

Implementación de la metodología DMAIC- Seis Sigma en el envasado de licores en Fanal

Implementation of the methodology DMAIC-
Six Sigma in packaging of liquor in Fanal

Esteban Pérez-López¹
Minor García-Cerdas²

Fecha de recepción: 21 de octubre del 2014
Fecha de aprobación: 29 de enero del 2014

Pérez-López, E; García-Cerdas, M. Implementación de la metodología DMAIC-Seis Sigma en el envasado de licores en Fanal. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 3, Julio-Setiembre 2014. Pág 88-106.

- 1 Máster en sistemas modernos de manufactura. Bachiller en Laboratorista químico. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: estebanperezlopez@gmail.com
- 2 Máster en sistemas modernos de manufactura. Bachiller en Administración de empresas. Ingeniero de calidad. Correo electrónico: minorgar@gmail.com

Palabras clave

DMAIC-Seis Sigma; mejora; eficiencia; productividad; cero defectos; envasado; licores; OEE.

Resumen

El presente artículo trata sobre la propuesta de mejora de la eficiencia en la línea de envasado de pet en la Fábrica Nacional de Licores (Fanal), empleando la metodología DMAIC-Seis Sigma. El trabajo se realizó con el fin de solucionar el problema que presentaba la línea de envasado de licores en envase pet, la cual no estaba operando a su máxima capacidad por deficiencias en la línea. Durante el diagnóstico de la situación se pudo determinar que en la línea de envasado de licores en pet se tenían tiempos efectivos de producción muy bajos, exceso de paros en la línea, las máquinas de cada subproceso no alcanzan en ningún momento su capacidad máxima de producción, defectos recurrentes en calidad, procesos repetitivos y desgastantes por parte del personal y no existe capacidad para dar abasto con los picos en temporadas de alta de demanda, entre otros.

Se proponen algunas soluciones como: medir y monitorear la eficiencia de cada máquina en la línea con un indicador efectivo como el OEE (eficiencia general de los equipos), controlar las paradas no obligatorias de manera que el proceso sea más fluido y expedito, automatizar algunos subprocesos en la línea de manera que los operadores no tengan que realizar trabajos que una máquina puede hacer con facilidad y a menor costo. En síntesis, con la mejora conseguida por medio de la metodología DMAIC-Seis Sigma en la línea de envasado de licores en pet de Fanal se logra pasar de un OEE de 47% al inicio a uno de 80% al final de las mejoras implementadas (entrenamiento al personal de mantenimiento y de la línea, así como la creación del plan de mantenimiento), lo que ofrece una solución integral al problema presentado y permite cubrir la demanda en el período de mayor venta; además de permitir la reducción de tiempos muertos en el proceso y una mayor utilización de los recursos instalados y del recurso humano involucrado, de manera tal que se optimiza a su máximo rendimiento la capacidad de la línea productiva, generándole mayores ingresos anuales a la empresa.

Key words

DMAIC; Six Sigma; improvement; efficiency; productivity; zero defects; packaging; liquor; OEE.

Abstract

This article discusses the proposal for improvement of efficiency in pet packaging line in fanal using six sigma dmaic methodology. The work was done in order to solve the problem presented packaging line pet bottle liquor, which was not operating at full capacity due to deficiencies in the line. During diagnosis of the situation, it was determined that in the packaging line pet liquor is effective times had very low production, excessive line stoppages, each thread machines not at any time reach their full potential production, quality defects in recurrent, repetitive and exhausting process by staff, there is no ability to cope with peaks in times of high demand, among others. Some solutions are proposed as measure and monitor the efficiency of each machine in the line with an effective indicator as OEE, downtime mandatory control so that the process smoother and expeditious, automate some threads on the line so that operators do not have to do work that a machine can do easily and at less cost. In short with the improvement achieved through six sigma dmaic methodology in line pet liquor packaging of fanal, it fails to pass an OEE of 47% at baseline to 80% OEE at the end of the improvements implemented (staff training and line maintenance, and the creation of the maintenance plan), which offers a comprehensive solution to the problem presented and to cover demand in the selling period, and allows reducing downtime the process and greater resource utilization installed and human resources involved, in a way that is optimized for maximum performance capacity of the production line, generating annual revenues greater.

Introducción

La línea de envasado de pet en la Fábrica Nacional de Licores (Fanal) de Costa Rica contaba con un tiempo efectivo de trabajo menor al 50% de su capacidad nominal, lo que generó pérdidas por US\$725 000 anuales en ventas no realizadas en el año 2011.

Al momento de este trabajo, la línea 2 de envasado de pet en Fanal presentaba paros constantes y excesivos en su proceso productivo, debido a ineficiencias en sus máquinas instaladas y subprocesos. Existían problemas de logística en el trasiego de materiales y una organización deficiente del recurso humano de la línea, lo que generó gran parte de los paros.

Dicha línea productiva cuenta con una envasadora automática de reciente instalación (abril 2011), para el envasado de licores en pet (presentación 365 ml). Dicha máquina se encarga del lavado, llenado y tapado de los envases, contando con una capacidad de 220 envases/minuto. A pesar de su alta capacidad de envase, no había sido posible ponerla a operar a su máxima capacidad por cuellos de botella en la línea, aparentemente por problemas de sincronización con la "encajonadora" (máxima capacidad 144 envases/minuto) y el proceso manual de sellado de las cajas de producto terminado de dicha línea productiva, lo cual hacía que la línea estuviera operando a un 50% de su capacidad. La maquinaria estaba subutilizada, existía baja productividad en el proceso, y esto provocaba que no se percibieran los ingresos esperados como utilidades anuales.

Dado este panorama surgió la necesidad de mejorar dicho proceso, para lo cual acudimos a la implementación de la metodología DMAIC-Seis Sigma, para la mejora radical de procesos productivos, la cual detallamos en este artículo.

El método aplicado, que se denomina DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar, controlar), utiliza herramientas estadísticas, además de dispositivos que observan las variables de los procesos y sus relaciones, que ayudan a gestionar sus características.

El enfoque Seis Sigma

Seis Sigma, según López (2011), es un enfoque revolucionario de gestión que mide y mejora la calidad. Ha llegado a ser un método de referencia para, al mismo tiempo, satisfacer las necesidades de los clientes y lograrlo con niveles próximos a la perfección. Pero ¿qué es exactamente Seis Sigma?

Dicho en pocas palabras, es un método basado en datos para llevar la calidad hasta niveles próximos a la perfección; es diferente de otros enfoques ya que también corrige los problemas antes de que se presenten. Específicamente, se trata de un esfuerzo disciplinado para examinar los procesos repetitivos de las empresas.

Literalmente cualquier compañía puede beneficiarse del proceso Seis Sigma. Diseño, comunicación, formación, producción, administración, pérdidas, etc., todo entra dentro de su campo. Pero el camino no es fácil. Las posibilidades de mejora y de ahorro de costos son enormes, pero el proceso Seis Sigma requiere el compromiso de tiempo, talento,

El fundamento de DMAIC-Seis Sigma

Lean y Seis Sigma son metodologías que comparten una misma filosofía y objetivo, pero han tenido un desarrollo diferente. Las herramientas y el enfoque también han sido diferentes: según Lean Six Sigma México (2011) Lean busca ante todo eliminar desperdicio de los procesos y reestructurarlos para hacerlos más eficientes, rápidos y ágiles a la hora de responder a las necesidades de los clientes. El tiempo transcurrido total (*lead time*) es la principal métrica sobre la que trabaja. Las herramientas son más visuales y la ejecución se estructura normalmente de forma más explosiva (*kaizen events*). Seis Sigma persigue también la mejora de los procesos aunque en un sentido más amplio y menos definido a priori: calidad, eficiencia, niveles de servicio. Metodológicamente está más ordenado y hace uso extensivo de los datos para entender el comportamiento de los procesos e identificar mejoras. Lean Six Sigma combina la estructura metodológica y herramientas de análisis de datos de Seis Sigma con las herramientas de proceso y principios de Lean. Los papeles tradicionales de GB y BB del mundo de Six Sigma y los de especialistas en Lean se combinan en un mismo líder de mejora continua, que acerca a los proyectos y a los equipos las herramientas más adecuadas en cada caso.

dedicación, persistencia y, por supuesto, inversión económica.

Un típico costo de no calidad -errores, defectos y pérdidas en los procesos- puede suponer el 20% o 30% de las ventas. El campo es amplio, incluso sin llegar al nivel Seis Sigma (3,4 errores o defectos por millón de oportunidades), las posibilidades de mejorar significativamente los resultados son ilimitadas. Solamente será necesario que la organización ponga a disposición sus capacidades y proceda de manera consistente con sus recursos.

