

**PROPUESTA DE MÉTODO PARA ESTANDARIZAR EL  
AJUSTE DE MÁQUINAS DE TERMOFORMADO EN ALICO  
S.A.**

**MARÍA ALEJANDRA NAVARRETE MÁRQUEZ  
SARA RAMÍREZ MORALES**

**Trabajo de grado para optar al título de ingeniería industrial**

**Sebastián Gil Ramírez**

**Director de la división de termoformado**



**UNIVERSIDAD EIA  
ALICO S.A.  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
ENVIGADO  
AÑO 2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos, antes que nada, a nuestras familias por su apoyo incondicional y compañía en todo este proceso; a la empresa Alico S.A., por abrirnos sus puertas, y a sus empleados por la contribución y cooperación durante la ejecución de este proyecto, especialmente a Sebastián Gil y a María Isabel Giraldo; y, por último, a los profesores de la Universidad EIA que nos han formado académicamente a lo largo de la carrera y guiado en el desarrollo del trabajo, especialmente a Jairo Alberto Gómez.

# CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	1
1. PRELIMINARES .....	1
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN .....	1
1.1.1 Contexto y caracterización del problema .....	1
1.1.2 Formulación del problema.....	3
1.1.3 Justificación .....	3
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	6
2.1 Objetivo General.....	6
2.2 Objetivos Específicos.....	6
3. MARCO DE REFERENCIA.....	7
3.1 Marco teórico .....	7
3.1.1 Historia del control estadístico de procesos .....	7
3.1.2 Estructura del modelo Seis Sigma .....	8
3.1.3 Herramientas del control estadístico para el control de procesos.....	9
3.2 Antecedentes.....	9
3.2.1 Antecedentes del marco teórico.....	9
3.2.2 Antecedentes de la empresa .....	10
4. METODOLOGÍA .....	11
5. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	12
5.1 Recolección de datos.....	12
5.2 Análisis perceptual.....	13
5.3 Análisis cuantitativo .....	16
5.3.1 Análisis de regresión múltiple: AL-42 DOMO TORTA .....	19

5.3.2	Análisis de regresión múltiple: AL-42 BASE TORTA.....	23
5.4	Análisis del comportamiento de la productividad.....	30
6.	PRODUCTOS, RESULTADOS Y ENTREGABLES OBTENIDOS.....	34
6.1	Entregable 1: Valores operacionales de los parámetros de ajuste de la muestra.....	34
6.2	Entregable 2: Método para estandarizar el ajuste de las máquinas de termoformado en Alico S.A.....	36
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	40
8.	REFERENCIAS .....	42
9.	ANEXOS.....	44

# LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Método 5W + 1H .....	2
Tabla 2: Descripción de parámetros.....	12
Tabla 3: Clasificación estudio de criticidad .....	14
Tabla 4: Resultados estudio de criticidad .....	15
Tabla 5: Clasificación variables según su dependencia .....	16
Tabla 6: Clasificación de variables según su naturaleza .....	17
Tabla 7: Abreviación variables independientes .....	18
Tabla 8: Resumen estadística descriptiva AL-42 DOMO TORTA.....	31
Tabla 9: Resumen estadística descriptiva AL-42 BASE TORTA .....	32
Tabla 10: Cálculos estadística descriptiva AL-42 DOMO TORTA .....	32
Tabla 11: Cálculos estadística descriptiva AL-42 BASE TORTA.....	33
Tabla 12: Valores operacionales AL-42 BASE TORTA .....	34
Tabla 13: Valores operacionales AL-42 DOMO TORTA.....	35
Tabla 14: Datos recolectados AL-42 DOMO TORTA .....	46
Tabla 15: Datos recolectados AL-42 BASE TORTA.....	47
Tabla 16: Plantilla propuesta para la recolección de datos.....	48
Tabla 17: Información productividad al-42 BASE TORTA Septiembre 2016 – Junio 2017 .....	49
Tabla 18: Información Productividad AL-42 DOMO TORTA Septiembre 2016 – Junio 2017.....	51

# LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Interpretación del problema.....	3
Figura 2: Montos de inversión en ACTI .....	4
Figura 3: Resultado Modelo 1 .....	20
Figura 4: Resultado Modelo 2 .....	21
Figura 5: Resultado modelo 3 .....	22
Figura 6: Resultado modelo 4 .....	23
Figura 7: Resultado Modelo 5 .....	25
Figura 8: Resultado Modelo 6 .....	26
Figura 9: Resultado Modelo 7 .....	27
Figura 10: Resultado Modelo 8 .....	29
Figura 11: Resultado Modelo 9 .....	30
Figura 12: Comportamiento productividad AL-42 DOMO TORTA .....	30
Figura 13: Comportamiento productividad AL-42 BASE TORTA .....	31
Figura 14: Árbol de pérdidas .....	44
Figura 15: Plantilla parámetros de proceso máquinas automáticas.....	45

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
7.1 Anexo 1: Árbol de pérdidas .....	44
7.2 Anexo 2: Plantilla parámetros de proceso máquinas automáticas .....	45
7.3 Anexo 3: Datos recolectados AL-42 DOMO TORTA.....	46
7.4 Anexo 4: Datos recolectados AL-42 BASE TORTA .....	47
7.5 Anexo 5: Plantilla propuesta para recolección de datos.....	48
7.6 Anexo 6: Información productividad AL-42 BASE TORTA Septiembre 2016 – Junio 2017 49	
7.7 Anexo 7: Información Productividad AL-42 dOMO TORTA Septiembre 2016 – Junio 2017 51	

## RESUMEN

En la división de termoformado de la empresa Alico S.A., los operarios manipulan arbitrariamente los parámetros de ajuste al momento de cambiar de referencia y de turno, es por esto que se encontró una oportunidad de mejora en cuanto al método, debido a que lo hacen basándose únicamente en su criterio y experiencia, generando así tiempos perdidos y deterioro de la máquina.

Para el desarrollo de este proyecto, se utiliza como marco teórico el modelo de Seis Sigma y su método DMAIC y se comienza con una recolección de datos históricos de las variables que influyen en el proceso y con base en éstos se realiza un análisis cuantitativo donde se utilizan herramientas de control estadístico como regresión múltiple, después se realiza un análisis perceptual y, por último, un análisis del comportamiento de la productividad a lo largo del tiempo por medio de estadística descriptiva.

Como resultado del trabajo se lograron identificar los parámetros que más influyen en la productividad para las referencias seleccionadas y se identifica que hay un espacio de mejora según el comportamiento histórico de la productividad. Además se entregan los valores operacionales propuestos para el ajuste de máquina de la muestra estudiada y se describe un método para estandarizar el ajuste de máquinas con el fin de que la empresa pueda replicar este estudio para incrementar la productividad por medio de su implementación.

Palabras clave: termoformado, estandarizar, parámetros de proceso, productividad, regresión múltiple.



## **ABSTRACT**

In the thermoforming division of Alico S.A., the operators manipulate arbitrarily the parameters every time that there are shift and references changes, that is why an opportunity for improvement in the method was found due to they do that based only on their own experience and judgment, which generates lost time and machine deterioration.

In the develop of this Project, it used the Seis Sigma method as conceptual framework, it begun with a historical data collection on productivity and on the parameters influencing the process behavior then it performed a quantitative analysis on that data using statistical methods as multiple regression,also descriptive statistics on the behavior of productivity over time and finally it performed a perceptual analysis about the knowledge of operators in the effect of the operating parameters on product quality and process performance .

