente. Por lo que si se tiene un proceso con n etapas se deberá efectuar una multiplicación de la siguiente forma:

$$Y_c = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_n$$

Donde:

Y_c : Rendimiento combinado

Y_n : Rendimiento del proceso n

A partir del rendimiento combinado se puede obtener el número de partes por millón de unidades que presentan defectos y encontrar el respectivo nivel sigma.

Las herramientas en **la etapa de analizar** facilitan la identificación de causas raíz. Esto permite la verificación de hipótesis y poder poner en marcha soluciones prácticas.

Diagrama de causa-efecto

Esta herramienta gráfica fue propuesta por Kaoru Ishikawa en 1943. Se basa en primer lugar, en la elaboración de una lluvia de ideas. Luego, se relacionan todas las posibles causas y sub causas de un efecto. El también conocido como “Diagrama de Pescado” permite la detección de factores para problemas específicos. De este modo se puede detectar las áreas que necesitan mejoras con urgencias y plantear las medidas efectivas. Este diagrama, incentiva el trabajo en equipo y sugiere que se comparta conocimientos de distintas áreas en una empresa. Finalmente, además de utilizarse en la fase de análisis para elegir el proceso a profundizar; también se suele utilizar en la etapa de mejora para la evaluación de las distintas fallas que se presentan en un proceso. En la **Figura 5** se

muestra la representación de lo descrito. Aquí se trata de encontrar las causas y sub causas generales de insatisfacción del cliente en una empresa.

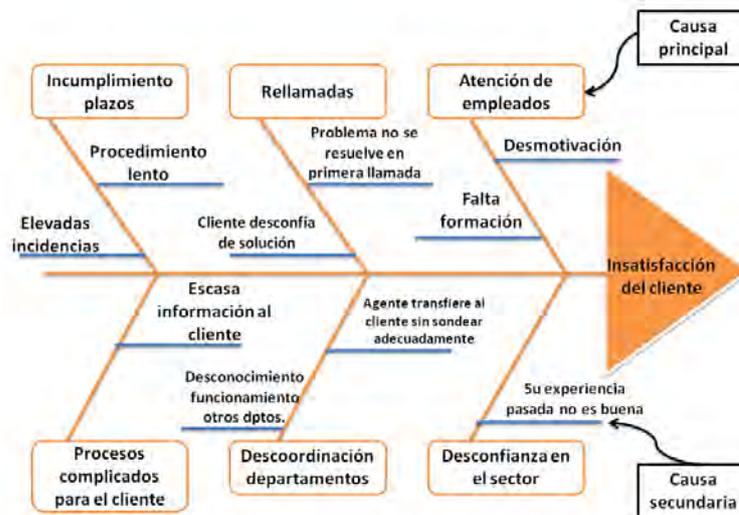


Figura 5: Diagrama de Ishikawa sobre las causas de la insatisfacción del cliente. Fuente: Constanza et al. (2021)

Diagrama de Pareto

La elaboración de este diagrama se basa en ordenar un gráfico de barras de manera descendiente en función a la frecuencia absoluta y relativa de los ítems analizados. De esta forma, se puede identificar las causas básicas de un problema o los defectos presentados en los procesos. Esta herramienta estadística propuesta por el economista italiano Vilfredo Pareto en el siglo XX se rige en base a la regla de 80 y 20. Esta explica que el 80% de los problemas provienen del 20% de las causas (Del Moral y Rodríguez, s.f.). En otras palabras, existen pocos vitales en los que se debe centrar la mejora para reducir la mayor parte de defectos encontrados. Como ejemplificación de lo anterior, se muestra la **Figura 6** que distingue las telas que son susceptibles a más defectos en una empresa textil. Nótese que la ojiva representa gráficamente la frecuencia acumulada.

Durante el **periodo de mejora**, se aplican herramientas iterativas que permitan probar posibles soluciones. Una vez hallada la solución más óptima esta se debe estandarizar. Las herramientas aquí descritas se deben complementar con las metodologías Six Sigma para aumentar su probabilidad de éxito en las distintas industrias.

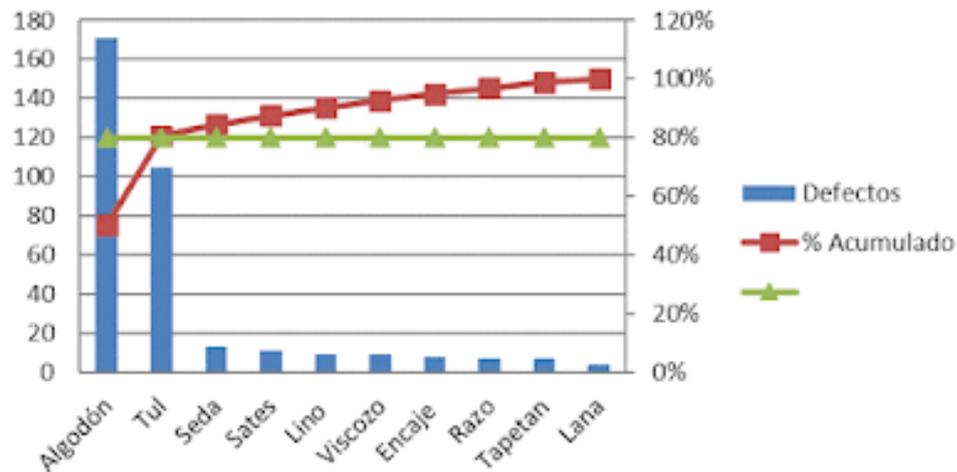


Figura 6: Diagrama de Pareto de una empresa textil. Fuente. Página web de Portafolio (2017)

Metodología Kaisen

La siguiente forma de trabajo tiene que ver con realizar, por su traducción del japonés, un cambio para bien. Esto quiere decir que, de manera factible, se deben incorporar mejoras rápidas que no signifiquen la inversión de notables cantidades económicas. Entonces, se debe priorizar la creatividad y el capital intelectual del personal de trabajo. Para aplicar Kaisen en un problema con la calidad de un producto o proceso se debe tener en cuenta las 4 etapas del Círculo de Deming (IONOS, 2019).

- a) Planificar.- analizar la situación actual y organizar los recursos para la elaboración de una solución. Del mismo modo, se debe tener claro los objetivos a cumplir y el equipo de trabajo que se involucrará.
- b) Hacer.- implementar medidas concretas para lograr objetivos generales y parciales del plan. Este proceso debe ser cuestionado de manera que se pueda obtener experiencia necesaria hasta encontrar una solución definitiva.
- c) Verificar. - revisar si es las acciones tomadas a nivel de escala tuvieron influencia en lograr los objetivos trazados. Este proceso debe encontrar fallas y debe depurar la manera en que se está afrontando la problemática.

- d) Actuar. - reajustar las medidas implementadas para aplicarlas a escala real. Se puede afirmar que este proceso incluye la estandarización de la medida adoptada. Asimismo, se deben establecer los mecanismos de control adecuados.

A diferencia de los ciclos DMAIC y DMADV, en las 4 etapas de Deming se establece una implementación de las posibles soluciones a una escala menor que luego son aplicadas en su totalidad. En cuanto a la primera etapa del ciclo de mejora continua, se observa que DMADV/IC tiene mayor detalle en cómo se estudia y se toma una decisión de cuáles métodos de mejora son los más adecuados para obtener la calidad deseada, esto se logra en las etapas de Definir, Medir y Analizar, mientras que el ciclo Deming se enfoca en encontrar las medidas adecuadas mediante una simulación de tipo ensayo-error en donde se van a encontrar fallas al cuestionar y observar de manera crítica el desarrollo de la aplicación de estas medidas en una escala menor.

Metodología de las 5S'

Es una técnica de origen oriental que se basa en lograr estabilidad operativa que permita introducir mejoras. Para esto toma como pauta 5 palabras japonesas que hacen referencia a los siguientes fundamentos.

- a) Seiri (Seleccionar).- eliminar agentes innecesarios para llevar a cabo un determinado trabajo.
- b) Seiton (Ordenar).- clasificar los elementos en función a su frecuencia de uso, de tal manera que se agilice su disposición.
- c) Seiso (Limpiar).- evitar la suciedad y sus fuentes en el área de trabajo. Solo así, se podrán simplificar los mecanismos de limpieza para ahorrar tiempo.
- d) Seiketsu (Estandarizar).- dividir procesos en pequeñas tareas que puedan realizarse de manera consistente para minimizar plazos y disminuir errores.
- e) Shitzuke (Sostener).- mantener y hacer costumbre los 4 principios anteriormente mencionados. Del mismo modo, se deben monitorear y evaluar las medidas implementadas para garantizar el funcionamiento de las 5S'.

En **la etapa de control** se debe procurar establecer instrumentos que permitan hacer seguimiento de las soluciones implementadas para corregir problemas y garantizar un desempeño óptimo. Uno de los más populares es la Carta de Control.

Carta de Control

Es un gráfico que en el eje de las abscisas muestra el tiempo o el número muestreado; mientras que en el eje de ordenadas señala una característica cuantificable. Esta herramienta posee una línea central y dos límites de control. Por tanto, si los valores medidos se encuentran dentro de los límites establecidos, se puede asegurar que el proceso está bajo control estadístico. En adición en estas gráficas permiten detectar las causas especiales y comunes explicadas en el capítulo 1. Si se encuentran medidas por encima de los límites de control probablemente se trate de las primeras descritas. A continuación, en la **Figura 7** se denota la fracción defectuosa de unidades en un lote de productos. Se advierte los límites superior inferior, así como también el promedio de los datos. En adición se puede notar que el número de muestra 12 escapa del límite superior; por lo que el proceso no se encuentra sobre control estadístico.