“En términos estadísticos, el propósito de Seis Sigma es reducir la variación para conseguir desviaciones estándar muy pequeñas, de manera que prácticamente la totalidad de sus productos o servicios cumplan, o excedan, las expectativas de los clientes” (Pande et al., 2004).

El comienzo de Seis Sigma

Es esencial que el compromiso con el enfoque Seis Sigma comience y permanezca en la alta dirección de la compañía. La experiencia demuestra que cuando la dirección no expresa su visión de la compañía, no transmite firmeza y entusiasmo, no evalúa los resultados y no reconoce los esfuerzos, los programas de mejora se transforman en una pérdida de recursos válidos. El proceso Seis Sigma comienza con la sensibilización de los ejecutivos, para llegar a un entendimiento común del enfoque y comprender los métodos que permitirán a la compañía alcanzar niveles de calidad hasta entonces insospechados.

El paso siguiente consiste en la selección de los empleados, profesionales con capacidad y responsabilidad en sus áreas o funciones que van a ser intensivamente formados para liderar los proyectos de mejora. Muchos de estos empleados tendrán que dedicar una parte importante de su tiempo a los proyectos, si se quiere obtener resultados significativos.

La formación de estos líderes tiene lugar en cuatro sesiones de cuatro días cada una, a lo largo de un periodo de 12 semanas, durante el cual trabajarán en un proyecto concreto de mejora que los capacitará como candidatos a una nueva profesión, *black belts* como implantadores de estas avanzadas iniciativas de calidad. Esta formación, impartida por

expertos, incluye la selección de un proyecto en la primera semana y la aplicación de lo aprendido a dicho proyecto antes de la sesión siguiente, mediante un equipo de mejora.

Para alcanzar el nivel *black belt* los candidatos tienen que demostrar los resultados conseguidos en el proyecto, y este nivel los capacita para continuar liderando nuevos equipos para nuevos proyectos de mejora.

El método Seis Sigma

El método Seis Sigma, conocido como DMAIC, consiste en la aplicación, proyecto a proyecto, de un proceso estructurado en cinco fases: definir, medir, analizar, mejorar, controlar.

En la fase de *definición* se identifican los posibles proyectos Seis Sigma, que deben ser evaluados por la dirección para evitar la infrautilización de recursos. Una vez seleccionado el proyecto, se prepara su misión y se selecciona el equipo más adecuado, asignándole la prioridad necesaria.

La fase de *medición* consiste en la caracterización del proceso identificando los requisitos clave de los clientes, las características clave del producto (o variables del resultado) y los parámetros (variables de entrada) que afectan el funcionamiento del proceso y las características o variables clave. A partir de esta caracterización, se define el sistema de medida y se mide la capacidad del proceso.

En la tercera fase, *análisis*, el equipo analiza los datos de resultados actuales e históricos. Se desarrollan y comprueban hipótesis sobre posibles relaciones causa-efecto utilizando las herramientas estadísticas pertinentes. De esta forma, el equipo confirma los determinantes del proceso, es decir, las variables clave de entrada o “pocos vitales” que afectan a las variables de respuesta del proceso.

En la fase de *mejora*, el equipo trata de determinar la relación causa-efecto (relación matemática entre las variables de entrada y la variable de respuesta que interese), para predecir, mejorar y optimizar el funcionamiento del proceso. Por último, se determina el rango operacional de los parámetros o variables de entrada del proceso.

La última fase, *control*, consiste en diseñar y documentar los controles necesarios para asegurar que

lo conseguido mediante el proyecto Seis Sigma se mantenga una vez que se hayan implantado los cambios. Cuando se han logrado los objetivos y la misión se dé por finalizada, el equipo informa a la dirección y se disuelve.

Las herramientas para Seis Sigma

En los proyectos Seis Sigma se utilizan dos tipos de herramientas. Unas, de tipo general como las siete herramientas de calidad, carta de proyecto (*project chart*), plan de recolección de datos (*data collection plan*), matriz de asignación de responsabilidades (*raci*), análisis de interesados (*stakeholders analysis*), matriz de proveedores-entradas-procesos-salidas-clientes (*sipoc*), mapa de la cadena de valor (*value stream mapping*) que se emplean para la recogida y tratamiento de datos. Las otras, específicas de estos proyectos, son herramientas estadísticas, entre las que cabe citar los estudios de capacidad del proceso, análisis Anova, contraste de hipótesis, diseño de experimentos, simulación de procesos y también algunas utilizadas en el diseño de productos o servicios, como el QFD y AMFE.

Estas herramientas estadísticas que hace unos años estaban solamente al alcance de especialistas, son hoy accesibles para personas sin grandes conocimientos de estadística. La disponibilidad de aplicaciones informáticas sencillas y rápidas, tanto para el procesamiento de datos como para los cálculos necesarios para su análisis y explotación, permiten utilizarlas con facilidad y soltura, concentrando los esfuerzos de las personas en la interpretación de los resultados, no en la realización de los complejos cálculos que antes eran necesarios.

Los resultados de Seis Sigma

Conceptualmente, los resultados de los proyectos Seis Sigma se obtienen por dos caminos. Los proyectos consiguen, por un lado, mejorar las características del producto o servicio, permitiendo obtener mayores ingresos, y por otro, el ahorro de costos que se deriva de la disminución de fallos o errores y de los menores tiempos de ciclo en los procesos.

Así, las experiencias de las compañías que han decidido implantar Seis Sigma permiten indicar desde cifras globales de reducciones del 90% del tiempo de ciclo, o 15 mil millones de dólares de ahorro en 11 años (Motorola), aumentos de productividad del 6% en dos años (Allied Signal), hasta los más recientes de entre 750 y 1000 millones de dólares de ahorro en un año (General Electric).

Términos importantes de ingeniería

La razón de producción (*throughput th*) es la salida promedio de un proceso de producción (máquina, estación de trabajo, línea, planta), por unidad de tiempo (hora, minutos, segundos), se define como la razón de producción del sistema o *throughput rate*. Para una línea o para una estación de trabajo, definimos la razón de producción como la cantidad promedio de partes o productos (no defectuoso) producidos por unidad de tiempo.

La capacidad (*capacity*) es el límite superior de la razón de producción. En la mayoría de los casos, el trabajar a capacidad o sobre ella provoca que los sistemas sean inestables.

El tiempo de ciclo (*cycle time ct*) de una ruta dada es el tiempo promedio desde que inicia el trabajo hasta que alcanza el punto final de la ruta.

El *takt time*, en alemán, *takt* significa "medida". Puede también ser interpretado como "ciclo", "ritmo" o "régimen". Ciertas definiciones refieren a *takt* como la batuta de un director de orquesta. El tiempo *takt* es la cadencia a la cual el cliente exige que su empresa fabrique sus productos. El tiempo *takt* es el número de minutos de trabajo por día, divididos por el número de pedidos por día.

N_p = número de pedidos cliente por día (unidades / día)

N_m = número de minutos trabajados por día (minutos / día)

El tiempo *takt* (minutos / unidad) = n_m / n_p

El *Lean manufacturing* utiliza el tiempo *takt* como la cadencia a la cual un producto terminado debe fabricarse para satisfacer la petición del cliente.

Ventajas del tiempo *takt*

La utilización del tiempo *takt* permitirá:

La sincronización de la producción con los pedidos cliente: permite la planificación en flujos tirados. La sobreproducción es limitada, las existencias también.

Una producción estable sin interrupciones: el ritmo de la fabricación es el tiempo *takt*. Una cadencia regular de trabajo para los operadores. Uno incurre en reducto y una mejor identificación de los problemas del proceso. Una concepción de los procesos y puestos de trabajo facilitada. Comprobación inmediata de la realización, la motivación de los empleados es facilitada.

Prerrequisitos del tiempo *takt*

Una mano de obra flexible y polivalente, aceptando evoluciones sobre los procesos y a los puestos de trabajo. Procesos y equipamientos de trabajo flexibles, dado el hecho de que una variación del tiempo *takt* puede aumentar o disminuir al personal necesario, para las mismas operaciones.

En conclusión, el tiempo *takt* es una herramienta poderosa, pero no debería ser cambiado continuamente. Debe ser utilizado según las previsiones de pedidos cliente a largo plazo, más que según las previsiones a corto plazo, diarias o semanales.