As the work outcome, it was possible to find the most influencing parameters on productivity in the references of product studied and it found a space of improvement after the historical behavior of the productivity. In addition it presents a proposal of working values to set the machine behavior on the sample studied and it describes a method to standardize the operation way of the machines so the company can use this study to increase productivity through its implementation

Keywords: thermoforming, standardize, process parameters, productivity, multiple regression.

## INTRODUCCIÓN

En la división de termoformado de la empresa Alico S.A. no existe una clara definición de los parámetros con los que opera su maquinaria, se observa que cada vez que hay cambios de operario y de referencia, se manipulan arbitrariamente basándose únicamente a criterio del nuevo operario, lo cual genera el 50% de los tiempos perdidos por paros no programados en la planta.

Debido a que la experiencia de los operarios no puede ser considerada por si sola como lo más confiable para ajustar las máquinas sin haber hecho estudios que den los mejores valores de los parámetros para optimizar los resultados, se encontró una oportunidad de mejora en cuanto al método para estandarizar el ajuste de maquinaria con el fin último de aumentar la productividad de la empresa.

A lo largo de este trabajo se busca proponer un método para estandarizar el ajuste de máquinas tomando como marco teórico el modelo Seis Sigma y su método DMAIC y se toma como muestra las referencias de mayor rotación de la división. Se realiza una recolección de datos del proceso que contiene los valores operacionales de los parámetros de ajuste de máquina (variables de entrada) y de las unidades producidas por hora (variable de salida); se realiza un análisis perceptual para determinar la criticidad de los parámetros; después se realiza un análisis cuantitativo donde se utiliza la regresión múltiple para determinar los parámetros más influyentes en la productividad y por último se realiza un análisis de comportamiento de la productividad a lo largo del tiempo utilizando estadística descriptiva.

# 1. PRELIMINARES

## 1.1 CONTEXTUALIZACIÓN

### 1.1.1 Contexto y caracterización del problema

Según autores como Ruíz (2012), “La falta de estandarización en los procesos hace que las empresas disminuyan su desempeño para poder progresar dentro del medio y posicionarse en un mercado más global. En otras palabras, la ausencia de implementación de herramientas para el mejoramiento hace que no tengan niveles de calidad de excelencia”. Bajo esta premisa las organizaciones que son consideradas competitivas a un nivel alto son aquellas que consiguen ser eficaces optimizando sus procesos y asegurando la calidad de sus productos por medio de estrategias para el mejoramiento y estandarización de los procesos productivos.

Alico S.A. es una empresa colombiana dedicada a la fabricación de empaques especializados para diferentes sectores como el alimenticio, químico, farmacéutico, aseo, textil, construcción e industrial, con estructuras plásticas simples y complejas. Actualmente cuenta con tres divisiones de producción: fundas, empaques y termoformado. (“Alico - NOSOTROS,” 2016).

Termoformado es una serie de procesos para conformar láminas o películas de plástico sobre un molde, aplicando calor y presión (Kalpakjian & Schmid, 2002) y es uno de los procesos más versátiles y económicos disponibles en el sector del plástico para conformar los polímeros, pero la obtención de un producto final uniforme es difícil por el método de producción. Con el fin de mejorar el rendimiento y disminuir los costos en la fabricación del producto final, los parámetros de operación deben ser optimizados (Li, Cheng, Shen, & Xuan, 2015). Aunque el proceso de termoformado no sea complejo, usualmente se encuentran dificultades para encontrar los valores de los parámetros del proceso apropiados debido a la cantidad de variables involucradas (Ghobadnam, Mosaddegh, Rezaei Rejani, Amirabadi, & Ghaei, 2014) .

En la división de termoformado de Alico S.A. se trabaja 3 turnos al día, cada uno de 8 horas y se observa que cada vez que hay cambio de turno se presentan variaciones en los parámetros de la máquina, pues el operario hace ajustes según su criterio y se ha evidenciado que esto genera tiempos perdidos en el proceso.

