

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Lean Manufacturing en la Industria Petrolera:
Reparación de cable eléctrico para sistema BES**

Romina Danae Herrera Samaniego

Ingeniería Industrial

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Industrial

Quito, 22 de diciembre de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Lean Manufacturing en la Industria Petrolera:
Reparación de cable eléctrico para sistema BES**

Romina Danae Herrera Samaniego

Nombre del profesor, Título académico

Pablo Dávila, PhD

Quito, 22 de diciembre de 2020

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Romina Danae Herrera Samaniego

Código: 00139323

Cédula de identidad: 0604389890

Lugar y fecha: Quito, diciembre de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

La industria petrolera enfrenta grandes desafíos relacionados al aumento de la productividad ya que, particularmente, el tiempo requerido para cumplir los procesos son largos. La implementación de Lean Manufacturing ha demostrado resultados favorables en organizaciones de alta y baja producción, además gran parte de los estudios demuestran reducciones en el tiempo de ciclo y los costos como resultados primarios. El presente estudio por medio de la aplicación de Lean Manufacturing junto con la metodología DMAIC se mejoró el tiempo de ciclo de reparación de cables para sistemas de bombeo electrosumergible (BES) en un taller industrial. Se determinaron mediciones enfocadas en las necesidades de los clientes, posteriormente se calculó el takt time, tiempo de ciclo y se los optimizó por medio de las herramientas 5'S, PokaYoke, Andon, y estandarización. Los resultados en cuanto a las especificaciones del cliente llegaron al 100% mientras que el tiempo de ciclo se redujo en 28%.

Palabras clave: BES, Lean Manufacturing, DMAIC, Tiempo de ciclo, PokaYoke, Andon.

ABSTRACT

The oil industry faces great challenges related to increasing productivity since, in particular, the time required to complete the processes is long. The implementation of Lean Manufacturing has shown favorable results in organizations with high and low production, in addition most of the studies show reductions in cycle time and costs as primary results. The present study, through the application of Lean Manufacturing with the DMAIC methodology, improved the cable repair cycle time for electrical submersible pumping systems (ESP) in an industrial repair shop. Measurements focused on customer needs were determined, later the takt time and cycle time were calculated and optimized using the 5's, PokaYoke, Andon tools, and standardization. Results in terms of customer specifications reached 100% while cycle time was reduced by 28%.

Key words: ESP, Lean Manufacturing, DMAIC, Cycle Time, PokaYoke, Andon.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	10
2. Revisión de literatura.....	12
3. Metodología.....	14
3.1 Definir.....	14
3.2 Medir.....	15
3.3 Analizar.....	15
3.4 Mejorar.....	16
4. Resultados.....	17
4.1 Definir.....	17
4.2 Medir.....	17
4.3 Analizar.....	18
4.4 Mejorar.....	20
5. Conclusiones.....	25
6. Referencias bibliográficas.....	27
7. Anexo A: Equipo BES.....	30
8. Anexo B: Resultados.....	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de resultados para las fases Definir, Medir y Analizar.....	20
-------------------------------------------------------------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Código para identificación de cables	22
Figura 2. Instalación convencional de BES.....	30
Figura 3. Diagrama de Causa y Efecto	31
Figura 4. ‘Checklist’ propuesto para entrenamiento del personal.....	32
Figura 5. Simulación en FlexSim modelo actual	33
Figura 6. Resultados de simulación en FlexSim modelo actual.....	33
Figura 7. Simulación en FlexSim modelo con segunda línea de reparación.....	34
Figura 8. Resultados simulación en FlexSim modelo con segunda línea de reparación	34

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de bombeo electrosumergible (BES) se refiere al levantamiento artificial, mayormente utilizado en el campo petrolero, usado para levantar de manera confiable volúmenes moderados de crudos pesados y livianos (Lu et al., 2020).

Los inicios del uso de BES se atribuyen a Armais Arutunoff, fundador de Russian Electrical Dynamo de Arutunoff, cuyo acrónimo REDA es conocido en todo el ámbito petrolero (Takacs, 1947). Bearden (2007), afirmó que el sistema BES es un método adecuado cuando se necesita extraer un volumen de petróleo entre moderado y alto, estos volúmenes varían desde 150 B/D (barriles por día) hasta 150,000 B/D. La figura 3 adjunta en Anexo A muestra la instalación convencional del equipo BES, objeto presente de estudio.

Los beneficios del bombeo electrosumergible se reflejan en la utilización en pozos desviados, su eficiencia energética es relativamente alta (alrededor del 50%) para sistemas que producen más de 1000 bpd (barriles por día), requiere poco mantenimiento en condiciones correctamente diseñadas y operadas, razón por la cual el cable eléctrico luego de cada perforación necesita ser revisado y reparado (Takacs, 1947).

La construcción del cable eléctrico puede ser redonda o plana, los cuales tienen una armadura metálica que se considera opcional en su exterior para evitar daños mecánicos en las operaciones de funcionamiento (Takacs, 1947).

De igual forma, los tratamientos contra la corrosión son fáciles de realizar, sin embargo, dependerá del estado mecánico del pozo (Takacs, 1947). Por otra parte, este sistema necesita en promedio de generadores a 480 V (o puede ser líneas de medio voltaje a 14 kV que los transformadores reducen a un voltaje de 480 V) (Takacs, 1947). Los

materiales abrasivos en los fluidos de los pozos incrementan considerablemente el desgaste del equipo, y la reparación del equipo BES no se puede realizar en el campo petrolero in situ, por lo que debe ser trasladado a talleres especializados.

Lean Manufacturing se centra en la relevancia de las especificaciones de valor de los clientes, así como también en la entrega y creación de valor de manera eficiente (Womack y Jones, 2010). En cuanto a las interrupciones, se consideran como actividades que no contribuyen a la creación de valor para el cliente, lo que se traduce en "desperdicio" (Womack y Jones, 2010). Los siete desperdicios, que describe Ohno (1988) son: sobreproducción, defectos, transporte, sobre procesamiento, espera, inventario y movimientos innecesarios, mismos que se deben mitigar por medio de herramientas Lean.