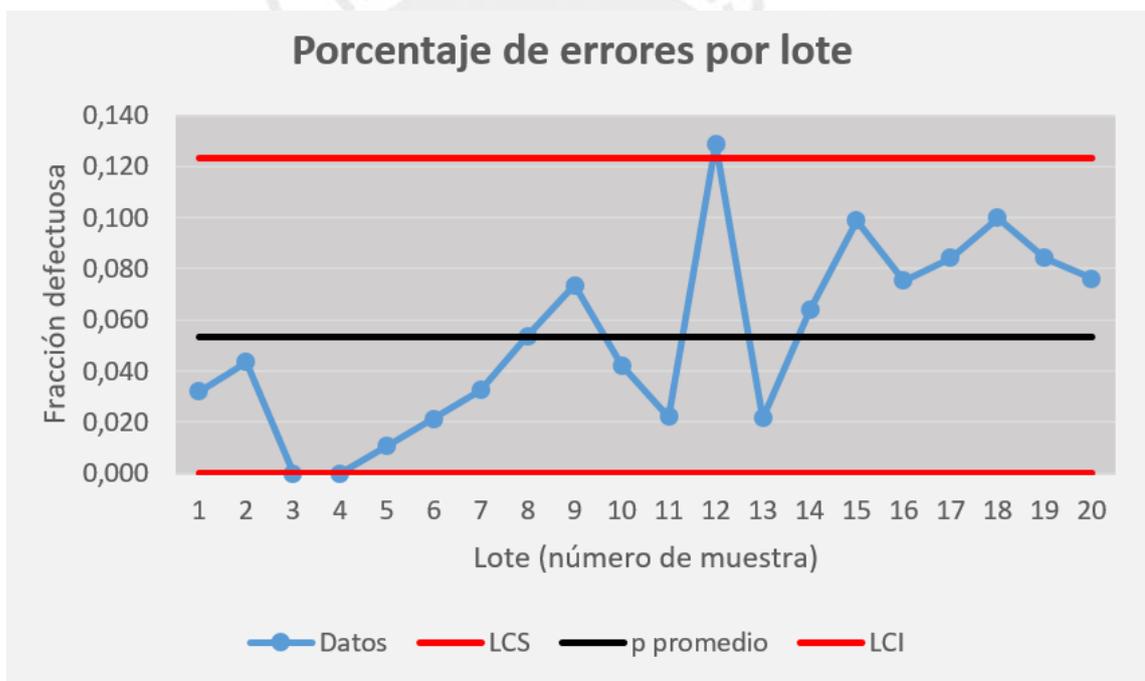


Figura 7: Carta de Control para porcentaje de errores por lote. Fuente. Página web de Ingenioempresa

3. Revisión de literatura – La variabilidad en los proyectos de construcción

3.1. Variabilidad en la construcción

En la construcción, la producción esperada es considerada como fija al ser el proyecto a entregar en sí, por lo tanto, la variabilidad de esta va a ir de la mano con la mayor utilización de recursos de construcción que son: La mano de obra, los materiales y la maquinaria. Según Hernández y Oliveres (2018). Las estimaciones de variabilidad suelen tratarse como un valor determinístico basado en la experiencia y con frecuencia suelen calcularse como un porcentaje adicional sobre los presupuestos. En la práctica se añade un 10% de contingencia al costo estimado del proyecto. Este valor se ve respaldado en que estudios de la misma fuente presentan resultados en donde 60% de los proyectos entran en este rango de 10% de variación.

La variabilidad genera retrasos y costos más altos, produce inestabilidad en los objetivos iniciales del proyecto lo cual resulta en incertidumbre, que, por consecuencia, trae pérdidas al generar actividades que no aportan valor. Es por esto que, en la actualidad, para reducir estas variaciones, se aplican técnicas para reducir lo más posible la variabilidad en proyectos de construcción. Entre estas se encuentran:

-Simulaciones del proyecto para construir distribuciones de probabilidad de duraciones de un proyecto. Se aplica la simulación de Monte Carlo, herramienta estadística que hace uso de información histórica y las variables aleatorias para determinar la probabilidad de ocurrencia de algún suceso, sea este un escenario deseable o no deseable, con el fin de tomar acciones sobre las variables que puede controlar (Salazar, E y Alzate, W., 2015).

-Técnicas de planificación en conjunto con Inventarios de Trabajos Ejecutables para preparar actividades a realizar posteriormente. Last Planner es una técnica de control de procesos que reduce la variabilidad de estos, no obstante, al ser solo técnica de control no es predictiva a diferencia de la anterior técnica mencionada. (Salazar, E y Alzate, W., 2015).

-Buffers para independizar procesos, reduciendo el impacto de la variabilidad en la producción. Entre los tipos de buffers encontramos las contingencias (De tiempo y presupuesto), inventarios (Stock de elementos) y tiempos (Colas y pausas en producción).

3.2. Aplicación del Six Sigma a la construcción

En la actualidad, el sector construcción tiene un rol importante en la economía de los países tanto para el desarrollo empresarial como para la promoción de empleo (Siddiqui et al., 2016). Es por este motivo que es necesario su perfeccionamiento en aras de una optimización de costos, que generen cada vez más ganancias y beneficios varios para los implicados. Todo esto considerando medidas correctivas que satisfagan las necesidades del cliente y los estándares existentes de calidad. Especialmente para los países en vía de desarrollo, donde Siddiqui (2016) afirma que la baja calidad en la construcción es alarmante. Esto producto de la construcción informal y la ausencia de empresas serias.

Como se vio en el anterior acápite, los procesos constructivos son variables. No solo esto, sino que abarcan complejos niveles de estructuración, requieren de un flujo constante y comprende altos estándares de calidad (Tchidi et al., 2012). Entonces, no hay punto de comparación con industrias como la manufactura, donde los procesos son más repetitivos y los defectos son prácticamente inadmisibles. Para el sector de la construcción, no es imprescindible que los procesos lleguen a comportarse con un nivel de 6 sigmas (Linderman et al., 2003). No en tanto, se debe buscar una mejora significativa en la variabilidad que se traduzca en una reducción de costos.

Un factor importante al momento de aplicar métricas estadísticas es la medición del trabajo. Puesto que mientras se ejecuta una obra, es complicado coleccionar data en tiempo real de la productividad de los trabajos en campo. Por lo general, cuando hay oportunidad de recolectar estos registros, se hace de manera manual; y por esto, existe alta probabilidad de error. Además, muy pocas empresas en el país cuentan con sistemas que permitan llevar esta recolección de data históricamente. De todas formas, la estrategia Six Sigma debe tratar de integrarse con métodos ya establecidos en el ámbito de construcción como el Principio Lean, el concepto de Just In time, o inclusive, el sistema de Last Planner. Donde si bien, estos últimos presentan un sustento sólido para su aplicación, hay poca investigación acerca de su correlación con la tasa de defectos (Sullivan, 2011). Además de que, se presentan pocas formas cuantitativas que permitan aseverar que existen una mejora de desempeño. No obstante, la aplicación de estos métodos convencionales en la construcción suele incurrir en el descubrimiento de numerosos problemas con los procesos implicados y la producción. Es aquí donde el

rol del Six Sigma debe aplicarse para priorizar las iniciativas en las mejoras a implementar; ya que el tiempo y el presupuesto suelen ser limitados.

Otro factor importante lo conforman las metodologías aplicables. Si bien muchos procesos contemplan demasiada variabilidad que requieren ser rediseñados completamente. En el sector construcción es más factible introducir mejoras con la metodología DMAIC que se complementa con el enfoque de Lean Construcción y se centra en la reducción de pérdidas. De aplicarse esta combinación, se puede incentivar la solución de problemas de calidad en tiempo real, así como también la posibilidad de eliminar procesos defectuosos desde antes de su realización. Es así que, dentro de los muchos aspectos de la construcción, el Six Sigma puede contribuir a reducir el consumo de energía, todo tipo de contaminación, los desperdicios e incluso el re trabajo durante todo el ciclo de vida de un proyecto (Siddiqui et al., 2016).

3.3 Antecedentes de la aplicación de Six Sigma en la construcción

Si bien en el Perú existen pocos ejemplos de la aplicación del Six Sigma en el ámbito de la construcción, en la última década se han desarrollado diversos casos de estudio con respecto a este tópico. Mayormente, estos se han llevado a cabo en Estados Unidos y en algunos pocos países en vías de desarrollo. A fin de conocer los procesos de su implementación, además de sus logros, se describen los más resaltantes a continuación.

En el año 2006, Beary y Abdelhamid presentaron un artículo relacionado con la adaptación de métricas Six Sigma a procesos de producción, tomando como referencia dos proyectos de construcción de edificios ejecutándose en tiempo real. Para la recolección de datos se realizaron visitas diarias para conocer la respectiva planificación de actividades a largo y corto plazo. Para esta última, se llevó un registro parcial para conocer si cada actividad planificada en el día había sido realizada, parcialmente realizada o no realizada. Asimismo, se registró la razón por la cual una actividad no había sido ejecutada de manera completa. De esta manera, se pudo conocer el número de tareas planeadas y tareas completadas, lo que permitió el cálculo del Porcentaje de Plan Completado (PPC). A continuación, se muestra un ejemplo del registro mencionado en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Ejemplo de toma de datos para PPC.

	26-Apr	27-Apr	28-Apr	29-Apr	30-Apr	Weekly PPC	rolled PPC
Tasks Planned	2	3	3	3	3		
Tasks Completed	1	2	2	2	2		
PPC (%)	50	66.66	66.66	66.66	66.66	64	10

Nota. Extraído de Beary y Abdelhamid, 2006.

Como se observa en el cuadro, cada día se tiene un valor del PPC. Consecuentemente, se puede obtener el valor del ponderado simple semanal y el valor del Rolled PPC, que resulta de la multiplicación consecutiva del PPC. Este último permite hacer un análisis de productividad detallado que considera el re trabajo. Un factor importante es que el valor de PPC acumulado es mucho menor que el PPC diario. A partir de estos valores se pueden obtener los sendos niveles sigma. Evidentemente el nivel sigma para el PPC acumulado es menor y más preciso pues considera el trabajo extra que se realiza para compensar el trabajo incompleto de días previos. La ventaja del cálculo de los niveles sigma es que son normalizados y pueden ser comparados.

En adición, a partir del PPC se puede hallar el Porcentaje de Plan Incompleto (PPIC) y este se puede graficar en un cuadro de control con límites superiores e inferiores (ULC y LCL). Para este caso en particular, el límite inferior es cero, pues no se desea tener tareas incompletas. Es así que, el gráfico en mención permitió detectar causas especiales (valores en el cuadro de control que exceden el límite superior) para poder ser eliminadas en el futuro. El mencionado estudio determinó que la principal causa especial fue un proceso de inspección defectuoso que interrumpió el flujo de actividades. Por lo que, el caso de estudio sirvió para que las empresas constructoras tomen acciones correctivas y propuestas de mejora a largo plazo.

En el año 2012, Oguz, Kim, Hutchison y Han, profundizaron en la aplicación en conjunto de técnicas Six Sigma y de Lean Construction, de ahora en adelante “Lean Six Sigma”, para la producción de paneles de concreto. Según lo expuesto anteriormente, esta combinación de herramientas es usada en los proyectos con el fin de eliminar la variabilidad de procesos y crear flujos de trabajo en los mismos (Kim et. al, 2016) debido a su funcionamiento sinérgico y complemento, pues Lean Construction no

analiza procesos bajo un control estadístico y Six Sigma no mejora la rapidez de procesos ni reduce el capital invertido. Es así que Lean Six Sigma se aplica a 405 viviendas correspondientes al desarrollo de la segunda fase de la ciudad industrial de Jubail en Arabia Saudita a fin de evitar los adicionales de obra y escasez de vivienda con el análisis para posterior mejora de los bajos índices de efectividad en la producción y entrega de los paneles prefabricados al sitio de construcción, establecer los motivos de demora y abordar las ineficiencias en planta para proponer medidas correctivas, entre otras.

La métrica principal fue el número de paneles aislados enviados al sitio de construcción, donde se tenía una producción de 18 paneles por día y se buscaba que fueran 75 a fin de recuperar el tiempo de retraso al momento. Se realizó un mapeo de flujo de valor (Value Stream Mapping (VSM)) a fin de determinar las entradas a los procesos, gráficos de control y una simulación de producción. A continuación, se realizaron las siguientes acciones para la mejora de la productividad: mejora de liderazgo y supervisión, optimización de flujo de procesos al incrementar la utilización de recursos, eliminación de desperdicio a través de la gestión del inventario y trabajo en los estándares de documentación y mejora de la logística.