La Eficiencia General de los Equipos (OEE)

La Eficiencia General de los Equipos (EGE) o el Overall Equipment Efficiency (OEE, por sus siglas en inglés), según Eficiencia General de los Equipos (2011), es un indicador clave de realización *kpi* utilizado para medir cómo se aprovecha la capacidad productiva de un proceso de fabricación. De hecho, el OEE es una razón que compara la producción efectiva con la capacidad de producción teórica.

El cálculo de la OEE es una combinación de tres razones principales:

Disponibilidad, rendimiento y calidad sobre un período dado (día, semana, mes, etc.).

OEE = razón de disponibilidad x razón de rendimiento x razón de calidad

Razón de disponibilidad del OEE

- razón de disponibilidad = tiempo real de producción / tiempo de producción teórica.
- tiempo real de producción (horas) = tiempo de producción teórica (horas) – tiempo de parada (horas).
- tiempo de producción teórica (horas) = número de horas trabajadas.
- tiempo de parada (horas) = número de horas de parada de las máquinas.

Razón de rendimiento del OEE

- razón de rendimiento = tiempo de ciclo x producción efectiva / tiempo real de producción.
- tiempo de ciclo (horas/item) = 1 / capacidad de producción máxima (ctd/hora).
- producción efectiva = cantidad de productos fabricados efectivamente (productos rechazados incluidos).

Razón de calidad del OEE

- razón de calidad = (producción efectiva - producción rechazada) / producción efectiva.
- producción rechazada (ctd) = cantidad de productos que no han alcanzado el nivel de calidad requerido.

Metodología de trabajo

El trabajo se inició con la idea de presentar una propuesta de mejora a la línea de envasado de pet de Fanal, dados los paros constantes que presentaba, con un tiempo efectivo de trabajo del 50% de su capacidad. Además, el trabajo se enfocó en la totalidad de la línea de envase pet, en la cual se estudió cada uno de los subprocesos que la componen y se evaluó su capacidad de producción, sin considerar el área de producción de licores ni el almacenamiento de producto terminado.

En concreto, los pasos a seguir para el desarrollo del trabajo en la línea de envasado de pet del área de producción de Fanal abarcan los pasos recomendados para la implementación de la metodología Seis Sigma (DMAIC):

Definir el problema que aqueja a la línea de envasado de licores en pet

Se definió la problemática que aqueja la línea de pet por medio de entrevistas al jefe de producción, al encargado de la línea de pet así como otros operarios de la línea, y principalmente mediante las visitas realizadas a la planta, la toma de datos y la observación del funcionamiento en la línea.

Medir la situación actual de la línea de envasado de pet

Se realizó un estudio detallado en cada una de las etapas del proceso en estudio, registrando las variables que se consideraban de interés para la consecución idónea del proyecto. Entre la toma de datos predominan los tiempos de producción por envase, en cada una de las etapas y transportes involucrados, los paros en la línea y los defectos, entre otros.

Analizar los datos e información recopilada de la línea de envasado de pet

Para el análisis de datos se empleó análisis estadístico, generación de gráficos y el cálculo de métricas, indicadores y aplicación de herramientas ingenieriles para estimación de rendimiento, capacidad, eficiencia, utilización, etc., con el fin de cuantificar qué tan crítico es el problema, cuál es el foco de la problemática y cuál podrá ser la mejor solución para recomendar e implementar.

Mejorar la situación imperante en la línea de envasado de pet

Se propuso la implementación de las mejoras recomendadas, con el fin de aumentar la eficiencia de la línea, disminuir los tiempos muertos, llevar a cero los desperdicios, los defectos y eliminar algunos puestos operativos innecesarios, así como colocar bandas o sistemas automáticos en los puntos indicados como necesarios.

Controlar las mejoras realizadas al proceso de envasado de pet

Se propuso el monitoreo constante de la línea con indicadores más robustos y herramientas Lean Six

Sigma, que permitan estabilizar en el tiempo la operación de la línea en estudio.

Implementación de Seis Sigma

Fase definir - DMAIC

En el diagnóstico de la situación actual y como punto de partida del proyecto, en la etapa *definir* se elaboró el *project chart*, en el que se expone cada una de las situaciones que justifican la necesidad de una intervención inmediata en la línea de envasado de pet.

Del *project chart* resaltamos que la línea de envasado de pet (365 ml) opera a menos de un 50% de su capacidad, lo que implica que se dejan de producir 880 cajas/día y se generan pérdidas por US\$725 mil anuales. La meta será aumentar el rendimiento en la línea de 70 pet/min a 105 pet/min. El formato del *project chart* seguido para el trabajo es el establecido en el libro *Las claves prácticas de Seis Sigma* (Pande et al., 2004).

Como parte del estudio previo en *definir*, se realizó el estudio de Proveedores, Entradas, Procesos, Salidas y Clientes del proceso (SIPOC, por sus siglas en inglés: suppliers, inputs, process, outputs, customers). Los detalles del análisis SIPOC presentan a Destilería de alcoholes en Fanal, Cocorisa, Distincomer, Gozaka y Continental International Network S.A., como los principales proveedores en cada caso, de lo que definimos como entradas del proceso: el licor, las cajas de cartón, los envases, las etiquetas y las tapas, respectivamente. El proceso de envasado en pet es la presentación en 365 ml, la cual sale en cajas de 24 unidades hacia los clientes, llámese bodega de producto terminado, centro de distribución o directamente el consumidor final.

También se llevó a cabo el análisis de interesados del proceso (*stakeholders analysis*), con el fin de considerar quienes de una u otra forma intervienen en el proyecto y formarían parte de la toma de decisiones que oportunamente se deberán tomar. Con este análisis se obtiene que el Jefe de producción y el Jefe de la línea son, respectivamente, los principales interesados en la ejecución de este trabajo; y son partes esenciales en el suministro de información para su ejecución.

Además, se efectuó el análisis de asignación de responsabilidades del proceso, que de una u otra

forma fueron parte del proyecto. Para este análisis, se utilizó una matriz raci (responsable, aprobador, consultado, informado) o matriz de asignación de responsabilidades.

En dicho análisis, aparecen como responsables (r) de la ejecución de las actividades descritas nosotros como encargados del proyecto; este rol realiza el trabajo y es responsable de su realización. Lo más habitual es que exista solo un r, pues si existe más de uno, entonces el trabajo debería subdividirse.

Aparece como aprobador (a) el Jefe de producción; este rol se encarga de aprobar el trabajo finalizado y a partir de ese momento se vuelve responsable por él. Solo puede existir una por cada tarea. Es la persona que debe asegurar que las tareas se ejecuten.

Tenemos también como personal consultado (c) a diferentes figuras, dependiendo de la característica de la actividad a ser ejecutada por el responsable. Este rol posee alguna información o capacidad necesaria para terminar el trabajo. Se le informa y se le consulta información (comunicación bidireccional).

Aparecen también en cada etapa el o los informados (i), dependiendo de la relevancia que pueda tener para ellos la actividad realizada. Este rol debe ser informado sobre el progreso y los resultados del trabajo. A diferencia del consultado, la comunicación es unidireccional.

Las principales actividades citadas fueron el estudio detallado del proceso de envasado de pet, investigación de proveedores, investigación de costos de operación, estudio de horas efectivas laboradas, determinación de porcentaje de *scrap*, determinación de porcentaje de utilización y determinación del indicador OEE de medida de eficiencia de la línea, entre otras.

Fase medir - DMAIC

Ya propiamente en la etapa de toma de datos y mediciones, se diseñó una estrategia de recolección por medio del *data collection plan*, en el que se definen las mediciones por realizar y se contesta en cada caso el qué, por qué, quién, cómo y dónde realizar dicha medición. Aquí se mencionan aspectos de suma importancia que es necesario medir, como son los tiempos en cada etapa del proceso, el porcentaje de *scrap*, porcentajes de paros, rechazos de calidad, capacidad efectiva, el *takt time* y el *throughput*, entre

otros. En este caso, los responsables de medir las variables en estudio fuimos nosotros como encargados del proyecto, por lo que medimos todo en el lugar, directamente en la línea de envasado de pet, en el área de producción de Fanal.

Como paso fundamental para la puesta en marcha de un trabajo de esta índole, se tiene la útil herramienta del *value stream mapping* o mapeo de la cadena de valor, del cual se obtienen aspectos de suma relevancia tales como: el flujo de información en el proceso, las etapas del proceso, los tiempos de valor agregado y de no valor agregado en el proceso, el inventario en proceso, el número de operarios en la línea, así como una serie de indicadores de eficiencia, utilización y capacidad de la línea, entre otros. Dicho mapeo nos permite ver a grandes rasgos que la máquina *monoblock* es la que en la actualidad está limitando la capacidad de la línea, debido a su baja capacidad efectiva de producción, ya que la capacidad real del *monoblock* es de 134 pets/min y es menor que las capacidades reales de cada uno de los módulos restantes, además de generar los mayores tiempos de paro de la línea, diariamente.