La amplia variación con respecto a la concepción de la filosofía lean se atribuye a la constante evolución de su concepto, que ha extendido su alcance fuera del contexto de fabricación (Papadopoulou y Özbayrak, 2005). Además, Rats et al. (2015) afirma que el concepto Lean se ha argumentado como herramientas que podrían mejorar el desempeño comercial de la industria petrolera.

Este estudio fue realizado en un taller industrial ecuatoriano y tiene como objetivo determinar los principales problemas en el proceso de reparación de cable para sistema BES a través de la metodología DMAIC y herramientas Lean para proponer alternativas de mejora, hacer eficiente el proceso y aumentar la capacidad de respuesta al mercado.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

La instalación de un cable eléctrico nuevo en un equipo de bombeo electrosumergible representa aproximadamente del 20% al 25% del costo total del equipo, siendo esta una de las necesidades de optimización, por otra parte, su reparación representa un 5% del precio total del cable (SPS, 2016). Por este motivo, es necesario inspeccionar el cable y en el caso que se requiera, repararlo antes de ser utilizado en un nuevo pozo.

Las empresas operadoras en el Ecuador cuentan con personal técnico capacitado en el levantamiento artificial mediante sistema BES, lo cual brinda una ventaja en la industria petrolera nacional (Jaua, 2014). Su rango operativo es mayor a 1000 barriles de fluido producidos por día (BFPD) en pozos de alto caudal, como son la mayoría de los pozos dentro del territorio Ecuatoriano (Jaua, 2014). Según la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (2020), el número de pozos en producción de petróleo en promedio es 2406, donde cerca del 75% son por sistema BES.

Los conceptos lean se ha aplicado a varias áreas de la industria del petróleo, así como la perforación, construcción de pozos y el mantenimiento de equipos (Rachman & Ratnayake, 2019). En esta industria los beneficios de la aplicación del concepto Lean se caracterizan principalmente por reducir el tiempo de ciclo y generar un ahorro al mejorar el tema de costos (Rachman & Ratnayake, 2019).

En un proyecto de construcción de pozos, se obtuvieron resultados como la disminución del tiempo de desarrollo del campo en 2,3 años al reducir el tiempo del ciclo de perforación y terminación del pozo por medio de herramientas Lean, del mismo modo se redujo la cantidad de tiempo no productivo y el número de lesiones en los operarios (Tønnessen et al., 2015).

Adicionalmente, en un estudio de investigación Romero y col. (2015) identificaron que una reducción del tiempo de ciclo en la intervención de pozos logró generar un ahorro total de costos de \$ 5,4 millones / año a la organización implicada.

Romero y col. (2015) argumentaron que toda implementación debería incluir una herramienta visual como VSM (Value Stream Mapping). Esto se debe a que Itua y Shamuganathan (2015) enfatizaron la importancia de un sistema visual como una herramienta para informar al equipo sobre la situación actual de la empresa, así como para imponer los hitos del proyecto. El VSM y la estandarización de trabajo pueden usarse en cualquier tipo de industria, sin importar la diversidad de características del proceso (Abdulmalek y col., 2006). Del mismo modo, kaizen, 5 S's y los sistemas visuales se pueden aplicar por lo general a cualquier industria (Abdulmalek y col., 2006).

La mayoría de las herramientas y conceptos utilizados en Lean no son nuevos en el campo petrolero (Buell y Turnipseed, 2004). Sin embargo, según la experiencia de los autores, la aplicación efectiva de herramientas estadísticas y de calidad, combinadas con principios de ingeniería a nivel organizacional, no es una rutina en la mayoría de las operaciones iniciales (Buell y Turnipseed, 2004), lo cual debe mejorarse y adaptarse como es el caso en el presente trabajo que se aplican herramientas estadísticas junto con principios de ingeniería.

3. METODOLOGÍA

La disciplina de Lean y la metodología DMAIC pueden producir resultados favorables a nivel organizacional en operaciones de yacimientos petrolíferos (Buell y Turnipseed, 2004).

La metodología DMAIC fue usada en el presente estudio, ésta constó de las fases: Definir, Medir, Analizar, Mejorar (Stevenson, 2015). Debido a restricciones de tiempo en las que se desarrolló el estudio, no se realizó la última etapa ‘Controlar’.

3.1 Definir

La primera etapa de la metodología DMAIC tiene como objetivo definir el alcance y los límites del proyecto, identificando la voz del cliente y los objetivos del proyecto (Stevenson, 2015). El diagrama SIPOC permite visualizar y comprender las partes de un proceso y sus relaciones, es decir, los elementos clave de la cadena de valor: proveedores, entradas, proceso, salidas y clientes (Cañedo et al., 2012). Para ampliar la visión de todo el proceso se puede utilizar la herramienta Value Stream Mapping (VSM) porque combina los pasos de procesamiento de materiales con el flujo de información, junto con otros datos importantes que se relacionan con el proceso (ASQ, 2020).

Por otro lado, la Matriz VOC (voz del cliente) permite diagnosticar las quejas o necesidades de los clientes (Pyzdek, 2003), con los Críticos para la calidad (CTQ) definidos se puede utilizar el Árbol crítico para la calidad (CTQ Tree) que es una herramienta para identificar las necesidades del cliente y como consecuencia distingue los requisitos de desempeño que son medibles y a la vez necesarios para satisfacer las necesidades del cliente, mejorando la calidad del servicio o producto (Pyzdek, 2003).

3.2 Medir

Para comenzar con esta fase se puede realizar un Cursograma Analítico porque representa de manera gráfica los procedimientos y permite tener una visión esquemática del conjunto de tareas necesarias para el proceso en estudio (Cruelles, 2013).

La elección de los métodos de muestreo depende de los recursos financieros para el estudio, los objetivos de estudio, la naturaleza del problema y las limitaciones de tiempo (Hernández-Mendoza & Hernández-Mendoza, 2018). En una investigación el tamaño de muestra debe ser representativo ya que permite fijar el grado de precisión de los resultados y caracterizar la distribución de la variable (Valdivieso Taborga et al., 2011).