La reacción rápida y eficaz ante un cambio que produzca errores en el proceso de producción puede ser moderadamente difícil y costosa, de modo que la probabilidad de que aparezca una falsa señal debe ser minimizada, en consecuencia se debe reducir la variación de los resultados sobre el objeto o las especificaciones a través de ajustes en los procesos (Runger, Lian, & Del Castillo, 2010).

Involucrar a los trabajadores debidamente en el proceso es un factor clave para lograr la estandarización en los parámetros de ajuste de estas máquinas y así lograr la disminución en los riesgos de errores, reducción de costos y facilidad de adaptación al cambio (López, 2012). Sin embargo, la experiencia de los operarios no puede ser considerada por si sola como lo más

óptimo para ajustar las máquinas sin contar con estudios que apoyen el método y sostengan una optimización en los resultados debido a que, según Cerquera (2013) una de las características del sector del plástico de Colombia es la falta de personal especializado con formación superior y capacidad para emprender desarrollos productivos competitivos.

Para la definición del problema, se utilizó el método 5W + 1H el cual se observa en la Tabla 1

Tabla 1: Método 5W + 1H  
Fuente: propia

<b>5W + 1H</b>	
<b>¿QUÉ?</b> ¿Qué hecho o problema está sucediendo?	Los operarios manipulan arbitrariamente los parámetros de ajuste.
<b>¿CUÁNDO?</b> ¿En qué momento se produce el problema?	Al momento de cambiar de referencia o cambio de turno.
<b>¿DÓNDE?</b> ¿En qué sitio o cuál es la ubicación donde se produce el problema?	En las máquinas de termoformado de Alico S.A.
<b>¿QUIÉN?</b> ¿Depende o no de la habilidad del operario?	Depende de la habilidad de los operarios.
<b>¿CUÁL?</b> ¿Cuál es la tendencia de la ocurrencia del problema o existe algún patrón de referencia asociado al fallo?	Cada que cambia de operario o de referencia.
<b>¿CÓMO?</b> ¿De qué manera cambia su estado óptimo?	Se generan tiempos perdidos debido a la manipulación.

A continuación se puede observar, por medio de la Figura 1, la manera como se interpreta el problema:

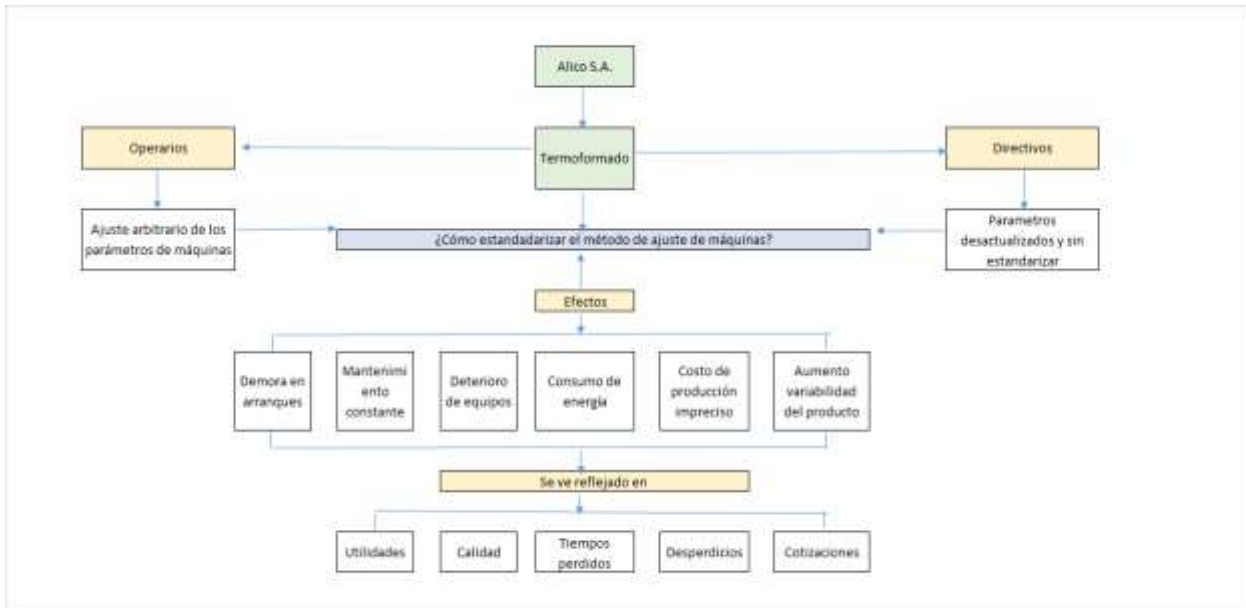


Figura 1: Interpretación del problema  
Fuente: propia

### 1.1.2 Formulación del problema

Se observa que en la división de termoformado de la empresa Alico S.A. no existe una clara definición de los parámetros con los que operan su maquinaria, por lo que se encontró una oportunidad de mejora en cuanto al método, debido a que los operarios de la planta manipulan arbitrariamente los ajustes de la máquina según su criterio y experiencia, generando tiempos perdidos y deterioro de la máquina.

Por tanto, ¿cómo estandarizar el método de ajuste de máquinas de termoformado en Alico S.A.?

### 1.1.3 Justificación

La filosofía de la gestión de la calidad se enfoca en tres componentes: planear, controlar y mejorar; en cuanto a control, es indispensable evaluar cómo los empleados están asegurando los requisitos del producto en el área operativa y, en cuanto a mejoramiento, se refiere a conseguir niveles de desempeño y calidad mayores a los que están en la actualidad (Juran & Gryna, 1957). Mediante la implementación un método para estandarizar los ajustes de los parámetros de las máquinas de la planta, se puede lograr tener un mayor control del proceso, y poder así mejorarlo por medio de su optimización.

La industria de fabricación de productos de plástico en Colombia tuvo una inversión aproximada total de 52,2 miles de millones en el año 2013 y 88,2 miles de millones de pesos en el año 2014 (ver Figura 2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), según la encuesta realizada por el DANE sobre el desarrollo e innovación tecnológica en la industria manufacturera (DANE,

2015). En esa misma encuesta, se evidencia un crecimiento muy grande cada año, lo cual demuestra que esta industria está inmersa en un mercado creciente que exige de las compañías participantes esfuerzos en el desarrollo de sus productos y procesos, utilizando técnicas que permitan alcanzar mayor ventaja frente a los posibles competidores y alcanzar mayores niveles en la innovación; además se puede evidenciar la importancia de este sector en Colombia, ya que es una de las principales actividades industriales, por lo que sus contribuciones tienen grandes efectos para el país.

**Montos de inversión en ACTI según principales actividades industriales**  
**Total nacional**  
**2013 y 2014**



Figura 2: Montos de inversión en ACTI

Fuente: DANE - Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica en la industria manufacturera – EDIT

Nota: Para la elaboración de este gráfico se tomaron los 15 mayores subsectores industriales que invirtieron en ACTI en 2014. Los 40 sectores restantes suman una inversión de 348.529 millones y 413.699 millones en 2013 y 2014 respectivamente.

Esa encuesta incluyó a las empresas industriales ubicadas en el territorio nacional, con personal ocupado mayor o igual a 10 personas, y/o valor de la producción superior a \$137,2 millones de pesos anuales para el 2013. De las 10.133 empresas que cumplían estas características, se obtuvo información de 8.835 y, según los resultados, se deduce que el tercer sector en Colombia con mayor participación en la encuesta (7,4% = 655 empresas), es el de fabricación de productos de plástico y el segundo es la elaboración de productos alimenticios (8,1% = 719 empresas), siendo éste último el principal cliente de la empresa Alico S.A. De lo anterior se concluye la importancia que un medio tan competido reviste para la empresa cualquier esfuerzo tendiente a mejorar su productividad, mantener su calidad y consolidar su capacidad competitiva.