En el análisis de la situación actual de la línea se obtienen aspectos de gran relevancia, como que del total del tiempo de ciclo, que son 8,5 minutos, obtenido al sumar cada uno de los tiempos de las etapas que comprenden el proceso productivo del envasado de pet, solamente 2,1 minutos corresponden a actividades que agregan valor al producto final, mientras que 6,4 minutos no agregan valor al producto, por lo que es importante valorar qué tan necesarias se hacen esas actividades que no agregan valor, o de qué forma se pueden disminuir esos tiempos. De igual manera, analizar si son necesarios los nueve empleados que intervienen en esta línea productiva o si existen posibilidades de reubicar personal a otras áreas, entre otros.

Fase analizar - DMAIC

La empresa Fanal presenta la inquietud de que su línea de envasado #2, dedicada a los envases de 365 ml conocidos como pet, no puede cumplir con la demanda de producción del mes de diciembre.

Según la opinión de los personeros de la empresa, esta situación está dada a la máquina empacadora, conocida como encajadora, la cual tiene una capacidad nominal de 144 pet/minuto, mientras que la

unidad llenadora, conocida como *monoblock*, tiene una capacidad nominal de 220 pet/minuto.

Sumado a esto, la preocupación se centra, también en opinión de los personeros, en que la línea se para constantemente por problemas en la encajonadora.

Como primer paso, se procede a comparar la capacidad teórica de la línea contra la capacidad efectiva. Para la determinación de la capacidad teórica se utilizó la simulación, por medio del *software* Arena. Para poder realizar la simulación, se hace necesario, como primer paso, tanto la toma de datos de las diferentes etapas del proceso como de los

transportes de un módulo a otro, es así como se procede a medir la alimentación de pets, tiempo de lavado-llenado-tapado, transporte a la etiquetadora, etiquetado, transporte a la encajonadora, encajonado, transporte a la selladora y sellado. Una vez que se obtienen los datos se hace necesario determinar la distribución (normal, binomial, etc.) que estos presentan. Este proceso se hace por medio del *software* estadístico Minitab u otros como SPSS. Estos pasos son necesarios antes de la programación en Arena.

Los resultados de la simulación se pueden observar en la figura 1, donde se muestra la comparación entre ambas capacidades. Como se observa en este gráfico, se nota que la capacidad efectiva de la línea se encuentra en un 31% por debajo de la capacidad nominal de la línea, evidenciando el problema en la línea.

Al comparar ahora la demanda mensual contra la capacidad nominal (ver la figura 2), se observa que la demanda es un 50% de la capacidad de la línea, menos para el mes de diciembre, cuando casi se igualan. Esto lleva a pensar que se están presentando situaciones en la línea que no le permiten lograr su máxima capacidad, para poder cubrir la demanda del mes de diciembre (período de mayores ventas del año).

Para observar que la línea tiene la capacidad de producción, se comparan el *takt time* contra el *throughput* (ver la figura 3). Como se recordará, el

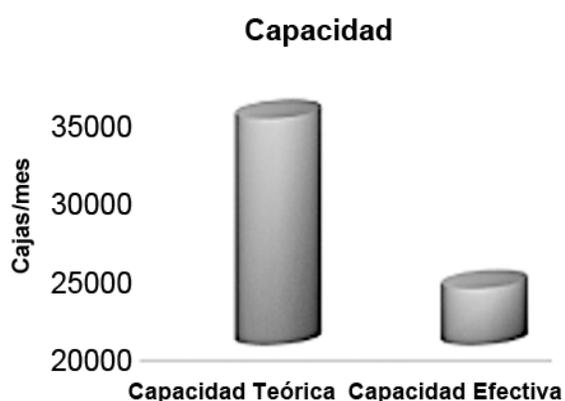


Figura 1. Gráfico comparativo de capacidad del proceso de envasado de pet

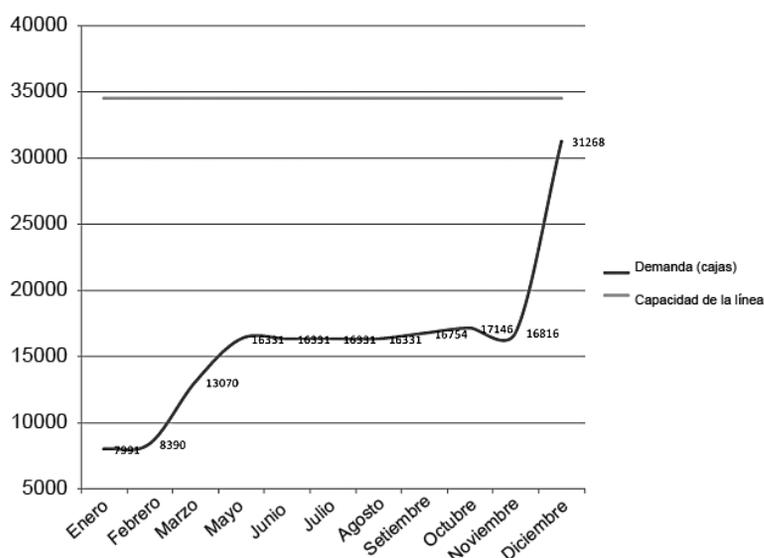


Figura 2. Gráfico comparativo de capacidad versus demanda de pet.

takt time corresponde a la velocidad a la que se debe producir para cubrir la demanda (minutos/caja), mientras el *throughput* es la tasa de producción (cajas/minuto) con la que se ha venido laborando. Para efectos prácticos y poder comparar el *takt time* con el *throughput*, se procede a realizar un ejercicio matemático de dividir uno entre el *takt time*, con lo que se pretende igualar las unidades y poder hacer las comparaciones. En esta comparación se utilizan dos clases de *throughput*, una es las horas laboradas programadas y otra las horas disponibles del mes (*throughput* corregido); esto se debe a que la empresa Fanal labora un turno de 8 horas, en el cual los empleados disfrutan de 1.25 horas de descanso; en el caso del *takt time* se toman en cuenta las 8 horas diarias, ya que este es el tiempo disponible

para la producción. En ambos casos se obtienen valores superiores a los exigidos por la demanda, aún en el mes de diciembre en el cual se tiene el mayor consumo de producción, el *takt time* es similar al *throughput* con el que se ha venido laborando; esto lo que indica es que la línea tiene la capacidad de producir lo requerido. Adicionalmente, se puede concluir de la figura 3 que la empresa ha estado produciendo más de lo demandado, ya que está utilizando todo el tiempo programado y obtiene valores de *throughput* altos.

El problema principal, aunque la línea está cumpliendo con la demanda tal y como se muestra en la figura 4, se debe al tiempo que está utilizando para ello, lo cual provoca que los costos operativos aumenten, ya que la línea tiene la capacidad de

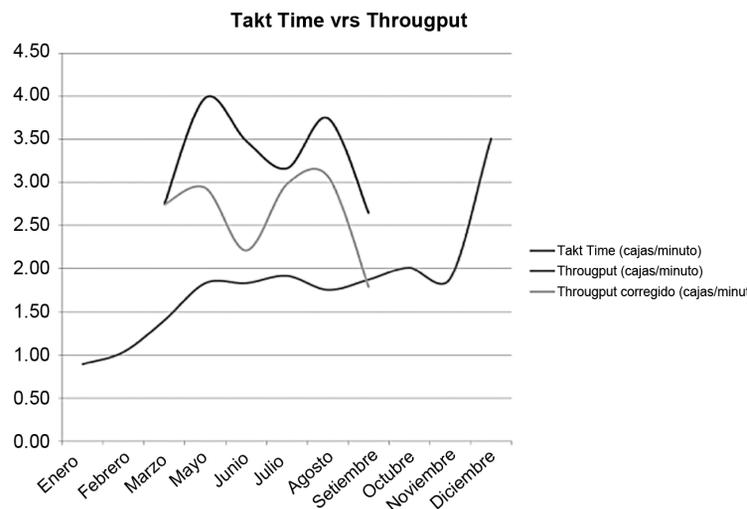


Figura 3. Gráfico comparativo de *takt time* versus *throughput*.