Adicionalmente se puede usar el Takt time porque es el tiempo de ciclo necesario para ajustar el ritmo de producción con la demanda y se lo considera como el latido del corazón de un sistema de producción Lean (Stevenson, 2015).

3.3 Analizar

La metodología DMAIC involucra el análisis del sistema para identificar formas de reducir la brecha entre el desempeño actual y la meta deseada (Garza-Reyes et al., 2010). En esta fase es indispensable el análisis de los datos que se obtienen en la fase Medir, para comprender la causa raíz del problema (Breyfogle et al., 2001). El diagrama de Pareto identifica los defectos más graves y prioriza el problema crítico que se debe abordar (Slack et al., 2010). Para categorizar e ilustrar las posibles causas, se puede construir un diagrama de causa y efecto también conocido como Ishikawa o diagrama de espina de pescado, que busca las causas fundamentales de los problemas (Stevenson, 2015).

Después de considerar las causas raíz, se puede considerar la herramienta AMEF para encontrar el modo de falla potencial, determinar el valor de número de prioridad de riesgo (RPN) y proponer acciones que mitiguen las causas encontradas (Escalante, 2010), esta

herramienta se conoce por ser dinámica en la cual se recopila y clasifica información clave del sistema en general (Escalante, 2010).

3.4 Mejorar

Tras completar las anteriores fases, determinar las causas y proponer soluciones, en la fase de Mejora se tiene como objetivo principal abordar las posibles soluciones creativas y funcionales (Stevenson, 2015). Lean Manufacturing ofrece varias alternativas de herramientas para esta fase como las 5'S que aumentan la eficiencia en las empresas por medio de la organización, el orden, la limpieza, la estandarización y la disciplina (Nava et al., 2017). La simulación es una tecnología que se aplica especialmente para analizar y resolver problemas (Beaverstock et al., 2017). Su aplicación comienza por tener clara la definición del problema, las razones para la simulación y los resultados esperados (Beaverstock et al., 2017). Para realizar una simulación se debe equilibrar la comprensión del problema con el conocimiento de los detalles de la simulación como, por ejemplo: los conceptos de simulación, el software de aplicación y las metodologías de análisis que se emplean (Beaverstock et al., 2017).

4. RESULTADOS

4.1 Definir

Para comenzar se realizó un diagrama SIPOC con el fin de visualizar y comprender las partes los elementos clave de la cadena de valor (Cañedo et al., 2012). El cable eléctrico que debe ser reparado es transportado en carretes que se montan sobre spoolers, se inspeccionan, se realizan pruebas eléctricas e hidrostáticas para localizar el lugar de desgaste del cable, y se realizan empalmes. Antes de continuar con el proceso se lleva a cabo un proceso de control de calidad por medio de pruebas eléctricas y pasa a la etapa final que es el embalaje y etiquetado del carrete.

En base a información obtenida por parte del departamento de operaciones y ventas se diagnosticaron los problemas clave, requerimientos críticos para el cliente y los críticos para la calidad (CTQ), los cuales se usaron en el CTQ tree para identificar las necesidades del cliente que mejoren la calidad del servicio (Pyzdek, 2003). La falta de accesibilidad al cliente es la queja que predomina la lista y este error provoca rompimiento de relaciones comerciales, lo cual también se traduce como pérdidas económicas. Por otro lado, estos datos permitieron especificar las métricas para la fase de medir.

4.2 Medir

De acuerdo con el tipo de medición se tomaron los datos y se encontró que, para la métrica del porcentaje de reparaciones entregadas a tiempo, se cumplía apenas el 67% de lo establecido. Por otro lado, el porcentaje de cumplimiento de las órdenes de trabajo en cuanto a la accesibilidad de horario fue del 33%. Para la métrica del porcentaje de las órdenes satisfechas se encontró que el 67% de las órdenes eran ejecutadas a tiempo. El porcentaje de empalmes confiables por órdenes de trabajo en las pruebas eléctricas finales

fue del 67% de lo establecido. Por último, el número de accidentes/incidentes por orden de trabajo en base al cumplimiento de normas de seguridad fue de 1 mientras que el objetivo era 0.

Adicionalmente se implementó un cursograma analítico en el cual se describieron las actividades categorizadas por operación, transporte, inspección y espera (Cruelles, 2013). Se detectaron 7 actividades de operación, 1 de transporte, 1 de inspección y 3 de espera.

Se determinó el takt time en base a la demanda mensual de reparación de cable, y el tiempo disponible para realizar el proceso, el resultado fue de 3,8 horas por carrete, mientras que el tiempo de ciclo determinado fue de 11 horas por carrete. Esto indicó que el tiempo actual en el que se realiza la reparación de cable es un proceso con falta de eficiencia ya que es mayor al ritmo con el que se debería reparar (takt time).

4.3 Analizar

En esta fase se evaluaron las quejas por parte de los clientes y se realizó un diagrama de Pareto que mostró que la tasa más alta de quejas fue causada por la falta de accesibilidad al cliente. En particular, este tipo de queja contribuyó cerca del 80% de la cantidad total de las quejas. Posteriormente se realizó un análisis para identificar las causas raíz del principal problema identificado. Se llevaron a cabo varias sesiones de lluvias de ideas para identificar las posibles causas del problema, basándose en la experiencia y conocimiento del jefe de operaciones de la organización. Para categorizar e ilustrar las posibles causas se construyó un diagrama de causa y efecto que se presenta en la Figura 3, Anexo B (Stevenson, 2015). Las causas se enfocaron de acuerdo con frecuencia y gravedad.

Después de considerar las causas raíz, se utilizó la herramienta AMEF para encontrar el modo de falla potencial, determinar el valor de número de prioridad de riesgo (RPN) y proponer acciones que mitiguen las causas encontradas (Escalante, 2010). En la entrada se estipuló como la falta de accesibilidad al cliente, con seis modos de falla potencial que dieron paso a la determinación de efectos potenciales de falla, gravedad de la insuficiencia con una escala del 1-10, donde 1 es gravedad baja y 10 es gravedad muy alta, asimismo se presentaron las causas potenciales con su ocurrencia de posibilidad con una escala del 1-10, donde 1 representa baja ocurrencia y 10 representa muy alta ocurrencia. El grado de detección fue determinado con una escala del 1-10, donde 1 se refiere a muy bajo y 10 grado muy alto. En cuanto al RPN, se obtuvieron valores altos, los cuales eran esperados con los resultados de gravedad obtenidos anteriormente, para lo cual se recomendaron acciones que se consideraron viables y acordes con las necesidades identificadas.