En una visita realizada a la planta de termoformado de Alico S.A., por medio de observación directa y de una entrevista con el director de la división, se analizó el comportamiento de los

operarios y se detectó que éstos manipulan arbitrariamente los parámetros de las máquinas de la planta según su experiencia en el proceso.

Es necesario recalcar que los ajustes de estas máquinas varían según la referencia del producto que se desea obtener y el material a procesar, por lo tanto las máquinas utilizadas en el proceso permiten variar el valor de los parámetros dentro de rangos establecidos por el fabricante.

En la división de termoformado, la productividad se mide por medio de los indicadores de tiempos perdidos en el proceso, para analizar los resultados se realiza un árbol de pérdidas de los paros no programados (Anexo 1: Árbol de pérdidas), donde se clasifican los paros según las 16 grandes pérdidas del TPM y se encuentra que los tiempos perdidos asociados al set up o ajuste y start up o arranque, que son los que dan espacio a la manipulación de los parámetros por parte de los operarios, representan un 50% del total del tiempo perdido en paros no programados.

Como consecuencias observables directas o indirectas de las frecuentes variaciones en el valor de los parámetros se encuentran averías en los productos, demora en los arranques y ajustes, menor aprovechamiento de la máquina, daños en troqueles y moldes por trabajo forzado y mantenimiento más constante, las cuales se resumen en valores indeseables en los tiempos perdidos y deterioro de la máquina. Lo anterior justifica la necesidad de operar las máquinas con la mejor combinación de parámetros, para poder optimizar la efectividad del proceso. (Montgomery, 2009).

Como resultado de las variaciones arbitrarias en los ajustes de las máquinas se produce también mayor consumo de energía, lo cual afecta no sólo la productividad sino el desempeño ambiental del proceso de manufactura. Asimismo, pueden acortar la vida útil de las máquinas e incrementar la frecuencia en su mantenimiento, contribuyendo a su temprano deterioro (Bhushan, 2013).

Por otro lado, para preparar cotizaciones los encargados se basan en la experiencia y en unos parámetros de costo de producción y tiempo de fabricación aproximados que fueron definidos muchos años atrás y en consecuencia el compromiso de tiempo se vuelve incierto pudiendo causar pérdidas económicas y afectar negativamente la confianza de los clientes en la Empresa.

## **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Proponer un método para estandarizar el ajuste de máquinas de termoformado en Alico S.A.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar el estado actual de la planta, recolectando información de los parámetros de ajuste de máquina y productividad.
- Analizar las variables de entrada que influyen en las variables de respuesta del proceso, según su significancia y naturaleza.
- Especificar los valores operacionales de los parámetros de ajuste de máquina para la muestra seleccionada.



## **3. MARCO DE REFERENCIA**

### **3.1 MARCO TEÓRICO**

#### **3.1.1 Historia del control estadístico de procesos**

El enfoque a la productividad comenzó con la división del trabajo por tareas con el fin de brindar facilidad en los procesos mediante la estandarización de los métodos de producción y la definición de las especificaciones con las que trabajan los obreros, con el objeto de impactar positivamente en la calidad de los bienes manufacturados (Taylor, 1911).

El inicio formal del control estadístico de calidad en los años 20 comenzó con el desarrollo del concepto de cartas y gráficos de control estadístico de Shewhart y, al finalizar esta década, junto con Dodge y Roming, desarrollaron el muestreo de aceptación basada en la estadística como una herramienta para la inspección (Shewhart, 1986).

Luego, se comenzaron a desarrollar técnicas para obtener la mayor cantidad de información útil con muestras de datos de pequeños tamaños, lo cual significó grandes avances en cuanto a la aplicación de métodos estadísticos en el diseño de experimentos (Fisher, 1934).