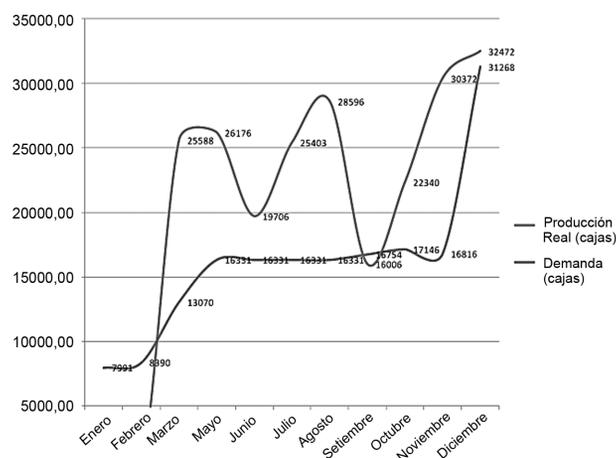


Figura 4. Gráfico comparativo de producción real versus demanda.

generar la misma producción casi en la mitad del tiempo que está durando actualmente.

Adicionalmente, de esta figura se puede observar que Fanal está procediendo a prepararse para la demanda del mes de diciembre, al ir elevando la producción de los meses previos, una estrategia que conduce a aumentar los costos de inventario. Esta situación se da a pesar de contar con una línea capaz de producir lo necesario en el mes de diciembre; esto se debe a la idea general de que no puede cubrir esta demanda, sin entrar a estudiar a fondo los problemas de la línea.

Para poder evaluar de una mejor forma qué es lo que está sucediendo en la línea, se utiliza el indicador OEE, en el cual se mide el tiempo efectivo de la línea (obtenido al restarle a las horas disponibles, los tiempos de paros, reprocesos, pérdidas de calidad y pérdidas de eficiencia, entre otros), además se pueden observar aquellas causas que están provocando paros o pérdidas de tiempo. Al igual que el *throughput*, este indicador se calcula utilizando tanto el tiempo programado como el tiempo disponible en el mes (ver figura 5). El resultado del OEE refleja qué porcentaje del tiempo (disponible o programado), se invirtió en la elaboración eficiente del producto demandado por el cliente.

En la figura 5 se observa que ambos OEE no llegan a un 50% de utilización de las horas, ya sea programadas o disponibles. Estos resultados refuerzan la

noción de que el principal problema es el tiempo que están durando en producir.

Los factores que influyen en la determinación del OEE incluyen las horas mensuales, que corresponde a las horas disponibles para la producción, tomando como base un turno de 8 horas, durante seis días, en cuatro semanas. Las horas programadas, que se refiere a las horas reales que fueron destinadas a la producción en la línea. Si a las horas programadas se le restan las horas que la línea se detiene por fallos, nos da las horas disponibles y si a estas se le resta el tiempo que la línea se detiene por causas externas (falta de materiales, etc.), nos da las horas que la línea está funcionando. A las horas en funcionamiento se le deben restar los tiempos de reproceso (horas que se trabaja y no se genera producto nuevo, ya que se están reparando algunos problemas). La pérdida por velocidad (diferencia entre las horas que se necesitaron para la producción y las horas teóricas que se necesitarían para obtener el producto, tomando como base el módulo más lento) y las horas que corresponden a la producción rechazada (problemas de calidad), nos da la cantidad de horas trabajadas u horas en las cuales la línea generó productos nuevos.

Lo que se menciona como OEE1 corresponde al OEE que toma en cuenta todo el tiempo disponible en el mes, mientras que en el OEE2 solo se contempla el tiempo programado. Es importante mencionar

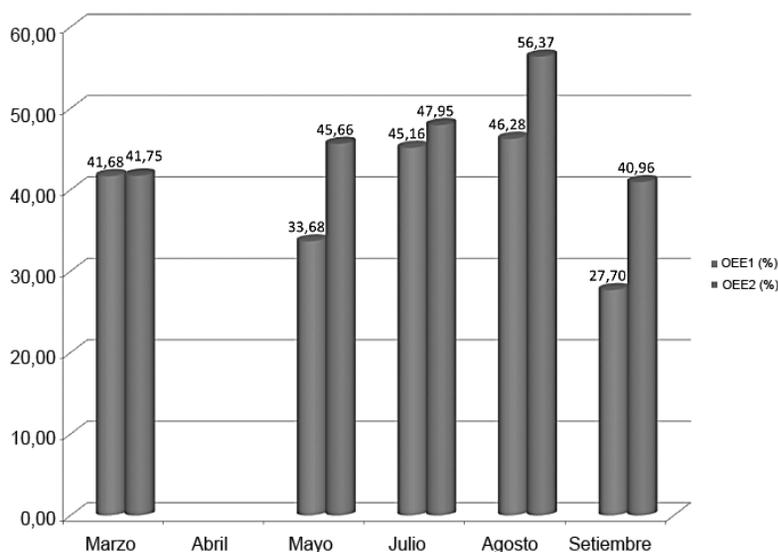


Figura 5. Gráfico comparativo de OEE1 versus OEE2.

que para fines prácticos de la línea, todas las determinaciones se hacen en horas (cambiando el formato clásico de OEE), es así como al mencionar “problemas de calidad” se determinan cuántas unidades fueron rechazadas y se calculan las horas necesarias de producción de dichas unidades, tomando como base el módulo de menor velocidad de la línea.

De manera similar, para la pérdida de velocidad de la línea lo que se hace es determinar el tiempo en que saldría la producción realizada, tomando como base la velocidad del módulo más lento de la línea, y se compara contra las horas reales laboradas.

Las horas perdidas por causas externas se refiere a todos aquellos rubros (falta de material de empaque, permisos, etc.) que detienen la línea, pero que no pueden ser controlados por esta.

Como se observa en ambos casos, estos indicadores OEE no llegan al 50%. Para este estudio se ha decidido utilizar el OEE2, ya que toma en cuenta únicamente las horas programadas para producción. En la figura 6 se detalla el OEE por módulo y su impacto sobre la línea en general con un 47% de OEE.

De la figura 6 deducimos que la máquina *monoblock* es el cuello de botella real en la línea, ya que su OEE es de un 70%, mientras los demás módulos presentan OEE superiores al 99%. Esta figura también ayuda a aclarar que si bien nominalmente la encajonadora es el cuello de botella al tener una

velocidad de 144 pets/minuto, en este momento no es la sección de la línea que está afectando la producción, sino que los problemas están en la unidad *monoblock*, siendo éste el cuello de botella funcional de la línea debido a que está menos tiempo disponible. En la figura 7 se observan en detalle las causas que han provocado pérdida de eficiencia de la línea.

De este análisis se obtiene que las causas externas, las fallas en la línea y la pérdida de velocidad son los principales rubros que están causando la pérdida de eficiencia de la línea envasadora. Como podemos observar en la figura 8, estos representan respectivamente un 32, 31 y 28% del tiempo perdido en la línea. De estas tres causas, solamente las externas no son controlables por parte del personal de producción de la línea de pets.

Análisis

Al inicio se tomó como base la hipótesis manejada por la jefatura de producción de ese momento, la cual aseguraba que la deficiencia en la línea de envasado de pet se debía a la baja capacidad de operación de la encajonadora, la cual opera en forma semiautomática y fue adaptada a la línea de pet proveniente de la línea de litro de vidrio, y se afirmaba que esta etapa era el cuello de botella y la restricción en la línea. El área de Producción de Fanal quería que con este proyecto les ayudáramos a demostrar la necesidad de cambiar la encajonadora para poder operar la línea a su máxima capacidad.

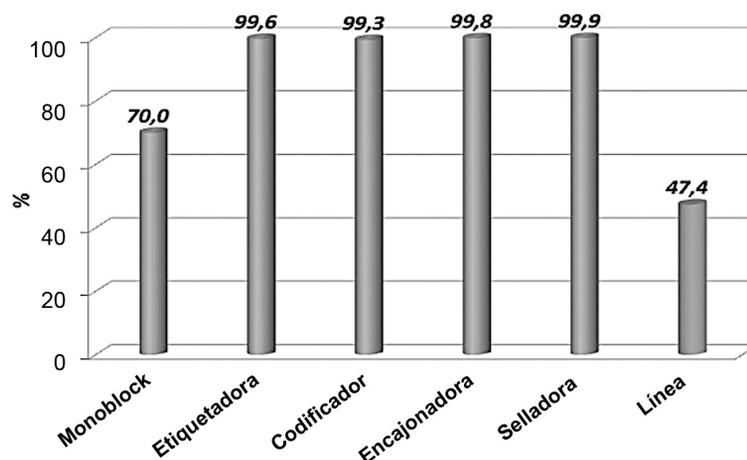


Figura 6. Gráfico ilustrativo de pérdida de eficiencia por módulo.