Por medio de la identificación de problemas en el VSM y el abarcamiento de los puntos críticos, se logró la meta de producción planteada de 75 paneles por día y se eliminó el retraso que existía a la fecha. **Se realizó un gráfico de control estadístico que muestra el número de paneles entregados por días versus el tiempo para el mes de Julio y refleja la mejora en la productividad lograda por el estudio en mención según los parámetros iniciales y objetivo (ver Figura 8).**

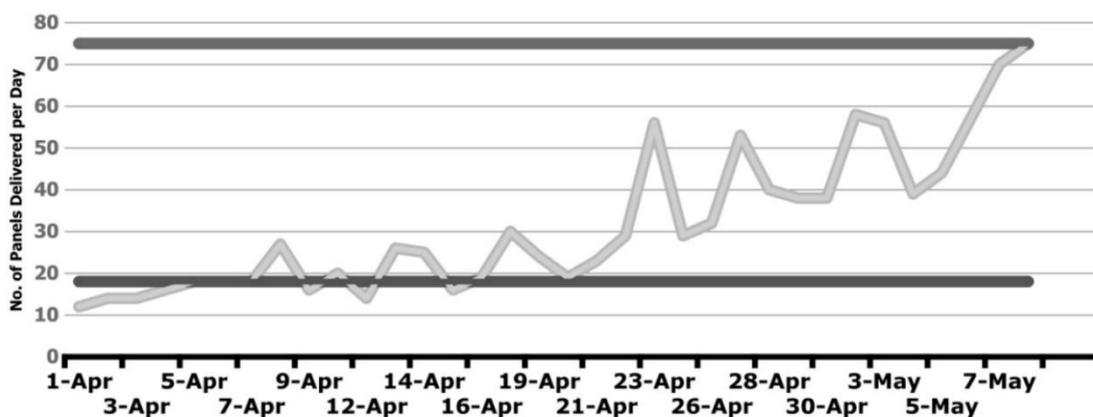


Figura 8: Gráfico de control estadístico de la productividad observada en el mes de Julio. Fuente: Kim et. al

En el año 2017, Karakhan publicó un artículo donde propone el uso de la metodología DMAIC para la disminución de la tasa de accidentes en obras de construcción civil. Para la fase de definición se propone seleccionar un equipo de investigación conformado desde ingenieros especialistas en seguridad y salud ocupacional hasta obreros para que mediante uso de herramientas como el diagrama SIPOC se determinen las responsabilidades de los involucrados en un accidente. Luego, en la fase de medición se debe registrar la frecuencia y severidad de accidentes mediante índices estandarizados. Cabe resaltar que el riesgo de seguridad es el producto de la frecuencia, severidad y exposición. Asimismo, para la fase de recolección de la data se sugiere uso de entrevistas con trabajadores afectados y lectura de chek lists de seguridad. Después, para la fase de analizar se deben determinar las causas raíces definitivas mediante el uso de herramientas como el Diagrama de Pareto o Diagrama de Causa y Efecto. De igual modo, esto se puede complementar mediante la revisión de reportes previos de investigación sobre accidentes y hojas de análisis seguro de trabajo. En adición, para la fase de mejora se exhorta a tomar medidas idóneas preventivas y correctivas. Finalmente, es menester formar círculos de seguridad, que no son más que reuniones periódicas entre el equipo de trabajo mencionado al comienzo para evaluar las medidas implementadas.

En el año 2018, Hernández y Oliveres identificaron a los vaciados de concreto como partidas críticas para la materialización de proyectos constructivos en lo que respecta a programas de obra y presupuestos, por lo que se consideró útil elaborar un estudio de la productividad de mano de obra en las partidas de vaciado de concreto para vigas y losas de un edificio residencial en Santiago, Chile. Es así que se realizaron mediciones desde el inicio de la descarga del primer camión mezclador hasta el enrasado realizado por la cuadrilla de vaciado, con lo que se obtuvieron datos de 44 camiones de concreto que contenían 7.3 m³ c/u en promedio y se registró el porcentaje de trabajos productivos, contributorios y no contributorios que fueron analizados bajo el Test de Normalidad de Anderson-Darling y se concluyó que los datos procedían de una distribución normal, condición que permitió el análisis de productividades con las herramientas de control estadístico derivadas de Six Sigma.

Para empezar, se elaboraron un Diagrama de Control de Medias y Diagrama de Control de Rangos para realizar un seguimiento a los cambios en los valores medios de la

productividad de la cuadrilla de vaciado y los cambios en la variabilidad de dicha productividad, respectivamente. De igual manera, se establecieron límites de control superiores e inferiores para cada gráfica y se consideró la determinación de la Capacidad del proceso por el lado inferior (CPL) dentro de las herramientas estadísticas de Six Sigma para el análisis, pues se prefirió a las mayores productividades que no presentaban inconvenientes adicionales a la variabilidad por el lado superior. A partir de esto, se concluyó que las mediciones de productividad de la cuadrilla responden a la variabilidad natural del proceso y se pueden identificar puntos críticos como el cumplimiento del proveedor de concreto o planeamiento previo y que la aplicación de las herramientas de Six Sigma permite el adecuado monitoreo del desempeño de los procesos internos y externos debido a que “no se puede mejorar aquello que no se puede medir” (Hernández y Oliveres, 2018).

4. Aplicación del Six Sigma en la construcción de edificaciones

4.1 Aplicación de Six Sigma para el análisis del Porcentaje de Plan Cumplido

Con el fin de detectar las principales causas de la variación, se procedió a solicitar la data del PPC de la construcción de un edificio residencial ubicado en el distrito de Jesús María, en la ciudad de Lima. Esta información de la obra, y las demás que se traten en este capítulo y posteriores fue proporcionada por la empresa Motiva S.A. Se debe tener en consideración que la magnitud del proyecto abarca 15 pisos y 3 sótanos, los cuales albergan 79 departamentos y 70 estacionamientos. En general la estructura se considera aporticada, con presencia de muros de albañilería armada, además de zapatas conectadas y muros anclados en los cimientos.

En este sentido, se recopilaron para 46 semanas de trabajo entre el año 2020 y 2021 el número de partidas planificadas, el Porcentaje de Plan Cumplido (PPC) y el PPC acumulado. Se debe precisar que las semanas laborales en nuestro contexto constan de 6 días, donde de lunes a viernes la jornada consta de 8.5 horas; mientras que, los sábados esta se reduce a 5.5 horas.

En el acápite de anexos se adjuntan los datos completos para su revisión (**ver anexo A**). A manera de ilustrar el registro de los datos de entrada, se inserta la **Tabla 6** extraída de la base de datos.

De manera congruente se puede observar que a medida que avanza el desarrollo de la obra se van planificando más procesos constructivos y partidas, para que finalmente el número vuelva a disminuir hacia el final de la construcción.

Asimismo, se puede denotar que el PPC es calculado con la Fórmula 1.

$$PPC = \frac{\text{Número de partidas completadas}}{\text{Número de partidas planificadas}} \dots (1)$$

Para fines de hallar el PPC acumulado simplemente se toman en cuenta el total de las actividades programadas y completadas hasta la fecha en la que se desee calcular esta variable. De este modo, para la semana 12 del año 2021 se tienen los siguientes cálculos:

$$PPC = \frac{23}{24} = 96\%$$

$$PPC \text{ acumulado} = \frac{234}{271} = 86$$

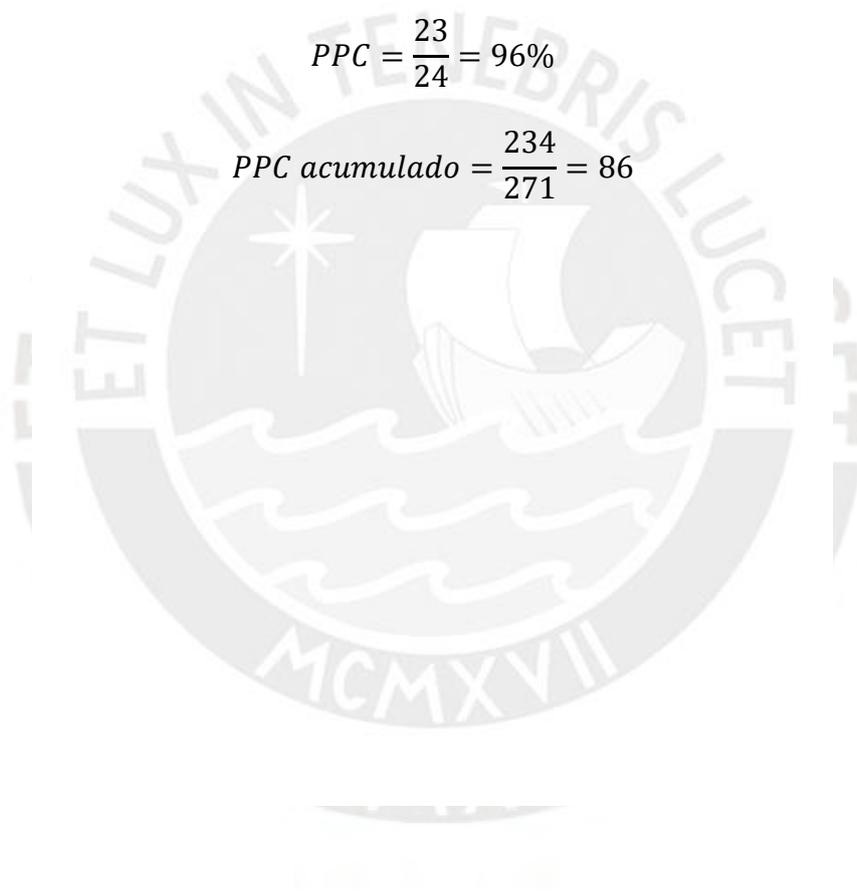


Tabla 6. Toma de datos para el PPC en un edificio residencial

Semana	Partidas planificadas	#Partidas planificadas acumulado	#Partidas completadas	#Partidas completadas acumulado	PPC (%)	PPC acumulado (%)
Semana 17 del 2021	20	399	16	346	80%	87%
Semana 16 del 2021	22	379	20	330	91%	87%
Semana 15 del 2021	37	357	31	310	84%	87%
Semana 14 del 2021	24	320	24	279	100%	87%
Semana 13 del 2021	25	296	21	255	84%	86%
Semana 12 del 2021	24	271	23	234	96%	86%
Semana 11 del 2021	22	247	20	211	91%	85%
Semana 10 del 2021	24	225	19	191	79%	85%

Nota. Elaboración Propia.

En base a estos valores, se debe efectuar un tratamiento estadístico para encontrar las causas especiales de la variabilidad.