Después de considerar las fases completadas de DMAIC se realizó una tabla resumen que indica las etapas anteriores, desde la necesidad del cliente, su conductor, CTQ, causas potenciales, modo de falla potencial, hasta las acciones recomendadas para la siguiente fase, ver Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de resultados para las fases Definir, Medir y Analizar

Conductores	CTQ	Causas Potenciales	Modo de falla potencial	Acciones recomendadas
Tiempo	Tiempo de entrega	Falta de equipos	Falta de capacitaciones y de mejoras	Invertir en un nuevo equipo de reparación de cable
		Falta de métodos actualizados	Falta de información	Código para identificación de cables y mejorar los estudios de confiabilidad
Horarios de atención	Accesibilidad de horario	Métodos generales del taller	Inadecuada administración	Aumentar un turno
Calidad	Órdenes de trabajo ejecutadas a tiempo	Mala comunicación	Falta de estandarización	Poka yoke para las órdenes de trabajo.
	Pruebas eléctricas finales	Falta de entrenamiento	Falta de controles y certificaciones	Checklist y capacitación al personal con certificación.
Normas de seguridad	Cumplimiento de normas	Falta de aplicación de normativas	Omisión de implementaciones	Implementación de Andon

4.4 Mejorar

Para comenzar con esta fase, se implementó la herramienta 5'S en el lugar de trabajo, ya que se identificó desorden y la presencia de objetos que no pertenecían a los materiales necesarios para desarrollar el proceso de reparación de cable. Como resultado se obtuvo la estandarización del lugar de trabajo, se redujo el riesgo de cometer errores, y se mejoró la recolección de datos.

Se obtuvo personal capacitado por medio de la impartición de un curso de 10 horas sobre Sistemas BES y su reparación, de manera que se mejoró la calidad de las reparaciones de cable eléctrico en cuanto a las pruebas eléctricas del control de calidad del proceso y el porcentaje de empalmes confiables fue del 100%.

Adicionalmente, para combatir el conductor de calidad que genera la falta de accesibilidad al cliente se estableció un 'checklist' para los nuevos operarios que se

integren en el taller, el documento consta de datos personales, preparación de entrenamiento, capacitación de procesos, capacitación para la comunicación, limpieza y orden. Este documento se implementa para tener un respaldo de la inducción de los operarios y al mismo tiempo permitir una estandarización en el proceso de reclutamiento de personal. Ver Figura 4, Anexo B.

El cumplimiento de las normas de seguridad es indispensable en este tipo de trabajo, ya que conlleva varios riesgos, tanto para el operador como para los equipos que se encuentran en funcionamiento. En el caso del personal, deben llevar puesto su uniforme y equipo de seguridad personal: casco, gafas, protectores auditivos, overol de trabajo con cremallera de doble dirección, botas y guantes dieléctricos y mascarilla (éste último debido a las condiciones actuales del Covid19). En el taller se identificó que no se tenía la suficiente distancia entre el personal ya que existe un alto riesgo de recibir descargas eléctricas, por lo que se implementó una sirena tipo licuadora para evitar el paso del personal cuando se realizan pruebas hidrostáticas y eléctricas. Se recalculó el número de incidentes/accidentes por orden de trabajo y pasó de 1 a 0 con la implementación de esta herramienta denominada Andon.

Para mejorar la calidad de las reparaciones de cable se implementó la técnica “a prueba de errores”, también conocida como Poka-Yoke, para registrar las órdenes de trabajo. En consecuencia, se obtuvo que el porcentaje de órdenes satisfechas pasó del 67% al 100%.

Para mejorar el CTQ del tiempo de entrega de cables reparados se implementó un código en los cables con un grabador eléctrico que tiene funcionalidad para los procesos internos. Se calculó de nuevo el porcentaje de reparaciones entregadas a tiempo y pasó de 67% a 84% al usar este código ya que mejora los estudios de confiabilidad y permite

al taller tener un control de manera interna con los registros históricos, por lo que el tiempo de inspección disminuye considerablemente. Ver Figura 1.



Figura 1. Código para identificación de cables

Finalmente, se aplicó una simulación por medio del software FlexSim para reducir el tiempo de espera al agregar una segunda línea de reparación de cable. En el primer modelo se representó la situación actual del taller. La entidad Queue 4 representó al lugar en donde se colocan los carretes de cable reparado, por otro lado, la entidad Combiner1 representó a la entrega de carretes de cable reparado al transporte del cliente. Como resultado Queue 4 obtuvo un porcentaje de ocupación de 13.24%, y la entidad Combiner1 obtuvo 0%, estos valores fueron esperados debido a la configuración del taller, por lo que no se completaba al día una orden de trabajo, cada orden tiene en promedio 2 carretes con cable a reparar y cada carrete contiene en promedio 4500 pies de longitud. Ver Figura 5 y 6, Anexo B.

El segundo modelo (modelo propuesto) se refirió al incremento de una segunda línea de reparación de cable, que constó de 2 operarios más, y 1 turno de trabajo adicional, de esta manera se cumplió con la acción recomendada para mejorar los horarios de

atención. Los resultados de la entidad Queue4 obtuvo un 48.74% debido a que esta vez se repararon más carretes de cable al día y la entidad de Combiner1 obtuvo un resultado de 0.69% porque se envió una orden de trabajo completa con su respectivo transporte. Ver Figura 7 y 8, Anexo B.