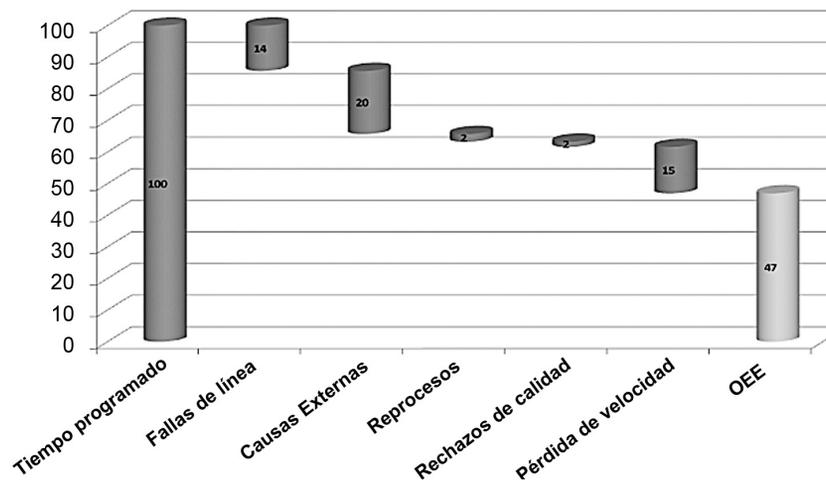


Figura 7. Gráfico ilustrativo de pérdida de eficiencia en la línea.

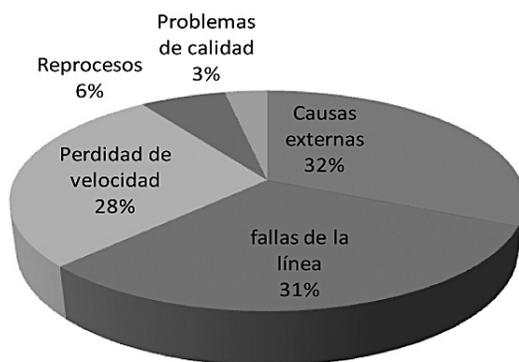


Figura 8. Gráfico ilustrativo de las causas de pérdida de eficiencia en la línea.

Según el estudio realizado, se observa que las causas externas son el principal rubro que está provocando la pérdida de eficiencia de la línea envasadora, siendo la falta de materiales la principal causa externa. Esta situación se da debido al complejo proceso de licitación al que Fanal debe someterse como dependencia del Estado.

Como podemos observar en la figura 9, las fallas en la línea es la segunda causa de paros, concentrándose un 90% en la máquina *monoblock*. Estos resultados concuerdan con lo observado anteriormente, de lo cual se desprende que el *monoblock* es el módulo que tiene el OEE más bajo de toda la línea productiva; con esto se corrobora que el *monoblock* es el cuello de botella real de la línea de envasado. Esto, no por su baja capacidad sino por los constantes paros sufridos en esta sección de la línea.

Dado que el principal problema está en el *monoblock*, se realizó un análisis mediante un diagrama causa-efecto de los principales motivos de paros en la línea, causados en la máquina *monoblock* (ver figura 10).

Al priorizar y categorizar las causas según el análisis causa-efecto, se tiene que la causas de mediciones de volumen, temperatura y humedad ambiental son consideradas constantes (c) porque no cambiarán los factores del proceso. Las causas como métodos de programación de la producción en la línea, y los envases y las tapas defectuosas en materiales, son consideradas como ruido (r), porque son factores que causan distorsión en el proceso pero que no pueden ser influenciados directamente.

Las causas de ajustes y mantenimiento de las máquinas y falta de entrenamiento del recurso humano son consideradas como variables (v), porque son las variables decisivas que pueden ser influenciadas y deben ser mencionadas en el alcance de la iniciativa.

En cuanto al análisis de fallos y efectos, conocido como FMEA por sus siglas en inglés, se confirma que el problema en los ajustes del *monoblock* es la principal causa de paros en la línea, dado que se obtiene un valor del índice de riesgo (rpn) de 100. Esto se debe a su alta severidad, su alta ocurrencia y a que no hay controles que permitan su detección temprana.

Para profundizar un poco más en las causas de paro generadas en la línea de envasado de pet, y específicamente en la máquina *monoblock*, se generó el

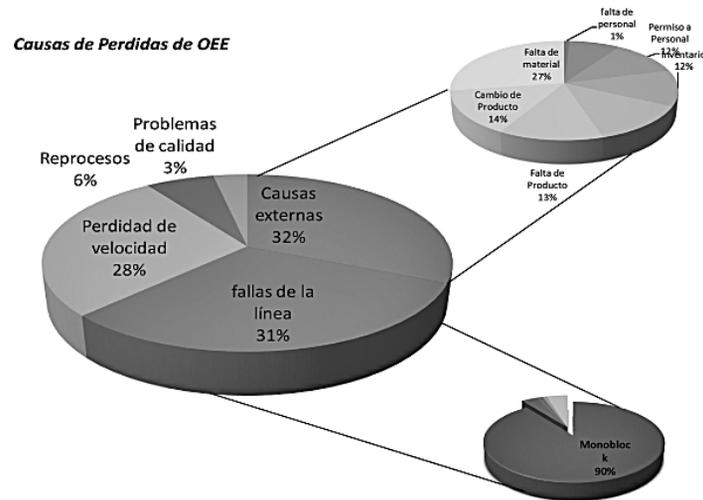


Figura 9. Gráfico ilustrativo de las causas de pérdida de eficiencia en la línea.

Ishikawa envasado PET. Monoblock

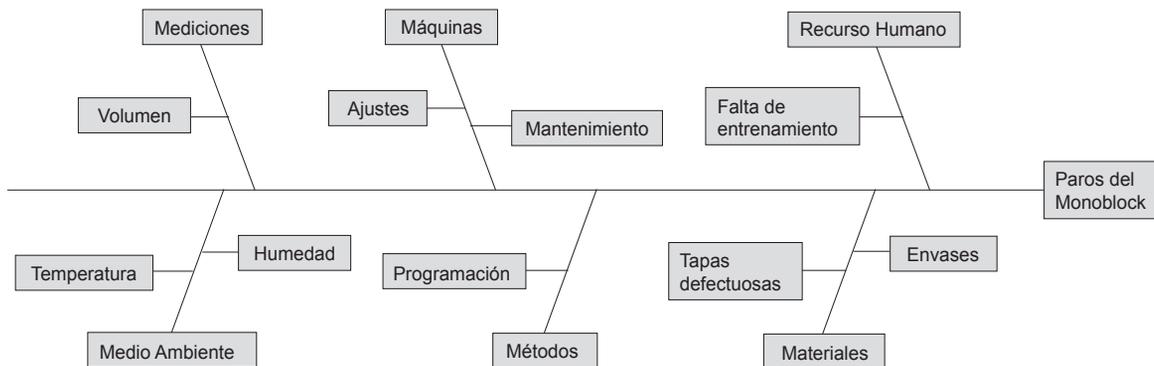


Figura 10. Diagrama causa-efecto de paros en *monoblock*.

análisis con un diagrama de Pareto mostrado en la figura 11.

Como se observa en la figura 11, el 75% de las causas de paro del *monoblock* se origina en diversos problemas de ajustes de este equipo. Dicho módulo es el de más reciente adquisición por parte de Fanal y no se ha logrado ponerlo a trabajar de forma eficiente; además el módulo se encuentra con garantía y ante cualquier falla que se presente se debe pedir autorización al fabricante para poder trabajar en su reparación. Otro de los problemas presentes es la escasez de los repuestos necesarios, por lo que en muchas ocasiones se han debido fabricar en las instalaciones de Fanal; estas dos

situaciones provocan que se alarguen los tiempos de paro.

Además, por esta situación los operadores de la línea proceden a operar a menor velocidad la capacidad de la línea, lo que representa un 28% de pérdida en la eficiencia de la línea, por temor a provocar un daño al módulo.

También de la información obtenida se depende que la empresa Fanal está utilizando para su planeación una estrategia de nivel, es decir, mantiene su capacidad y mano de obra estable a través del tiempo. Esta estrategia lleva a tener niveles altos de inventarios, es esto lo que busca la empresa, ya que por los problemas que presenta en la actualidad para el mes de diciembre no logra cubrir la demanda.