En primer lugar, se debe calcular el valor del Rolled PPC por semana, el cual indica el Porcentaje de Plan Completado considerando el re trabajo realizado por las cuadrillas. Este valor se determina mediante la multiplicación del PPC diario. Debido a que el PPC recolectado es semanal, este se asume como el promedio de toda la semana de trabajo. Esto quiere decir, que para encontrar el Rolled PPC se elevó el PPC promedio de la semana al número de días de trabajo, que serían 6 para este caso en específico (**ver Fórmula 2**). Continuando el ejemplo para la semana 12, el Rolled PPC obtuvo un valor de 78.28%

$$\text{Rolled PPC} = \text{PPC semanal}^6 \dots (2)$$

$$\text{Rolled PPC} = 0.96^6 = 78.28\%$$

Después, para poder realizar una gráfica normalizada se dividió el PPC entre el Rolled PPC (Cociente). Para que este resultado sea menor que 1, se debe multiplicar por el factor de 10 en el denominador (**ver Fórmula 3**). De esta forma se podrá analizar este cociente por semana, teniendo en cuenta que mientras mayor sea el resultado, existió mayor dificultad para realizar las actividades planificadas. Siguiendo el mismo ejemplo:

$$\text{Cociente} = \frac{\text{PPC}}{\text{Rolled PPC} * 10} \dots (3)$$

$$\frac{\text{PPC}}{\text{Rolled PPC}} = \frac{96\%}{78.28\% * 10} = 0.123$$

Los datos para todas las semanas, cuya ejemplificación se muestra en la **Tabla 7** se pueden trasladar a la **Figura 9** que muestre el tiempo en el eje de abscisas y el cociente antes referido en el eje de ordenadas para un análisis visual.

Tabla 7. Cálculo del Rolled PPC

Semana	Partidas planificadas	#Partidas completadas	PPC (%)	Rolled PPC (%)	Cociente
Semana 17 del 2021	20	16	80%	26.21%	0.305
Semana 16 del 2021	22	20	91%	56.79%	0.160
Semana 15 del 2021	37	31	84%	35.13%	0.239
Semana 14 del 2021	24	24	100%	100%	0.100
Semana 13 del 2021	25	21	84%	35.13%	0.239
Semana 12 del 2021	24	23	96%	78.28%	0.123
Semana 11 del 2021	22	20	91%	56.79%	0.160
Semana 10 del 2021	24	19	79%	24.31%	0.325

Nota. Elaboración Propia.

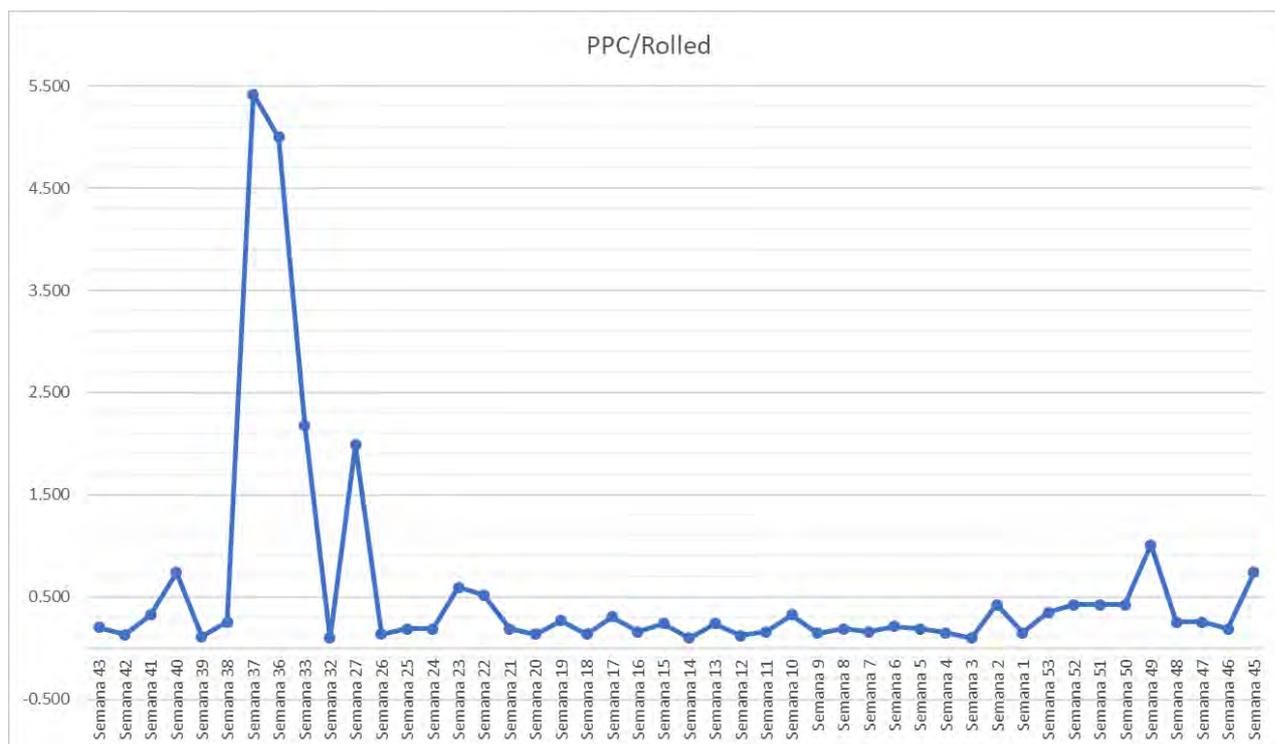


Figura 9. PPC/Rolled PPC en el tiempo. Fuente. Elaboración propia

Para la interpretación de la **Figura 9** se debe tener en cuenta que como el Rolled PPC siempre es mayor que es el PPC, se esperan resultados menores a la unidad. Además, para las semanas en que se tiene un Rolled PPC = 0 (Un día de la semana no se realizó trabajo planificado alguno), el índice o cociente llega a infinito, que por un tema de escala en el gráfico se coloca con el valor de 5.

Entonces, se puede extraer que los valores más grandes del cociente se dieron cuando se obtuvo un Rolled PPC elevado de la semana de análisis, por tanto, las causas que originaron los mencionados atrasos son de principal interés; puesto que generaron altas variaciones. Estas situaciones se dieron en las semanas 49 del año 2020; y semana 27, semana 33, semana 36 y semana 37 del año 2021.

Por otra parte, para poder graficar el cuadro de control se estableció como variable principal el Porcentaje de Tareas no Cumplidas (PPIC), Cuya manera de calcular se describe en la **Fórmula 4**:

$$PPIC = \frac{\text{Número de partidas no completadas}}{\text{Número de partidas planificadas}} \dots (4)$$

Asimismo, en base a la desviación estándar de este parámetro (Std_dev , ver **Fórmula 5**), quedaron definidos el Límite Superior de Control (UCL, ver **Fórmula 6**), el Límite Promedio de Control (CL, ver **Fórmula 7**) y el límite inferior de control (LCL, ver **Fórmula 8**).

$$Std_{dev} = \sqrt{\frac{PPI * (1 - PPIavg)}{\text{Número de partidas planificadas}}} \dots (5)$$

$$UCL = PPIC + Std_{dev} \dots (6)$$

$$CL = PPICavg \dots (7)$$

$$LCL = PPIC - Std_{dev} \dots (8)$$

De esta manera, se podrá obtener estos 4 parámetros para cada semana debido a que el número de partidas planificadas por cada semana fue diferente. En adición, a razón de que para la semana 12 del 2021 no se incumplió ninguna tarea, se muestra el cálculo para la semana 13 del 2021, donde se incumplieron 4 de las 25 tareas programadas.

$$PPICavg = \frac{4}{25} = 0.16$$

$$Std_{dev} = \sqrt{\frac{0.16 * (1 - 0.16)}{25}} = 0.073$$

$$UCL = 0.16 + 0.073 = 0.233$$

$$LCL = 0.16 - 0.073 = 0.087$$

Para el cálculo de CL se considera la cantidad total de partidas incumplidas y la cantidad acumulada de partidas planificadas.

$$PPICavg = CL = \frac{231}{1273} = 0.18$$

A continuación, se presenta la **Tabla 8** donde se han registrado los valores descritos con anterioridad.

Tabla 8. Cálculo de Límites e índices semanales

Semana	Partidas planificadas	PPC (%)	#Partidas no completadas	PPIC	Std_dev	UCL
Semana 17 del 2021	20	80%	4	0.200	0.089	0.289
Semana 16 del 2021	22	91%	1	0.045	0.044	0.090
Semana 15 del 2021	37	84%	5	0.135	0.056	0.191
Semana 14 del 2021	24	100%	0	0.000	0.000	0.000
Semana 13 del 2021	25	84%	4	0.160	0.073	0.233
Semana 12 del 2021	24	96%	0	0.000	0.000	0.000
Semana 11 del 2021	22	91%	1	0.045	0.044	0.090
Semana 10 del 2021	24	79%	5	0.208	0.083	0.291

Nota. Elaboración Propia.

Como es evidente, se puede notar que mientras mayor sea el número de PPC, el PPIC disminuye. Asimismo, basta que el número de partidas no completadas sea 0 para que los valores calculados con la **Fórmula 5**, **Fórmula 6** y **Fórmula 8** carezcan de valor y análisis interpretativo.

De esta manera se puede graficar el cuadro de control para la variable PPIC en las ordenadas y el tiempo en el eje de abscisas (**ver Figura 10**). Si bien el LCL es calculable, es conveniente tomar esta variable con un valor de 0, pues es deseable en cualquier proyecto de construcción que no haya tareas no cumplidas. Asimismo, se desprende de la gráfica que todos los valores que excedan el UCL están incurriendo en causas especiales de variación. Las cuales deben ser las primeras en ser erradicadas en la cadena de jerarquización.

Las causas especiales se dieron en la semana 36, semana 37, semana 40, semana 41, semana 43 del año 2021.

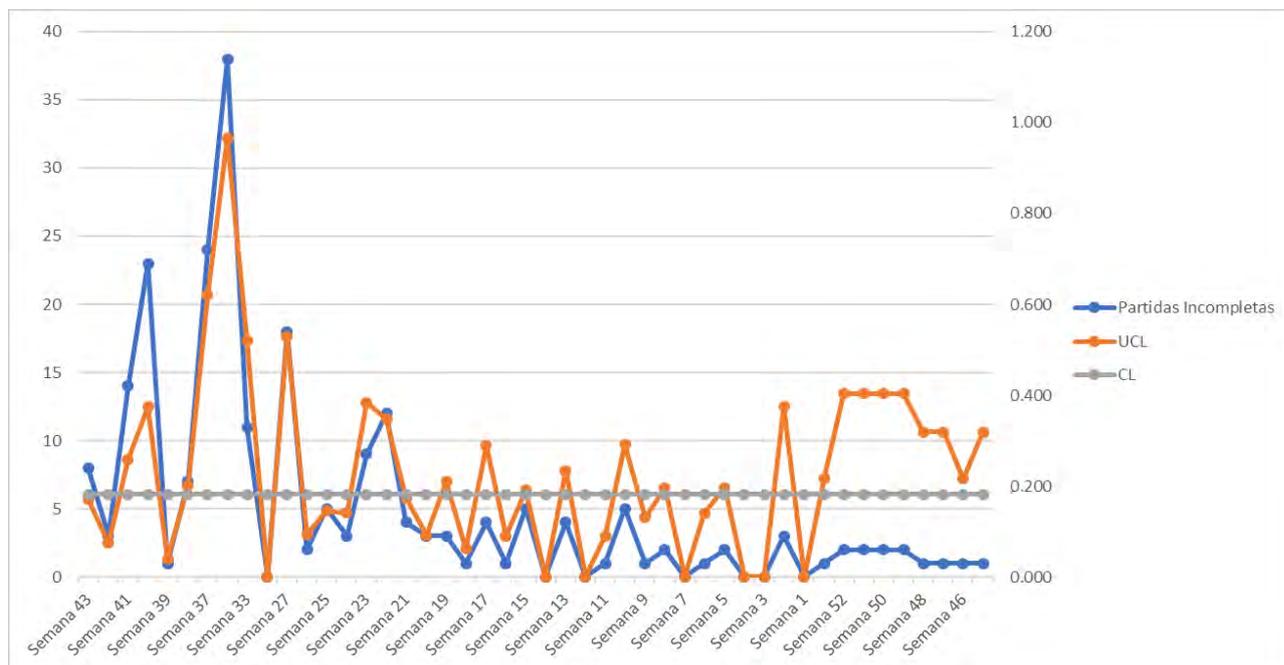


Figura 10. Cuadro de control de PPIC. Fuente. Elaboración propia

Finalmente, también se puede calcular el nivel sigma de los datos analizados tomando como referencia el Rolled PPC.