La simulación tuvo resultados eficientes, sin embargo, se decidió realizar un análisis financiero que permitió determinar la factibilidad de la inversión. Los resultados indicaron un TIR de 32%, TMAR de 9,10% y VAN mayor a 1, lo cual indica que, al ser el VAN positivo, los flujos de caja futuros serán rentables para el proyecto (Mete, 2014). El TIR es mayor al TMAR lo que indica que la inversión será recuperada en su totalidad (Mete, 2014).

El agregar un turno de trabajo en la simulación en el modelo 2 (modelo propuesto) implicó que el tiempo disponible se incremente, lo cual, bajo las mismas condiciones de holguras de trabajo, permitió pasar de un takt time de 3 horas por carrete a 6 horas por carrete, es decir al ritmo que se deben reparar los cables eléctricos para completar con la demanda es de 6 horas.

Los resultados de la simulación mostraron que en 24 horas se trabajaron 3 carretes, esto quiere decir que, en promedio, el tiempo de ciclo fue de 8 horas/carrete. Al comparar los resultados del tiempo de ciclo de la situación inicial del taller, éste pasaría de 11 a 8 horas/carrete.

La relación takt time con el tiempo de ciclo con la simulación pasó de tener una brecha de 8 horas a tener una brecha de 2 horas, siendo así un buen indicador, sin embargo, todavía no se logró igualar el takt time con el tiempo de ciclo debido a la variabilidad que existe entre los cables que llegan al taller, ya que unos conllevan un

capilar mientras que los otros cables tienen dos capilares y el tiempo de ciclo es el doble que la reparación de un cable eléctrico con un capilar.

Las implementaciones de 5'S , estandarización, andon y poka yoke tuvieron sus costos respectivos por lo cual se decidió realizar un análisis costo beneficio. Según Canibe & Balet (2020), el índice neto de rentabilidad puede calcularse por medio del costo beneficio, mismo que es la relación entre el valor actual de beneficios netos (VAI) sobre el valor actual de los costos de inversión (VAC). Al aplicar esta relación, se obtuvo un valor mayor a 1, lo cual indica que el costo beneficio fue positivo por lo que, los gastos que se hicieron en las implementaciones tuvieron resultados positivos.

5. CONCLUSIONES

Las herramientas de Lean Manufacturing y DMAIC permitieron la detección de los principales puntos de mejora en el proceso de reparación de cable, propósito del presente estudio. Por lo cual, las soluciones que se implementaron en el proceso de reparación de cable mejoraron significativamente el porcentaje de las especificaciones ya que en promedio aumentaron en 33% debido a la aplicación de PokaYoke, Andon, 5`S y estandarización.

La acción de mejora para el tiempo de entrega de los carretes necesitó de simulación para obtener un diseño eficiente y como resultado se demostró que al implementar un turno y la segunda línea de reparación el número de carretes reparados al día se triplican, lo cual muestra un mejor ajuste entre el takt time y el tiempo de ciclo ya que el takt time se duplicó porque se tiene más tiempo disponible, mientras que el tiempo de ciclo se redujo en 28%.

La variabilidad que existe en el número de capilares que tienen los cables eléctricos afecta directamente a la relación del tiempo de ciclo con el takt time ya que el tiempo de ciclo se llega a duplica cuando se tienen 2 capilares. Con la implementación de herramientas Lean se obtuvo una mejora significativa que incurre en términos económicos que benefician al taller, sin embargo, esta variabilidad no permitió que estos tiempos se igualen.

Por último, las limitaciones que se encontraron en el estudio se basaron en la fase de Medir debido a que los datos no fueron tomados presencialmente y se los obtuvo de manera virtual, lo cual puede tener una influencia en los resultados. La etapa Controlar tampoco se pudo realizar por el factor principal del tiempo de ejecución del proyecto, no

obstante, el departamento de operaciones tiene el compromiso de continuar y asegurarse que los cambios perduren en el tiempo y que de esta manera el taller sea eficiente.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulmalek, F.A., Rajgopal, J. and Needy, K.L. (2006), “A classification scheme for the process industry to guide the implementation of lean”, *Engineering Management Journal*, 18 (2), 15-25.
- ASQ. (2020). What is value stream mapping (VSM)?. Wisconsin, EU.: *American Society for Quality*. Recuperado de: <https://asq.org/quality-resources/lean/value-stream-mapping#:~:text=VSM%20is%20an%20essential%20lean,and%20time%20are%20used%20efficiently>
- Bearden, J. (2007). “Electrical Submersible Pumps”, *Petroleum Engineering Handbook*. SPE, 4.
- Beaverstock, M., Greenwood, A. and Nordgren, W. (2017). *Applied Simulation: Modeling and Analysis using FlexSim*. Orem, EEUU: FlexSim Software Products, Inc.
- Breyfogle III, F., Cupello, J., and Meadows, B. (2001). *Managing Six Sigma*, John Wiley & Sons Inc. New York.
- Buell, R.S. and Turnipseed, S.P. (2004), “Application of lean six sigma in oilfield operations”, *SPE Production & Facilities*, 19 (4), 201-208.
- Canibe, T. & Balet, R. (2020). ¿Qué es un análisis de costo beneficio?. *Sinnaps*. Recuperado de: [https://www.sinnaps.com/blog-gestionproyectos/analisis-costo-beneficio#:~:text=La%20relaci%C3%B3n%20costo%2Dbeneficio%20\(B,\(VAC\)%20de%20un%20proyecto.](https://www.sinnaps.com/blog-gestionproyectos/analisis-costo-beneficio#:~:text=La%20relaci%C3%B3n%20costo%2Dbeneficio%20(B,(VAC)%20de%20un%20proyecto.)
- Cañedo, C., Curbelo, M., Núñez, K., y Zamora, R. (2012). Los procedimientos de un sistema de gestión de información: Un estudio de caso de la Universidad de Cienfuegos. *Biblios*, (46), 40-50. Recuperado de: <https://doi.org/10.5195/biblios.2012.40>
- Cruelles, J. (2013). *Ingeniería Industrial: Métodos de trabajo, tiempos y su aplicación a la planificación y a la mejora continua*. México DF, México: Alfaomega Grupo Editor.
- Escalante, E. (2010). *Seis Sigma Metodología y Técnicas*. México: Limusa.
- Garza-Reyes, J.A., Oraifige, I., Soriano-Meier, H., Harmanto D. and Rocha-Lona, L. (2010). “An empirical application of Six Sigma and DMAIC methodology for business process improvement”, *Proceedings of the 20th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM)*, July 12-14, California, US.