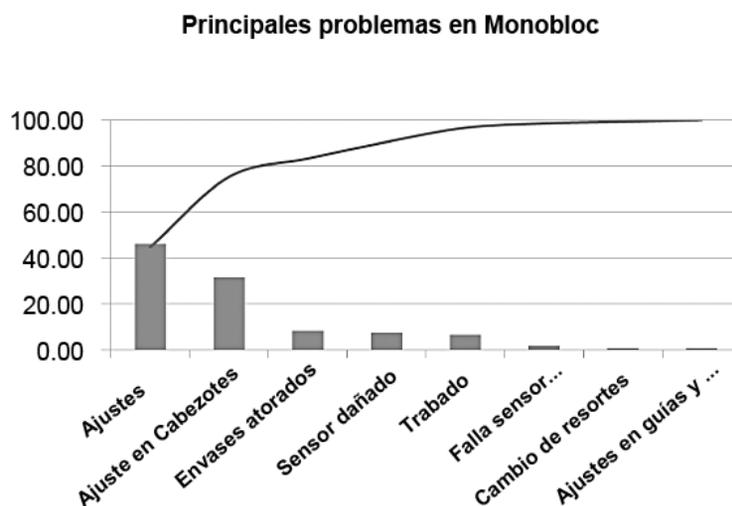


Figura 11. Gráfico ilustrativo de los problemas en *monoblock*.

Dado el estudio de capacidad de la línea, esta puede trabajar con una estrategia de persecución, en la cual su capacidad se va adaptando a la demanda; según Iscea Latin America (2011), esta estrategia tiene la ventaja de que mantiene bajos los niveles de inventario. Fanal tiene la ventaja de que esta estrategia no la hace incurrir en grandes gastos, ya que lo único que necesita es redistribuir al personal para cubrir las necesidades; este reacomodo no implica el pago de jornada extraordinaria, debido que la línea puede cubrir las necesidades del mercado, según los datos de capacidad de la envasadora y los pronósticos de ventas.

Consideraciones de la situación encontrada

- La línea de pets cuenta con la capacidad instalada para cubrir la demanda.
- La tasa de producción es el doble de la velocidad de demanda.
- El porcentaje de eficiencia de la línea (OEE) es de un 47%.
- Los principales factores de pérdida de OEE son: causas externas, fallos de la línea y pérdida de velocidad.
- El OEE por módulo indica que el *monoblock* es la sección más deficiente de la línea por sus constantes paros para realizar ajustes.
- El *monoblock* es el cuello de botella actual de la línea.

- El *monoblock* requiere de nuevas estrategias de mantenimiento tanto preventivo como correctivo, de manera que no se incurra en tantos paros por este motivo.

Fase mejorar - DMAIC

Dado el análisis de la situación actual de la línea de envasado de pet, se procede con la implementación del entrenamiento adecuado del personal de mantenimiento, así como del personal de la línea en general, de forma tal que permita la familiarización con la máquina *monoblock*. Se debe promover la estandarización de procesos y herramientas a utilizar a la hora de brindar mantenimiento al *monoblock*, además de provocar un mayor acercamiento con el proveedor de la máquina, de manera que permita la asistencia inmediata en caso de fallos que no sean de fácil solución para el personal de Fanal. Para ello se coordinó con el Jefe de producción, el Jefe de mantenimiento y el Jefe de la línea de envasado de pet, para la programación de capacitaciones virtuales y de campo en la línea 2, a fin de que todos los involucrados en la línea conozcan el detalle estructural, los cuidados operativos y de mantenimiento preventivo y correctivo requeridos en la máquina *monoblock* y que están establecidos en el manual de dicho equipo.

La etapa de capacitación virtual servirá para cubrir las necesidades que es necesario sean suplidas por

el proveedor del equipo, que es de origen brasileño, y se realizará por medio de conferencias *on line*.

Además se implementó una mejora en la coordinación de la logística de los materiales en la línea, incluyendo todo lo referente a su trasiego, ya que fue común observar la falta de materiales, lo cual ocasionaba paros en la línea. Entre los principales materiales faltantes estaban: envases, tapas, cajas de cartón, etiquetas y licor.

Para evitar el faltante de materiales, se coordinó con el jefe de la línea de envasado de pet, de forma tal que se coordine con la bodega de materiales y con el departamento de compras a fin de que estén disponibles en la línea los materiales requeridos y que no se vea interrumpida la producción por este motivo.

Por tratarse de tres los departamentos involucrados (producción-bodega de materiales-compras), es necesaria la comunicación fluida entre las partes para lograr solventar el problema presentado por el tema de la falta de materiales. Dicha coordinación será promovida por el jefe de la línea, a través del jefe de producción, por ser el responsable de cumplir con la eficiencia de la línea y así poder dar abasto con la demanda.

Fase control - DMAIC

Luego de lo implementado, se procedió a analizar y controlar nuevamente el comportamiento de la línea. Para ello comenzamos con un nuevo análisis de FMEA, en el que se obtuvo una mejora en el número de prioridad de riesgo (RPN por sus siglas en inglés), luego de haber implementado las acciones de entrenamiento, creación del plan de mantenimiento y las herramientas de control.

También mediante el análisis con el OEE, según se observa en el gráfico de la figura 12, en el mes de diciembre se da una mejoría considerable en ambos OEE, los cuales llegan a un 56% y un 80% para el OEE1 y OEE2 respectivamente, contra un 38% y un 47% promedio de los meses anteriores. La mejoría del OEE está dada por una disminución de los paros por causas externas, así como una mejoría en la velocidad de operación.

En la figura 12 no aparecen los datos de abril, ya que no hubo producción por la instalación de la máquina *monoblock* en la línea.

Observando el desglose de las causas del OEE, se puede concluir que tanto las fallas en la línea como las causas externas siguen siendo las principales causas de pérdida de eficiencia de la línea, pero resulta importante mencionar que la pérdida de velocidad ya no es un factor que impacte en el OEE, al no tener pérdida de eficiencia por esta causa.

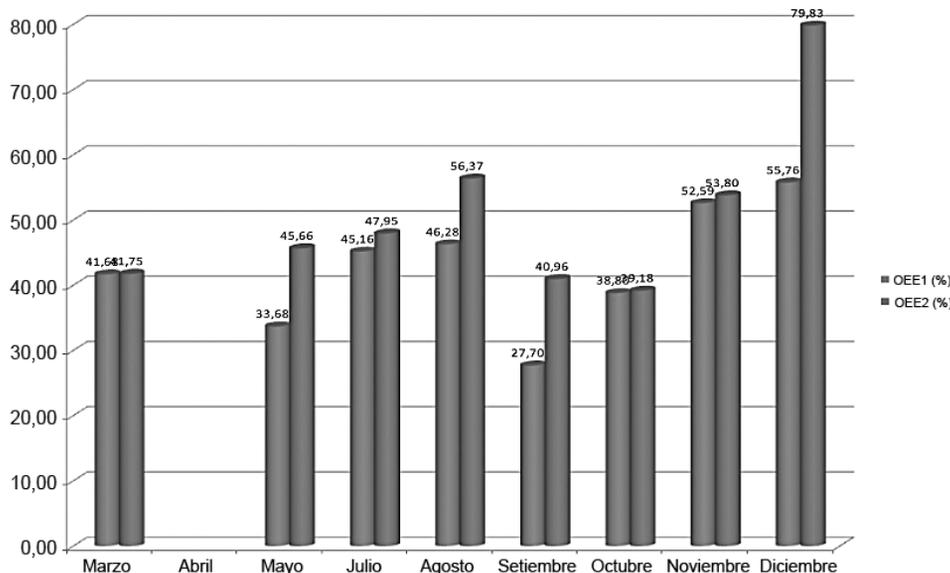


Figura 12. Gráfico comparativo oee1 versus OEE2 hasta diciembre de 2011.

Al comparar los resultados del OEE del mes de diciembre de 2011 contra el promedio del OEE de los meses anteriores, se observa una considerable mejora, al pasar de un 47% a un 80% de eficiencia en la línea y teniendo mejora en la eficiencia en todos los rubros analizados, excepto en calidad, pero no es significativo, tal como se observa en el cuadro 1.