Para este fin, se calculó el Rolled PPC de todos los datos proporcionados multiplicando los valores registrados de PPC para cada semana y se procedió a normalizar este valor (PPC norm) con la **Fórmula 9**.

$$PPC \text{ norm} = \sqrt[j]{\text{Rolled PPC}} \dots (9)$$

Donde la letra j representa las unidades de tiempo en el cual los datos fueron registrados, para este fin el valor de j estaría asociado con las 46 semanas de las que se obtuvo el Rolled PPC. De esta forma:

$$PPC \text{ norm} = \sqrt[46]{0.00059\%} = 0.7698$$

Luego se debe encontrar el valor de la variable que representa las asignaciones perdidas por plan que por sus siglas en inglés se representa como MAPP. La relación de esta con el PPC norm se denota en la **Fórmula 10**.

$$MAPP \text{ norm} = -\ln(PPC \text{ norm}) \dots (10)$$

De esta manera

$$MAPP \text{ norm} = -\ln(0.7698) = 0.2616$$

Por último, se debe correlacionar el valor de MAPP norm con su valor normal estándar utilizando la función de Excel DISTR.NORM.ESTAND.INV y calcular el nivel sigma correspondiente del proceso medido con la **Fórmula 11**.

$$\text{Nivel Sigma} = Z_{MAPP \text{ norm}} + 1.5 \dots (11)$$

Se asume la descentralización del proceso como 1.5 según lo descrito en el marco teórico de la presente investigación. De esta forma:

$$\text{Nivel Sigma} = -0.6384 + 1.5 = 0.81$$

Entonces se determina que el nivel sigma para el PPC es de 0.81, valor muy cercano al nivel de 1 sigma.

Otra manera de aplicar la metodología Six Sigma es analizando solo los datos de los PPC semanales. En este contexto, Cuervo y Sampayo (2017) establecen cierta relación entre el nivel del PPC y el retraso en obra (**ver Tabla 9**).

Tabla 9. Clasificación del PPC y relación de este con los retrasos en obra

Clasificación	PPC	Retraso semanal	Retraso mensual
Sobresaliente	100% -80% 79.99	Máximo 0.7 días	0-3 días
Aceptable	%- 70%	Máximo 2.1 días	3.01-9 días
Deficiente	69.99 %- 0%	Más que 2.1 días	Más que 9 días

Nota. Adaptado de Cuervo y Sampayo (2017).

De la **Tabla 9** se desprende que existe una relación directa entre el PPC y los retrasos en obra. Asimismo, para un mínimo nivel aceptable del PPC se requiere que este tome un valor de 70%, de esta manera se puede garantizar un retraso que no interfiera de manera significativa con el avance de la obra.

En la Figura 11, se muestran los PPC semanales a lo largo de la secuencia de la obra y se establece, por lo tanto, un Límite Inferior de 70%, para encontrar causas de la variabilidad atípicas a las inherentes del mismo proceso.

Se puede notar el PPC promedio que tiene un valor de 81%, el cual representa que el nivel de cumplimiento de la obra es aceptable. No obstante, se observan 6 puntos en la gráfica los cuales sobrepasan el Límite Inferior. Es así que según la **Figura 11**, las causas especiales de variación se ocasionan en la semana 49 del 2020; y la semana 27, semana 33, semana 36, semana 37 y semana 40 del año 2021.

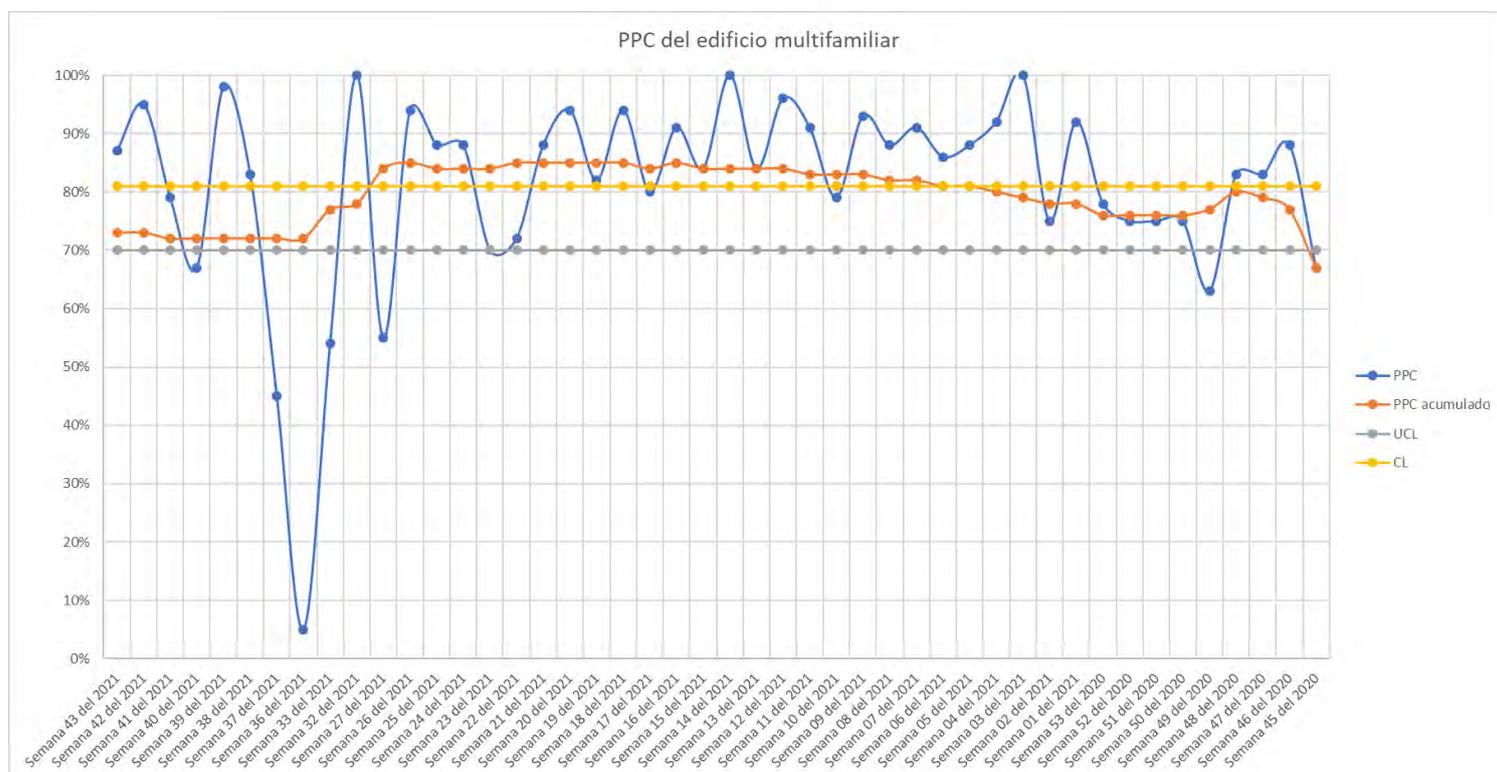


Figura 11. PPC a lo largo de la secuencia de obra. Fuente. Elaboración propia

Cabe destacar que los 6 puntos encontrados, bajo el análisis neto del PPC están contenidos, en los dos previos análisis efectuados para el diagnóstico de las semanas donde ocurren altas variabilidades.

Finalmente, también se puede calcular el nivel sigma para los datos proporcionados, tomando en cuenta solo el límite inferior con la **Fórmula 12**, que se describe en el marco teórico. Debe considerarse que la desviación estándar para los datos proporcionados es de 0.169 %.

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \text{ y } Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma} \dots (12)$$

$$Z_i = \frac{0.81 - 0.70}{0.169} = 0.65$$

Debido a la asunción de la distribución normal de los datos recolectados y el movimiento del proceso de 1.5 el nivel sigma del PPC sería igual a 2.15, el cual es un valor muy cercano a 2.

4.2 Aplicación de Six Sigma en la partida Concreto pre mezclado en losas macizas

Es conocido que el vaciado de concreto es una partida crítica para la realización de proyectos constructivos con gran influencia en la programación y presupuesto de obra (Takim, et al., 2003 y Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2013). Por ende, para analizar la variabilidad de manera más específica se profundizó en la partida de aplicación de concreto pre mezclado en losas macizas. De esta manera para 39 días, distribuidos en 9 meses (febrero a octubre de 2021) durante los que se ejecutó esta partida se llevó el registro del metrado correspondiente (m³) y las horas hombre (HH) abarcadas en el trabajo. De esta manera se encontró el rendimiento como índice de productividad para la mano de obra. Cabe indicar que se siguió la **Fórmula 13** a continuación descrita.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Horas Hombre empujadas}}{\text{Metrado realizado}} \dots (13)$$

Para esta partida en específico las unidades del rendimiento están dadas en HH/m³ debido a que la aplicación de concreto se metra en unidades de volumen. En la **Tabla 10** se muestra un ejemplo de los datos tomados en campo y el cálculo del rendimiento para todos los días respectivos en los que se realizó el vaciado de concreto en losas. Como ejemplo, se inserta el cálculo de rendimiento para el día 31/05/21. Para ver los datos completos revisar el **Anexo B**.

$$\text{Rendimiento} = \frac{10}{6.3} = 1.587 \text{ HH/m}^3$$

Siguiendo, de manera similar el procedimiento antes realizado, se calcula el rendimiento promedio que resultó ser de 0.518 HH/m³ y se comparada con el rendimiento esperado. Este valor está determinado por la experiencia de la empresa y para este caso en específico resultó ser de 0.71 HH/m³. Se podría afirmar entonces que el proceso cumple de manera cabal con el estándar propuesto de la constructora, pero

el análisis Six Sigma permite profundizar en la detección de causas puntuales que permiten mejorar aún más el rendimiento logrado por los trabajadores. Por esto, también se calculó la desviación estándar de los datos para poder hallar a partir de esta los límites UCL y LCL. A diferencia del PPC, los límites son constantes pues la desviación estándar es la misma para el conjunto de datos (0.286 HH/m³). Los datos mostrados en la **Tabla 10** se resumen en la **Figura 12**.

$$UCL = 0.518 + 0.289 = 0.804 \text{ HH/m}^3$$

$$LCL = 0.518 - 0.289 = 0.232 \text{ HH/m}^3$$

Se debe notar que valores por debajo del promedio, indican para un metrodo constante habrá menor empleo de HH y viceversa. Es por este motivo que es deseable lograr un rendimiento menor al esperado y cercano al valor de 0, aunque este caso sea utópico. Entonces a pesar de haber calculado un Límite de Control Inferior (LCL), se puede prescindir de este para la interpretación estadística. Por otro lado, se debe notar que si bien se ha calculado un Límite Superior de Control, lo que sirve para detectar los días en los cuales el rendimiento fue mayor y las causas especiales de esta variación, también se debe considerar un límite más exigente aun, que es el rendimiento esperado para cumplir con los plazos y costos establecido por la empresa constructora en base a su experiencia en el mercado.