- Gebauer, H., Kickuth, M. and Friedli, T. (2009), “Lean management practices in the pharmaceutical industry”, *International Journal of Services and Operations Management*, 5 (4), 463-481.
- Hernández-Mendoza, J. M., & Hernández-Mendoza, S. L. (2018). La Investigación de Mercados. In *Boletín Científico de la Escuela Superior Atotonilco de Tula* (5). <https://doi.org/10.29057/esat.v5i10.3280>
- Hines, P., Holweg, M. and Rich, N. (2004), “Learning to evolve: a review of contemporary lean thinking”, *International Journal of Operations & Production Management*, 24 (10), 994-1011.
- Holweg, M. (2007), “The genealogy of lean production”, *Journal of Operations Management*, 25 (2), 420-437.
- Jaua, J. (2014). Análisis del ciclo de vida y selección de sistemas de levantamiento artificial en campos maduros del Ecuador. *PGE PETRÓLEO Y GAS*. No. 001-Mayo 2014, p. 41. ISSN 1390-8812. Recuperado de: https://issuu.com/aihecuador/docs/revista_petroleo_y_gas-mayo_2014
- Jørgensen, B. and Emmitt, S. (2008), “Lost in transition: the transfer of lean manufacturing to construction”, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 15 (4), 383-398.
- Lu, X., McManus, J., Ramachandran, S., & Soos, L. (2020). New approach extends electrical submersible pump life. *World Oil*, 241(6), 17–20.
- Mecanismos de levantamiento artificial. (2017). Ingeniería de Petróleo. Recuperado de: <http://ingeniopetrolerooficial.blogspot.com/2017/02/mecanismos-de-levantamiento-artificial.html>
- Mete, M. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Instituto de Investigación en Ciencias Económicas y Financieras Universidad La Salle – Bolivia*, 7, 67-85.
- Nava, I., León, M., Toledo, I., Kido, J. (2017). Metodología de la aplicación 5’S. *Revista de Investigaciones Sociales Instituto Tecnológico de Iguala*, 3 (8), 29-41.
- Niebel, B. & Freivalds, A. (2009). *Ingeniería Industrial: Métodos, Estándares Y Diseño Del Trabajo*. México DF: McGraw-Hill.
- Nightingale, D., Bozdogan, K., Milauskas, R., Mize, J., Taneja, A. and Tonaszuck, D. (2000). *Transitioning to a Lean Enterprise: A Guide for Leaders*, Massachusetts Institute of Technology Lean Aerospace Initiative, Cambridge.
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Productivity Press, New York: NY.

- Panwar, A., Jain, R. and Rathore, A.P.S. (2015), “Lean implementation in Indian process industries – some empirical evidence”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26 (1), 131-160.
- Papadopoulou, T. and Özbayrak, M. (2005), “Leanness: experiences from the journey to date”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16 (7), 784-807.
- Pyzdek, T. (2003). *The Six Sigma Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Rachman, A. and Ratnayake, R.M.C. (2016), “Implementation of lean knowledge work in oil and gas industry – a case study from a risk-based inspection project”, *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, Bali.
- Rachman, A., & Ratnayake, R. M. C. (2019). Adoption and implementation potential of the lean concept in the petroleum industry: state-of-the-art. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(1), 311–338. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-10-2016-0065>
- Rats, M., Calio, E., Rashed, H., Chilukuru, S., Berns, M., Hartung, J., Nordahl, H. and Whittaker, P. (2015), “Big oil – toughen it out, or business model reboot?”, Morgan Stanley & The Boston
- Slack, N., Chambers, S. and Johnston, R. (2010). *Operations Management*, 6th Edition, Pearson, Essex, UK.
- SPS. (2016). SPS adquirió moderno Taller para reparar cables de Sistemas BES. *SPS Services*. Recuperado de: <https://www.spservicesltd.uk/es/sps-adquirio-moderno-taller-sistemas-bes/>
- Stevenson, William J. (2015). *Operations management* 12th edition, New York: McGrawHill Education.
- Takacs, G. P. . (1947). Electrical Sumbersible Pumps Manual - Design, Operation and Maintenance. In *Journal of Chemical Information and Modeling*, 3.
- Valdivieso Taborga, C. E., Valdivieso Castellón, R., & Valdivieso Taborga, O. Á. (2011). Determinación Del Tamaño Muestral Mediante El Uso De Árboles De Decisión Sample Size Determination Using Decision Trees. *Investigacion & Desarrollo*, 11(1), 53–80. <https://doi.org/10.23881/idupbo.011.1-4e>
- Webster, J. and Watson, R.T. (2002), “Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review”, *MIS Quarterly*, 26 (2), 13-23.
- Womack, J.P. and Jones, D.T. (2010). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, 2nd Ed., Simon and Schuster, New York, NY.
- Womack, J.P., Jones, D.T. and Roos, D. (1990), *Machine That Changed the World*, Simon and Schuster, New York: NY