En cuanto a las causas de la mejora que se ha dado, se observa en la figura 13 una considerable disminución en la participación de la pérdida de velocidad y de las causas externas, que disminuyeron en 18 y 14 horas mensuales, respectivamente. La mejora en la pérdida de velocidad se debe principalmente al entrenamiento recibido por el personal de la línea para lograr la operación de esta a su máxima capacidad, así como a la mejora observada en el personal de mantenimiento. En cuanto a las causas externas, se observa una gran mejora en

el proceso de adquisición de materiales, generado principalmente por una mayor coordinación entre las áreas de producción y compras.

En cuanto a las fallas en la línea, se observa una mejora al pasar de 20 a 14 horas en tiempo perdido por mes y es importante mencionar que en diciembre se presentó un evento puntual en el *monoblock* ("trabonazo"), el cual representó un paro de 6.25 horas; esta misma causa es la que hace que los problemas de calidad pasen de 2 a 3 horas de tiempo perdido.

Además, si comparamos los OEE por módulo (ver figura 14), se observa la mejora obtenida en el *monoblock* al pasar de 70% a 80% de OEE, mientras los demás módulos se mantienen constantes. Este progreso, junto con los destacados en la figura anterior, representa una mejora de 33% en el indicador de OEE general de la línea, al pasar de 47% a 80%.

Cuadro 1. Tabla comparativa del OEE.

	Promedio marzo-noviembre 2011	Diciembre 2011
Tiempo programado	100	100
Fallas de línea	14	12
Causas externas	20	5
Reprocesos	2	0
Rechazos de calidad	2	3
Pérdida de velocidad	15	0
OEE	47	80

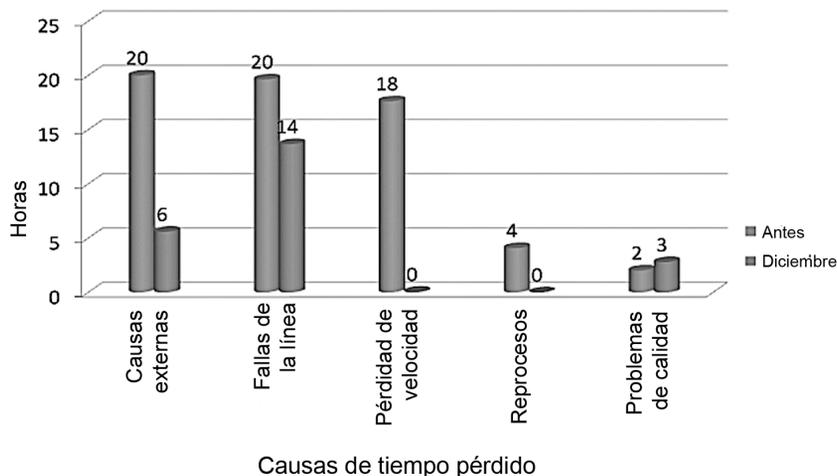


Figura 13. Gráfico comparativo de las causas de pérdida de eficiencia en la línea en diciembre de 2011.

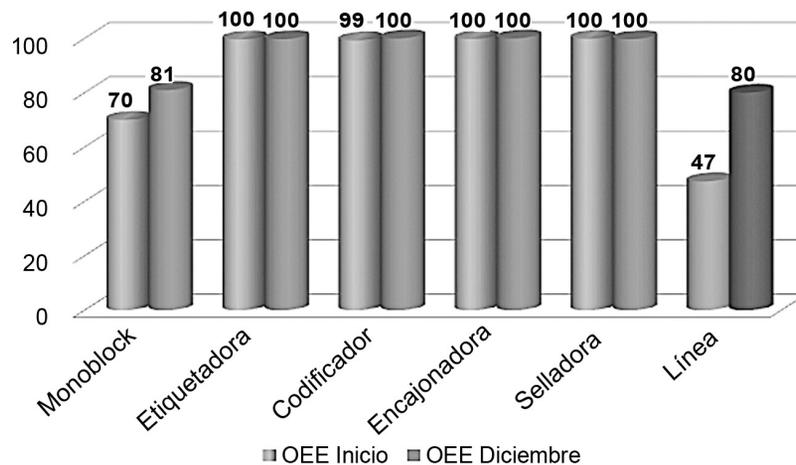


Figura 14. Gráfico comparativo de OEE por módulo.

Estas mejoras significaron para Fanal no dejar de percibir ingresos por US\$725 mil en 2011. Además, no se hace necesaria la inversión en la compra de una nueva máquina encajonadora para cumplir con la demanda, según la hipótesis inicial manejada por el área de producción.

Conclusiones

La determinación de la capacidad de la línea demuestra que puede cumplir con la estimación de la demanda; la cual es de un 50% de la capacidad de producción, situación que se observa también al analizar el *tack time* y el *throughput* de la línea de pet.

La utilización del OEE como indicador de la eficiencia de la línea arroja que esta tiene un tiempo efectivo del 47%; esta situación es la que ha hecho pensar a la empresa Fanal que no puede cubrir la demanda del mes de diciembre, que se duplica con respecto a la de los meses anteriores.

El análisis del OEE arroja tres puntos que están afectando fuertemente la eficiencia de la línea: causas externas (32%), fallos en la línea (31%) y pérdida de velocidad (28%).

El principal problema en las causas externas es la falta de material, lo que en muchas ocasiones es el resultado de los trámites requeridos para adjudicar una compra, ya que, como empresa estatal, toda compra de Fanal tiene que salir a licitación, un proceso en el cual los diferentes oferentes, en caso de no ser seleccionados, tienen la opción de apelar; lo

que retrasa aún más la adquisición de los materiales necesarios.

En los fallos de la línea, se observa que el 90% están concentrados en el *monoblock*, que es el módulo de más reciente adquisición en la empresa. Muchos de los paros son causados por diferentes tipos de ajustes que deben realizar a este equipo.

La situación en esta parte de la línea se complica, ya que al ser un módulo nuevo, los técnicos no pueden proceder a trabajar en su reparación sin la previa autorización del fabricante; a fin de mantener el período de garantía del equipo.

Unido a este factor, se detecta que la pérdida de velocidad de la línea se encuentra ligada a los problemas del *monoblock*, ya que muchas veces se decide producir a una menor velocidad con el fin de prevenir algún problema mecánico en esta sección. Estas situaciones han arrojado que el cuello de botella real de la línea sea esta sección, a pesar que por diseño es una de las áreas que tiene mayor velocidad.

Se logró una mejora significativa por la correcta implementación del plan de mantenimiento adecuado para la máquina *monoblock*, lo cual se refleja en los resultados generales de OEE, que pasaron de un 47% a un 80% de eficiencia general de los equipos en la línea, luego de la implementación.

La mejora en cuanto a producción significó pasar de producir a una velocidad de 70 pets/min (promedio de marzo a septiembre de 2011) a 144 pets/min en diciembre de 2011.

La implementación de las mejoras (entrenamiento al personal de mantenimiento y de la línea, así como la creación del plan de mantenimiento) logró que se obtuvieran mayores ingresos anuales, al lograr cubrir la demanda establecida para el mes de diciembre, que era el mes crítico.

De las razones que conforman el OEE (disponibilidad, rendimiento, calidad) se trabajó principalmente en la razón de disponibilidad y en la de rendimiento, quedando como posibilidades de mejora latente el área de calidad en su totalidad, y en la razón de disponibilidad aun se puede mejorar en el rubro de causas externas (falta de producto, paros por inventario y permisos al personal, entre otros), con lo cual se observa que aún hay bastante por mejorar en cuanto a eficiencia de la línea de envasado de pet.

Bibliografía

- Aditec Ingenieros. (2011). *Modelado, simulación y optimización*. Recuperado de <http://www.aditec-ingenieros.com/arena1.html>
- Eficiencia General de los Equipos OEE. (2011). Recuperado de <http://www.free-logistics.com>
- Iscea Latin America. (2011). *Certified supply chain manager*. México: Iscea.
- Lean Six Sigma México. (2011). *Six sigma*. Recuperado de <http://www.leansixsigmamexico.com>
- López, C. (2011) *La metodología Seis Sigma ¿qué es? ¿para qué sirve? ¿cómo se aplica? ¿requerimientos para su implementación? ¿etapas de implementación?* Recuperado de <http://www.gestiopolis.com/recursos/experto/catsexp/pagans/ger/no12/6sigma.htm>
- Pande, P. S., Neuman, R. P. & Cavanagh, R. R. (2001). *Las claves prácticas de Seis Sigma*. Madrid: McGraw Hill.
- Vega Ramírez, J. (2011). *Informe de proyecto de graduación para optar por el grado de Bachiller en Ingeniería en mantenimiento industrial*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/386/1/informe.pdf>