Tabla 10. Rendimientos e indicadores estadísticos por fecha

Fecha	HH	Metrado (m3)	Rendimiento (HH/m3)	Promedio	Std_dev	UCL	LCL
31/05/2021	10	6.3	1.587	0.518	0.286	0.804	0.232
4/06/2021	5	9	0.556	0.518	0.286	0.804	0.232
11/06/2021	7.5	11.5	0.652	0.518	0.286	0.804	0.232
16/06/2021	5	9	0.556	0.518	0.286	0.804	0.232
21/06/2021	4	9.5	0.421	0.518	0.286	0.804	0.232
23/06/2021	1	1.5	0.667	0.518	0.286	0.804	0.232
28/06/2021	5	8.5	0.588	0.518	0.286	0.804	0.232
2/07/2021	6	9.5	0.632	0.518	0.286	0.804	0.232

Nota. Elaboración propia.

De este modo, en la **Figura 12** se observa que para los días 28/04/21, 05/05/21 y 31/05/21, la variabilidad fue ocasionada por las causas especiales, pues los rendimientos excedieron el UCL. Sin embargo, a estas fechas deben sumarse los días 14/05/21 y 05/07/21 pues estos rendimientos excedieron el límite establecido por la empresa.

Asimismo, conociendo que el límite inferior el rendimiento es el valor de 0.71 hh/m3, que el valor promedio de los rendimientos registrados es 0.518 hh/m3 y que la desviación estándar está en el orden de 0.286, mediante el uso de la **Fórmula 12** se obtiene el nivel sigma que es muy cercano a un nivel de 2.

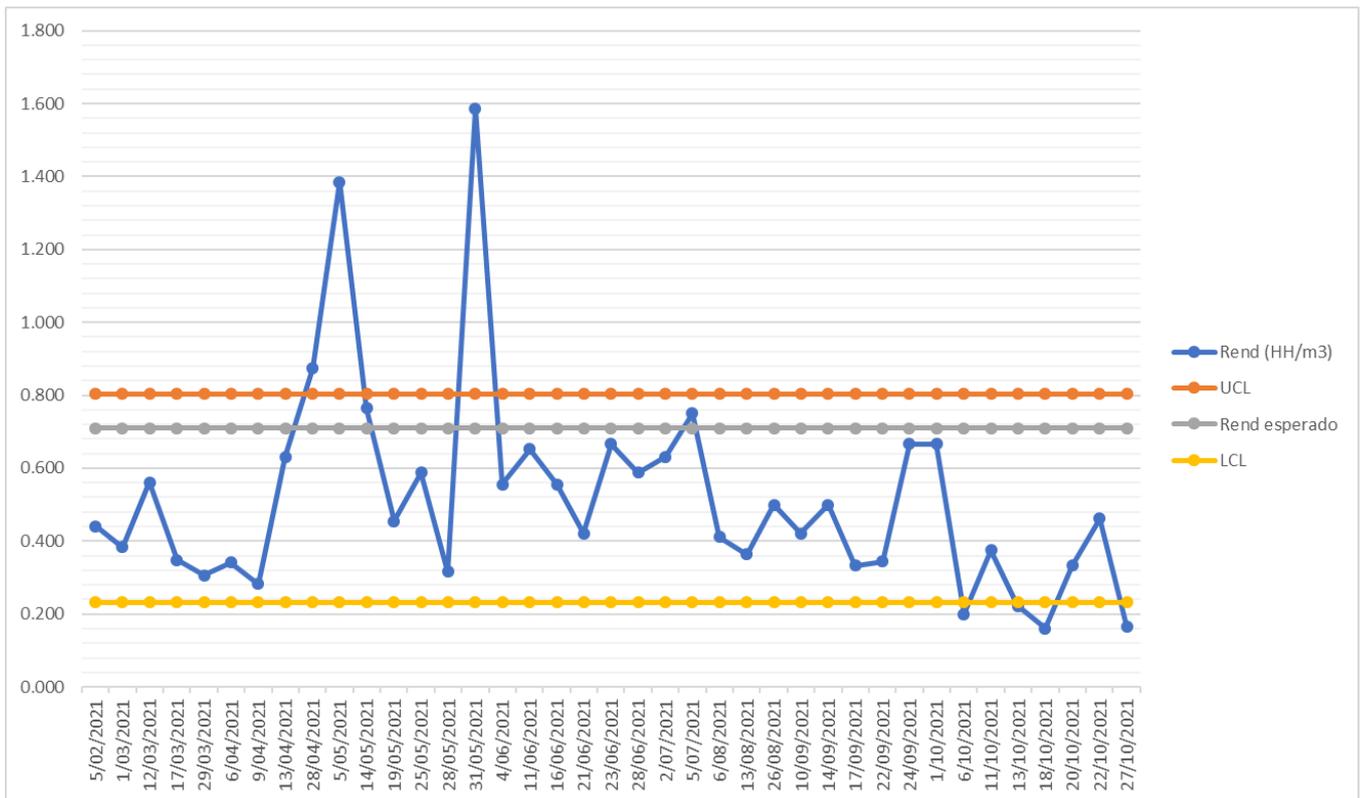


Figura 12. Cuadro de control de Rendimientos para la partida Concreto pre mezclado en losas macizas. Fuente. Elaboración Propia

5. Discusión de resultados

Con respecto a la detección de causas especiales en el PPC, se procedió a solicitar los registros de seguimiento de las partidas de construcción a fin de verificar cuales fueron las Causas de No Cumplimiento (CNC) para las semanas mencionadas anteriormente. Para la clasificación de las CNC, la empresa consideró 7 factores distintos que son determinantes para que una actividad no se lleve a cabo. Estos son descritos de la siguiente manera:

- **Materiales.** – Este factor se relaciona con los insumos básicos para realizar una partida. (Ej. Demora de proveedores de concreto, acero, encofrado, etc.)
- **Mano de obra.** - Este factor se relaciona a los inconvenientes que se presentan con las cuadrillas de trabajo. (Ej. Ausencia de trabajadores, alto índice de trabajo no contributivo, etc.)
- **Equipo.** - Este factor se relaciona con las fallas mecánicas que puedan presentar tanto maquinarias como herramientas. (Ej. Herramientas hechizas, falla en el motor de equipos como la retroexcavadora, etc.)

- **Tarea previa.** – Este factor se relaciona cuando existe un retraso en la programación o incumplimiento del cronograma de obra. (Ej. Re trabajo, demoras en el tren de actividades, etc.)
- **Información.** – Este factor se relaciona con la falta de comunicación o adquisición de conocimientos que permitan ejecutar las partidas. (Ej. Falta de capacitación, cruce de horarios no comunicados al personal, etc.)
- **Causas externas.** - Este factor se relaciona con los eventos fuera del control de la empresa constructora. (Ej. Clima, fallas eléctricas, etc.)
- **Espacio seguro.** – Este factor se relaciona con la ausencia de requisitos básicos para poder efectuar una tarea de mediano y/o alto riesgo. (Ej. Área de trabajo sin señalización, falta de permisos de trabajo seguro, trabajadores sin EPP's, etc.)

Entonces, se procedió a detallar las CNC para cada semana como sigue:

- **Semana 49 del año 2020.-** Se registró 01 incumplimiento por Tarea previa y 02 por Causas externas.
- **Semana 27 del año 2021.-** Se registraron 18 incumplimientos por Causas externas (Paralización).
- **Semana 33 del año 2021.-** Se registraron 02 incumplimientos por Mano de obra y 09 por Tarea previa.
- **Semana 36 del año 2021.-** Se registraron 02 incumplimientos por Mano de obra y 19 por Tarea previa.
- **Semana 37 del año 2021.-** Se registraron 17 incumplimientos por Mano de obra, 06 por Tarea previa y 01 por Causas externas.
- **Semana 40 del año 2021.-** Se registraron 24 incumplimientos por Mano de obra.
- **Semana 41 del año 2021.-** Se registraron 14 incumplimientos por Tarea previa.
- **Semana 43 del año 2021.-** Se registraron 02 incumplimientos por Mano de obra y 05 por Tarea previa.

A partir de los datos obtenidos se analizó en la **Tabla 11** la frecuencia de las CNC para encontrar las más recurrentes. Se puede apreciar que para el presente proyecto de construcción solo se registraron 4 tipos de CNC de las 7 explicadas con anterioridad. Además, mediante la **Figura 9**, **Figura 10** y **Figura 11** se detectaron una totalidad de

8 semanas con una influencia severa en la variación de la producción del proyecto, lo que representa el 17% de las semanas analizadas. En relación a esto, las 8 semanas que albergan las causas especiales obtuvieron un porcentaje mayor a 20 de PPIC, de donde por lo menos 6 de ellas presentaron inconvenientes relacionados al factor de Tarea previa.

Tabla 11. Causas de no cumplimiento por fecha

CNC/ Semana	Mano de obra	Equipo	Tarea previa	Causas Externas	# Partidas no completadas
Semana 49 de 2020	-	-	1	2	3
Semana 27 de 2021	-	-	-	18	18
Semana 33 de 2021	2	-	9	-	11
Semana 36 de 2021	-	2	19	-	21
Semana 37 de 2021	17	-	6	1	24
Semana 40 de 2021	24	-	-	-	24
Semana 41 de 2021	-	-	14	-	14
Semana 43 de 2021	-	2	-	5	-

Nota. Elaboración propia.

En la **Figura 13** se puede ver ejemplificada que, de un global de 122 partidas no completadas relacionadas con las causas especiales, las CNC más comunes presentadas en el proyecto son las de Mano de obra, Equipo, Tarea previa y Causas externas. De estas más del 80% se distribuyen en los factores de Mano de obra (35%) y Tarea previa (47%); mientras que menos del 20% se asocian a los factores de Causas externas y Equipo.