7. ANEXO A: EQUIPO BES

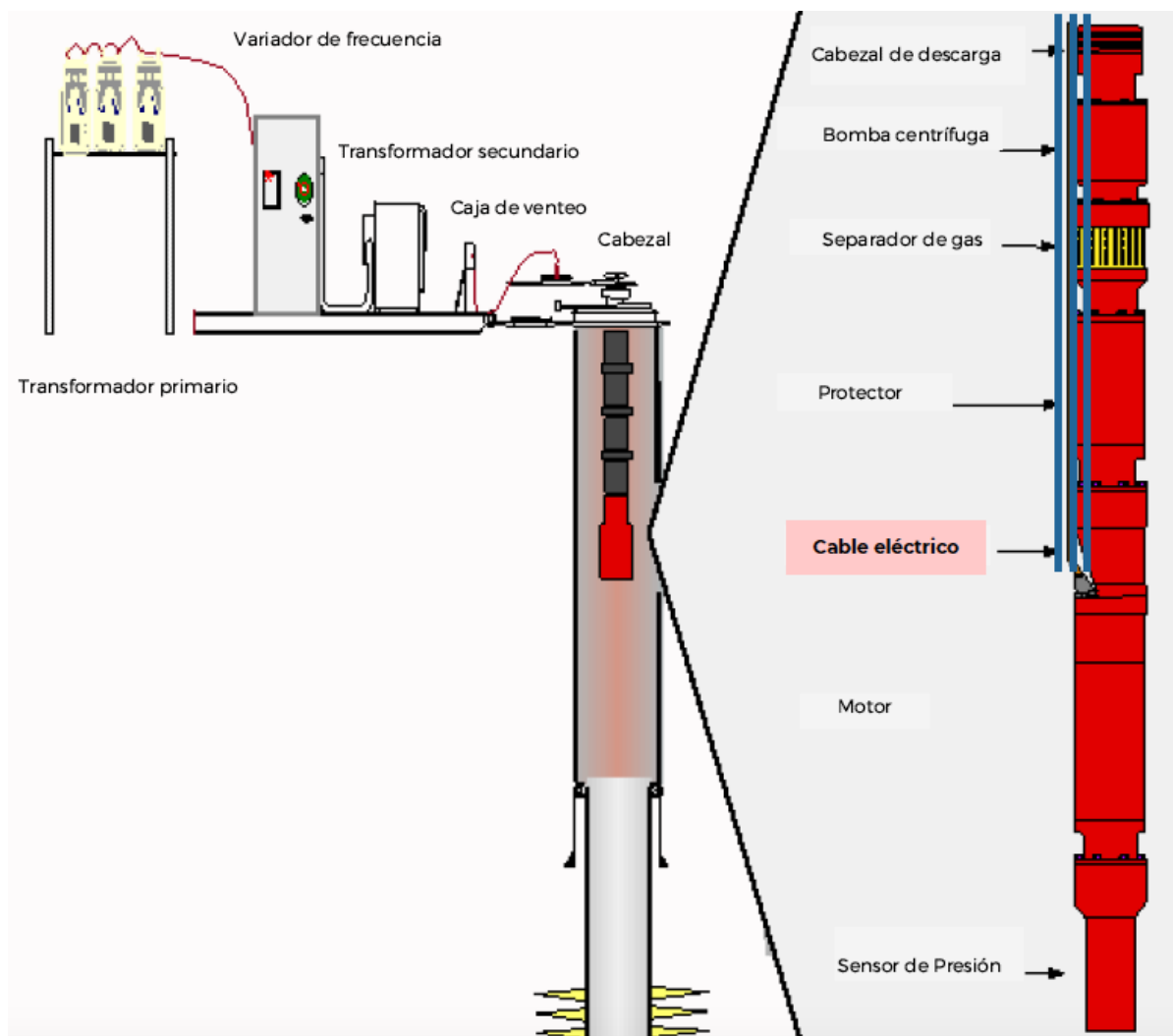


Figura 2. Instalación convencional de BES.

Fuente: Mecanismos de levantamiento artificial, 2017.

8. ANEXO B: RESULTADOS

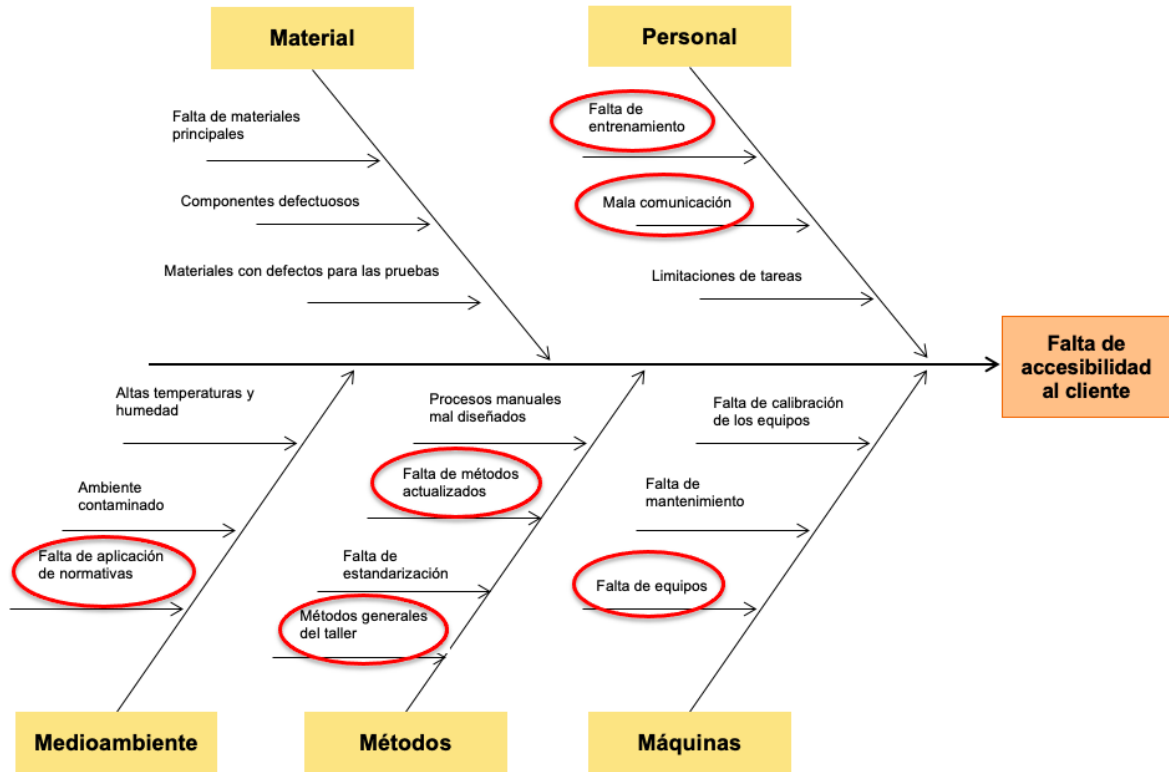


Figura 3. Diagrama de Causa y Efecto

Certificación de Entrenamiento		
Nombre del trabajador: _____		
Fecha de contratación: _____		
Nombre del capacitador: _____		
Fecha del día 21: _____		
Área: _____		
Preparación de Entrenamiento	Sí/No	Detalle
Bienvenida		
Recorrido por el taller		
Políticas generales		
Presentaciones y ubicación de su puesto de trabajo		
Capacitación de Procesos		
Conocimiento general de macro procesos		
Montaje de carrete		
Inspección de cable		
Pruebas eléctricas e hidrostáticas		
Empalme		
Rebobinado		
Embajale y etiquetado		
Capacitación para la comunicación		
Responsabilidad e importancia del trabajo en equipo		
Comunicación abierta entre todo el personal		
Seguridad dentro de la planta y asuntos ambientales		
Limpeza y Orden		
Limpeza de maquinaria		
Limpeza en el lugar de trabajo		
Orden en la planta		
Especificaciones de orden al finalizar la jornada		
_____ ha sido entrenado y capacitado en las tareas listadas		
_____	_____	
Firma del Jefe de Operaciones	Fecha	
_____	_____	
Firma del empleado capacitado	Fecha	

Figura 4. ‘Checklist’ propuesto para entrenamiento del personal



Figura 5. Simulación en FlexSim modelo actual

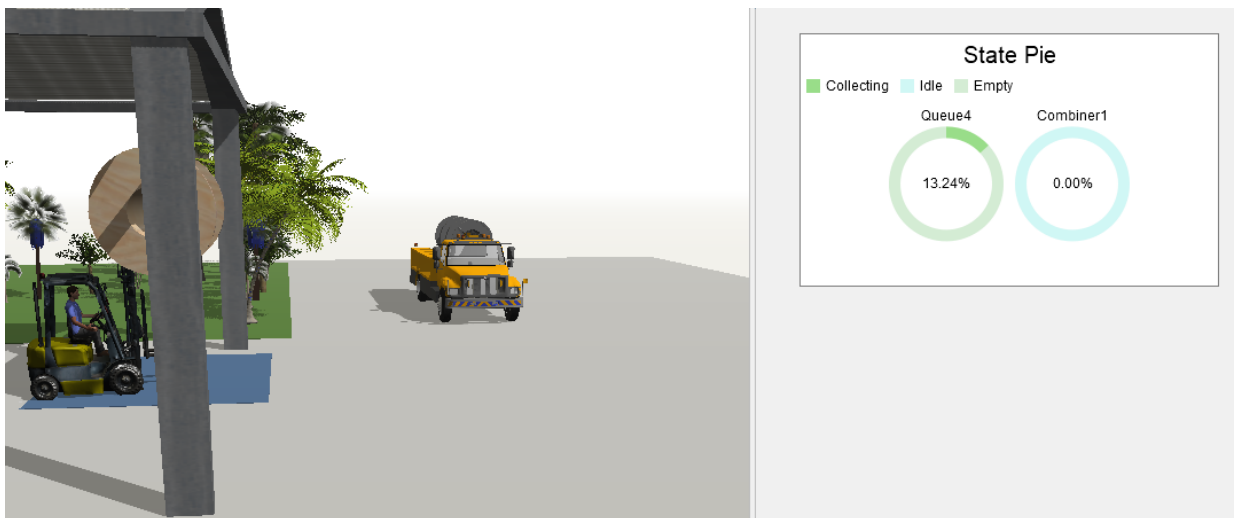


Figura 6. Resultados de simulación en FlexSim modelo actual



Figura 7. Simulación en FlexSim modelo con segunda línea de reparación

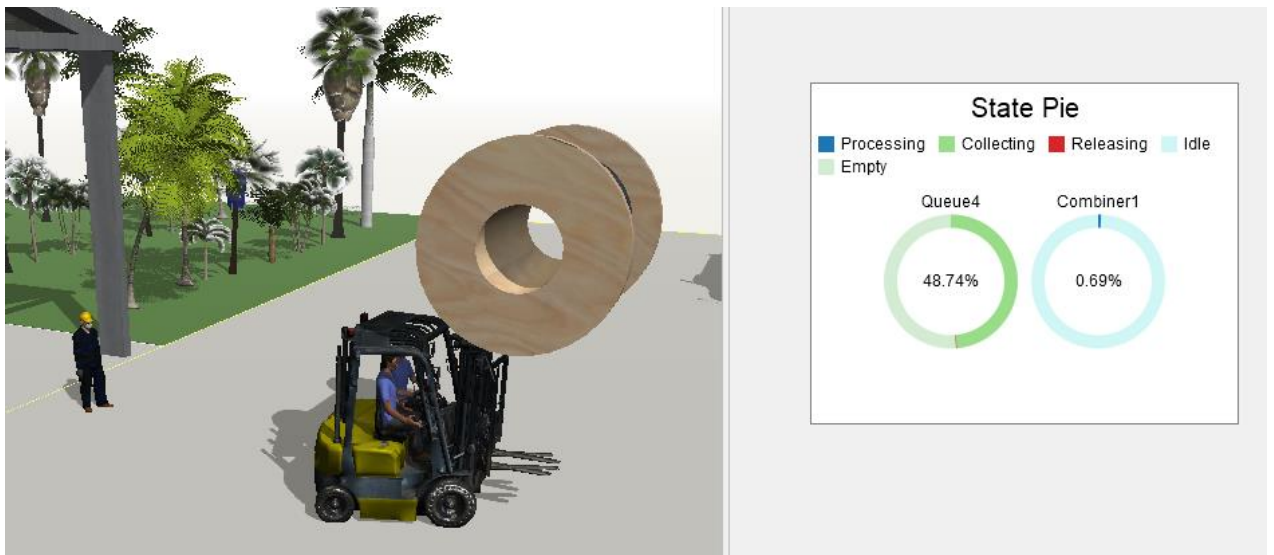


Figura 8. Resultados simulación en FlexSim modelo con segunda línea de reparación