Recurrencia de CNC

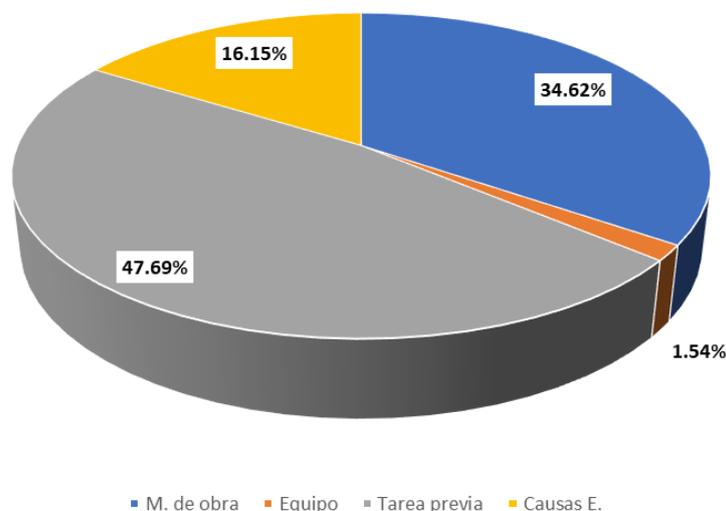


Figura 13. Recurrencia de Causas de No cumplimiento. Fuente. Elaboración propia

Con respecto a la detección de causas especiales en el caso de la partida de “Concreto pre mezclado en losas macizas”, se procedió a solicitar los registros de seguimiento de las partidas de construcción a fin de verificar cuales fueron las causas de bajo rendimiento para los días mencionados anteriormente. Dichas causas son mostradas a continuación en la **Tabla 12**.

Tabla 12: Causas de bajo rendimiento por fecha

Fecha	Causas de bajo rendimiento (CNC)
28/04/2021	Inicio de Operaciones, ajuste de cuadrillas
05/05/2021	Inicio de Operaciones, ajuste de cuadrillas
14/05/2021	Inicio de Operaciones, ajuste de cuadrillas
31/05/2021	Demora del Mixer
05/07/2021	Pocos m ³ de vaciado

Nota. Elaboración propia.

Entonces, se procedió a detallar las causas para cada fecha:

- **Fecha 28/04/2021.-** Se registró un rendimiento de 0.875 hh/m³ de avance debido a que al ser el inicio de operaciones, la cuadrilla recién iniciaba un proceso de ajuste.
- **Fecha 05/05/2021.-** Se registró un rendimiento de 1.385 hh/m³, un valor más crítico que el anterior con la misma causa que la fecha anterior.
- **Fecha 14/05/2021.-** Se registró un rendimiento de 0.765 hh/m³, siendo esta la última fecha de un periodo de ajuste de cuadrillas que tardó aproximadamente medio mes.
- **Fecha 31/05/2021.-** Se registró un rendimiento de 1.587 hh/m³, este valor se debe a las demoras producidas por el Mixer.
- **Fecha 05/07/2021.-** Se registró un rendimiento de 0.750 hh/m³, esto se debe a la poca cantidad de m³ vaciados.

De 39 días analizados se han identificado 05 fechas con causas de bajo rendimiento lo cual representa un 12.8% del total, los días 28/04, 05/05 y 31/05 presentan valores por encima del límite superior calculado mientras que para el 14/05 y el 05/07 los resultados de rendimiento se encuentran ligeramente por encima del esperado. La mayoría de causas (un 60% de estas) se deben a un ajuste al ritmo de trabajo por parte de la cuadrilla, esto se puede observar a mayor detalle en la **Figura 14**.

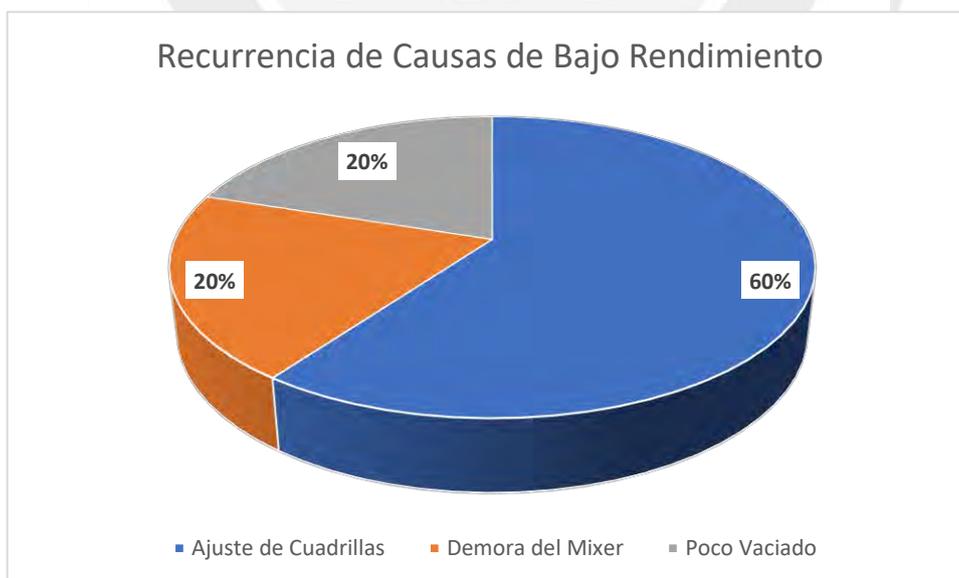


Figura 14. Recurrencia de Causas de bajo rendimiento. Fuente. Elaboración propia

6. Comentarios y conclusiones

Comentarios

Si bien la base de datos del PPC tiene alta confiabilidad al haber sido registrada en un software especializado, para mayor precisión en el cálculo del PPC, Rolled PPC y del Nivel Sigma se pudo trabajar con la totalidad de semanas en las que se realizó el proyecto de construcción. En este sentido se recomienda que una vez se haya terminado la construcción del “Edificio Multifamiliar Garzón” se puedan recopilar los datos totales para un nuevo cálculo del Rolled PPC, PPC promedio y de Nivel Sigma que puedan compararse con los calculados en la presente investigación.

Las semanas analizadas mediante la herramienta del PPC fueron 46 que son equivalentes a casi un año de trabajos, permiten evaluar y hacer una detección de causas especiales consistentes en el tiempo.

Es importante precisar que, el PPC no mide el éxito de la producción, sino la confiabilidad con la que se planifican las obras en un determinado proyecto.

El nivel sigma determinado mediante el Rolled PPC es mucho menor al calculado al considerar el PPC promedio esto debido que para el primer caso se considera cada semana como una estación de trabajo, siendo más cercano a la realidad el valor que deriva del segundo análisis.

Los rendimientos analizados para la partida “Concreto pre mezclado en losas macizas” pueden someterse a un cuadro de control una vez terminada su ejecución en el proyecto para constatar la totalidad de causas especiales y lograr una detección de estas más específica.

A pesar de que los límites para un cuadro de control son estadísticamente calculables, estos muchas veces pueden ser establecidos mediante criterio y/o estándares internos establecidos por las empresas.

Se propone establecer un programa de mejoramiento de productividad que incluya actividades como círculos de calidad o programas de reconocimiento, a fin de que el obrero pueda identificarse con su trabajo. Además, se debe informar sobre este programa a las cuadrillas a fin de la adecuada orientación, la cual podría ir acompañada de material de apoyo, como afiches o manuales. Con las capacitaciones se espera

mejorar la calidad de las técnicas de trabajo de las cuadrillas y evitar o minimizar los re-trabajos y demoras al inicio de actividades.

Dentro de los factores que ocasionaron la alta variabilidad del rendimiento destaca principalmente el de Ajuste de cuadrillas, el cual debería de ser solucionado para mejorar notablemente el rendimiento.

Conclusiones

De las 46 semanas analizadas se puede afirmar que el PPC promedio de la obra es 81% y el PPC acumulado es de 73%, ambas cifras por encima del 50% lo que se traduce como un nivel de aceptable a sobresaliente.

Tomando en cuenta el indicador de Rolled PPC, se puede constatar que el Porcentaje de Plan cumplido en la construcción es de aproximadamente 41%, valor por debajo del 50%. Esto quiere decir que, de la totalidad de las actividades programadas en la semana, menos de la mitad son cumplidas a cabalidad.

Mediante el uso de tres gráficos estadísticos como el cuadro de control se pudo detectar 8 semanas de las 46 analizadas presentaron alta variabilidad en la producción asociada a las causas especiales. Entonces para el caso de estudio, se encontró que 17% del tiempo analizado incurrió en ejecución de partidas con una elevada variabilidad.

Se encontró que para el presente proyecto el nivel sigma asociado a la métrica del Rolled PPC es de 0.86, el cual es muy aproximado al nivel de 1 sigma. Asimismo, el nivel sigma asociado a la métrica del PPC Promedio es de 2.15, el cual es muy aproximado al nivel de 2 sigmas. Si bien para el sector que involucran actividades cíclicas y repetitivas como la manufactura se espera alcanzar un nivel de 6 sigmas, para el sector de la construcción es óptimo alcanzar por lo menos 3 niveles sigmas.

Las principales Causas de No Cumplimiento de las partidas de construcción asociadas a las causas especiales son las relacionadas con los factores de Mano de obra, Tarea previa, equipo y Causas externas. De estas las más recurrentes son las dos primeras con un porcentaje de 47.69% y 34.62% respectivamente.

La partida de “Concreto pre mezclado en losas macizas” presentó un rendimiento promedio de 0.518 HH/m³, valor más productivo que el rendimiento esperado de 0.71 HH/m³ establecido por la empresa. No obstante, de los 39 días analizados con respecto

al rendimiento de la mano de obra, se identificaron 5 fechas con causas especiales asociadas a un bajo nivel de productividad lo cual representa un 12.8% del total de días.

Para la partida de “Concreto pre mezclado en losas macizas”, mediante el uso del rendimiento promedio se encontró que se obtiene un nivel sigma de 2, que resulta inferior a los niveles deseados en la industria de la construcción.



7. Referencias

Abdelhamid, T.S. (2003). Six-Sigma in Lean Construction Systems: Opportunities and Challenges. *11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Virginia.

Antwiwaa, J., Baiden, B.K., Nani, G., y Morgan. M (2020). Benefits of implementing Six Sigma in competitive tendering process. *Built Environment Project and Asset Management*. Volumen 11. Número 2. pp. 214- 230.

Beary, T.M., y Abdelhamid, T.S. (2006). Prioritizing Production Planning Problems and Normalizing Percent Plan Complete Data Using Six Sigma. *14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Santiago. pp. 455-465.

Behara, R.S., Fontenot, G.F., y Greshman, A. (1995). Customer satisfaction measurement and analysis using Six Sigma. *International Journal of Quality and Reliability Management*. MCB University Press. pp. 9-18.

Bravo, M., Augusto, C., y Pucharelli, P.S. (2020). DMAIC Manual for an Integrated Management System: Application in a Construction Company. *Proc. 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC28)*. Berkeley, pp. 169-180. doi: 10.24928/2020/0106

Cantú, A., Lopez, M., y Peirone, P. (2018). Analisis de los factores que afectan la productividad de obras civiles. Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/10948/cantut09.pdf

Constanza, A., Forero, A., Musse, F. y Gonzales, J. (s.f.). *Fundamento Ishikawa* [Diapositiva de emaze]. <https://www.emaze.com/@AOFFZZZWR/karou-ishikawa#!>

Constructora Icafal Sicomaq (2021). *Mapa de procesos*. <http://www.icafalseicomaq.cl/quienes/quienes.html>

Corporación de Desarrollo Tecnológico [CDT]. (2013). Análisis de la Productividad en Obras de Edificación en Chile. *Cámara Chilena de la Construcción*.

Cuervo, J. y Sampayo, E. (2017). Stabilization of the Plan Percent Complete Indicator in Masonry by the Application of Lean Construction – Six Sigma Techniques. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.

Morocco.

Del Moral, M. y Rodríguez, J. (s.f.). *Diagrama de Pareto*. Ejemplo de. [Diagrama De Pareto \(ejemplode.com\)](http://ejemplode.com)

Gutierrez, H., y De la Vara, S. (2009). Control Estadístico de Calidad de Seis Sigma. *Antecedentes y características de Seis Sigma*. (edición 2, pp. 420-426). México D.F.: McGraw-Hill

Gutierrez, H., y De la Vara, S. (2009). Control Estadístico de Calidad de Seis Sigma. Índices de capacidad, métricas Seis Sigma y análisis de tolerancias. (edición 2, pp. 420-426). México D.F.: McGraw-Hill

Hahn, J.G., Doganaksoy, N. y Hoerl, R. (2000). Quality Engineering. pp. 317-326.

Harry, M.J. (1998). Six Sigma: A Breakthrough Strategy for Profitability. *Quality Progress*. Volumen 31. Número 5. pp. 60-64.

Harry, M.J. (2000). “Six Sigma Focuses On Improvement Rates”. *Quality Progress*. Volumen 33. Número 6. pp. 76-80

Ingenio Empresa (2016). *Porcentaje de errores por lote*. <https://ingenioempresa.com/wp-content/uploads/2016/07/Ejemplo-de-grafica-p.png>

IONOS (2019). *El círculo de Deming: mejores resultados con el ciclo PDCA*. [Círculo de Deming: definición y explicación - IONOS](#)

Kanban tool (2021). *¿Qué es un diagrama SIPOC (COPIS)?*. <https://kanbantool.com/es/guia-kanban/que-es-un-diagrama-sipoc>

Oguz, C., Kim, Y., Hutchison, J., y Han, S. (2012). Implementing Lean Six Sigma: A Case Study in Concrete Panel Production. *20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. San Diego. pp. 1-10.

Perales, M. (2018). *Análisis, diagnóstico y propuesta de mejora en los procesos administrativos de la dirección general de administración en una universidad pública aplicando Lean Six Sigma* [Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <http://repositorio.pucp.edu.pe>

Phen, L.S., y Hui, M.S. (2004). Implementing and Applying Six Sigma in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. Volumen 130. Número 4. pp. 482-489.

Portafolio (2017). *Defectos en una empresa Textil*. Diagrama de Pareto 80/20 - Defectos en una empresa Textil ~ Portafolio.ecun-10126 (portafolio10126cun.blogspot.com)

Siddiqui, S.Q., Ullah, F., Thaheem, M.J., y Gabriel, H.F. (2016). Six Sigma in construction: a review of critical success factors. *International Journal of Lean Six Sigma*. Volumen 7. Número 2. pp. 171-186. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1108/IJLSS-11-2015-0045>

Sullivan, K.T. (2011). Quality management programs in the construction industry: best value compared with other methodologies. *Journal of Management in Engineering*. Volumen 27. Número 4. pp. 210-219.

Salazar, E., y Alzate, W. (2015) Simulación Monte Carlo: Análisis de una herramienta para la proyección del estado de resultados.

Trujillo, C. y Caballero, A. (2020). *Estudio de herramientas de Lean Six Sigma y Gestión de Inventarios para el diagnóstico y propuesta de mejora en una empresa de servicios de decoración y producción de textiles utilitarios* [Tesis para optar al grado de Bachiller en Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <http://repositorio.pucp.edu.pe>

Takim, R., Akintoye, A., y Kelly, J. (2003) Performance measurement systems in construction. *Greenwood, D. (Ed.) 19th Annual ARCOM conference*. Volumen 1. pp. 423-431.

Tchidi, M., He, Z., y Li, Y.B. (2012). Process and Quality Improvement Using Six Sigma in Construction Industry. *Journal of Civil Engineering & Management*. Volumen 18. Número 2. pp. 158-172. DOI: 10.3846/13923730.2012.657411.

Linderman, K., Schroeder, R.G., Zaheer, S., y Choo, A.S. (2003), Six Sigma: a goal-theoretic perspective. *Journal of Operations Management*. Volumen 21. pp. 193-203.

Yepes, V., y Pellicer, E. (2005). Aplicación de la metodología Seis Sigma en la mejora de resultados de los proyectos de construcción. *Actas IX Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*. Málaga. ISBN: 84-89791-09-0.

Karakhan, A.A. (2017). Six Sigma: Six Sigma and Construction Safety: Using the DMAIC Cycle to Improve Incident Investigations. *Professional Safety*. pp. 38-40.

Hernandez, H. y Oliveres, G. (2018), Construction labor-productivity assessment using six-sigma tools: a case of study. Volumen 2. Issue 2.



8. Anexos

Anexo A: Datos recopilados para el análisis del PPC

Porcentaje de Planificación Cumplida (PPC)

Nro.	Nombre	Desde	Hasta	Nro Partidas	% PPC	% PPC Acumulado
3	Semana 43 del 2021	25/10/2021	31/10/2021	62	87%	73%
4	Semana 42 del 2021	18/10/2021	24/10/2021	63	95%	73%
5	Semana 41 del 2021	11/10/2021	17/10/2021	67	79%	72%
6	Semana 40 del 2021	4/10/2021	10/10/2021	72	67%	72%
7	Semana 39 del 2021	27/09/2021	03/10/2021	50	98%	72%
8	Semana 38 del 2021	20/09/2021	26/09/2021	47	83%	72%
9	Semana 37 del 2021	13/09/2021	19/09/2021	44	45%	72%
10	Semana 36 del 2021	6/09/2021	12/09/2021	41	5%	72%
13	Semana 33 del 2021	16/08/2021	22/08/2021	26	54%	77%
14	Semana 32 del 2021	9/08/2021	15/08/2021	32	100%	78%
18	Semana 27 del 2021	5/07/2021	11/07/2021	40	55%	84%
19	Semana 26 del 2021	28/06/2021	04/07/2021	36	94%	85%
20	Semana 25 del 2021	21/06/2021	27/06/2021	49	88%	84%
21	Semana 24 del 2021	14/06/2021	20/06/2021	33	88%	84%
22	Semana 23 del 2021	7/06/2021	13/06/2021	30	70%	84%
23	Semana 22 del 2021	31/05/2021	06/06/2021	43	72%	85%
24	Semana 21 del 2021	24/05/2021	30/05/2021	34	88%	85%
25	Semana 20 del 2021	17/05/2021	23/05/2021	51	94%	85%
26	Semana 19 del 2021	10/05/2021	16/05/2021	22	82%	85%
27	Semana 18 del 2021	3/05/2021	09/05/2021	32	94%	85%
28	Semana 17 del 2021	26/04/2021	02/05/2021	20	80%	84%
29	Semana 16 del 2021	19/04/2021	25/04/2021	22	91%	85%
30	Semana 15 del 2021	12/04/2021	18/04/2021	37	84%	84%
31	Semana 14 del 2021	5/04/2021	11/04/2021	24	100%	84%
32	Semana 13 del 2021	29/03/2021	04/04/2021	25	84%	84%
33	Semana 12 del 2021	22/03/2021	28/03/2021	24	96%	84%
34	Semana 11 del 2021	15/03/2021	21/03/2021	22	91%	83%
35	Semana 10 del 2021	8/03/2021	14/03/2021	24	79%	83%
36	Semana 09 del 2021	1/03/2021	07/03/2021	15	93%	83%
37	Semana 08 del 2021	22/02/2021	28/02/2021	17	88%	82%
38	Semana 07 del 2021	15/02/2021	21/02/2021	11	91%	82%
39	Semana 06 del 2021	8/02/2021	14/02/2021	14	86%	81%
40	Semana 05 del 2021	1/02/2021	07/02/2021	17	88%	81%
41	Semana 04 del 2021	25/01/2021	31/01/2021	12	92%	80%
42	Semana 03 del 2021	18/01/2021	24/01/2021	23	100%	79%
43	Semana 02 del 2021	11/01/2021	17/01/2021	12	75%	78%
44	Semana 01 del 2021	4/01/2021	10/01/2021	12	92%	78%
45	Semana 53 del 2020	28/12/2020	03/01/2021	9	78%	76%
46	Semana 52 del 2020	21/12/2020	27/12/2020	8	75%	76%
47	Semana 51 del 2020	14/12/2020	20/12/2020	8	75%	76%
48	Semana 50 del 2020	7/12/2020	13/12/2020	8	75%	76%
49	Semana 49 del 2020	30/11/2020	06/12/2020	8	63%	77%
50	Semana 48 del 2020	23/11/2020	29/11/2020	6	83%	80%
51	Semana 47 del 2020	16/11/2020	22/11/2020	6	83%	79%
52	Semana 46 del 2020	9/11/2020	15/11/2020	9	88%	77%
53	Semana 45 del 2020	2/11/2020	08/11/2020	6	67%	67%

Anexo B: Datos recopilados para el análisis de rendimiento de mano de obra

Partida:	Concreto premezclado en losas macizas			
Fecha	HH	Metrado (m3)	Rend (HH/m3)	Promedio CL
5/02/2021	1.5	3.4	0.441	0.518
1/03/2021	14	36.5	0.384	0.518
12/03/2021	23	41	0.561	0.518
17/03/2021	16.5	47.4	0.348	0.518
29/03/2021	14	45.6	0.307	0.518
6/04/2021	3	8.8	0.341	0.518
9/04/2021	13	46	0.283	0.518
13/04/2021	6	9.5	0.632	0.518
28/04/2021	7	8	0.875	0.518
5/05/2021	18	13	1.385	0.518
14/05/2021	6.5	8.5	0.765	0.518
19/05/2021	5	11	0.455	0.518
25/05/2021	5	8.5	0.588	0.518
28/05/2021	3	9.5	0.316	0.518
31/05/2021	10	6.3	1.587	0.518
4/06/2021	5	9	0.556	0.518
11/06/2021	7.5	11.5	0.652	0.518
16/06/2021	5	9	0.556	0.518
21/06/2021	4	9.5	0.421	0.518
23/06/2021	1	1.5	0.667	0.518
28/06/2021	5	8.5	0.588	0.518
2/07/2021	6	9.5	0.632	0.518
5/07/2021	1.5	2	0.750	0.518
6/08/2021	3.5	8.5	0.412	0.518
13/08/2021	4	11	0.364	0.518
26/08/2021	4	8	0.500	0.518
10/09/2021	4	9.5	0.421	0.518
14/09/2021	1	2	0.500	0.518
17/09/2021	1.5	4.5	0.333	0.518
22/09/2021	5	14.5	0.345	0.518
24/09/2021	2	3	0.667	0.518
1/10/2021	3	4.5	0.667	0.518
6/10/2021	2	10	0.200	0.518
11/10/2021	3	8	0.375	0.518
13/10/2021	1	4.5	0.222	0.518
18/10/2021	2	12.5	0.160	0.518
20/10/2021	1	3	0.333	0.518
22/10/2021	3	6.5	0.462	0.518
27/10/2021	2	12	0.167	0.518