Después de la segunda guerra mundial hubo mayor aceptación del control estadístico de procesos, debido a que se volvieron necesarias las técnicas estadísticas para llevar un control en los procesos, y posteriormente surgió la ingeniería de confiabilidad (Montgomery, 2009).

Taguchi en 1948 comenzó el estudio de métodos ingenieriles para optimizar calidad y disminuir costos por medio de la aplicación del diseño experimental, realizando innovaciones en éste. Además, inició con la filosofía de la calidad fuera de línea, basada en el diseño de productos y servicios (Taguchi & Wu, 1985).

En los años 50 el control estadístico tuvo su mayor apogeo en las fábricas japonesas, influenciado por los métodos estadísticos, cuadros de control e inspección por muestreo (Ishikawa, 1985).

En los años 80 comienzan a desarrollarse libros e implementarse estrategias y herramientas estadísticas a nivel industrial, basadas en la influencia de autores muy importantes en cuanto a la gestión de la calidad como Feigenbaum, Deming y Juran, surgió TQM y Seis Sigma, éste último introducido por Motorola en 1988 gracias al ingeniero Bill Smith.

Douglas C. Montgomery fue reconocido a mediados de la década de los 80 por aplicar métodos estadísticos, por medio de análisis de experimentos, para el control y optimización de procesos y el análisis de datos en problemas de ingeniería en las industrias (Montgomery, 2009).

### 3.1.2 Estructura del modelo Seis Sigma

Para el desarrollo de este proyecto se utiliza el modelo Seis Sigma especialmente el método DMAIC de acuerdo a lo expuesto por Montgomery (2009) el cual consiste en desarrollar las cinco fases siguientes:

- I. **Definir:** identificar la oportunidad del proyecto, realizar una investigación histórica y verificar o validar que si represente un progreso importante.
  - Realizar una carta del proyecto: descripción y alcance del proyecto, fechas, métricas primarias y secundarias y como estas se alinean con las metas de la compañía. Puede ayudarse con un flujograma o mapa del proceso, diagrama SIPOC, entre otros.
- II. **Medir:** evaluar y entender el estado actual del proceso, recolectar datos de las medidas de calidad, costos, tiempos y realizar la caracterización del proceso.
  - Elaborar una lista de las variables claves de entrada y salida del proceso: se deben definir y recolectar datos sobre los parámetros (entrada) y las características claves del producto o requisitos del cliente (salida), ya sean históricos o estudio de observación.
  - Determinar el estado actual y hacer un estudio de capacidad: se debe determinar el estado actual del sistema de medida y evaluar su capacidad.
  - Presentación de la información: los datos recolectados se deben mostrar en gráficos como histogramas, gráficos de Pareto, diagramas de dispersión, entre otros.
  - Actualizar la carta del proyecto: si es necesario, re examinar las metas y el alcance del proyecto.
- III. **Analizar:** usar la información de la etapa de medición y empezar a determinar las relaciones causa-efecto en el proceso para descubrir las distintas fuentes de variabilidad, caracterizando las causas en asignables o comunes.
  - Determinar las variables claves de entrada que más afectan las variables de respuesta del proceso por medio de herramientas estadísticas, como lo son gráficos de control, pruebas de hipótesis, estimación del intervalo de confianza, análisis de regresión, entre otros.
- IV. **Mejorar:** cambios específicos para optimizar el proceso y que este tenga el desempeño deseado, realizando también una prueba piloto de la solución.
  - Determinar la relación causa-efecto: relación matemática entre variables de entrada y salida, se pueden utilizar diseños experimentales.
  - Determinar el rango operacional de los parámetros: definir la solución, demostrando las simulaciones, experimentos, gráficos y analizando los riesgos de la implementación.
- V. **Controlar:** documentar los controles necesarios para asegurar que se mantengan los cambios implementados y monitorearlos constantemente.
  - Diseñar un plan de control del proceso: asegurar que las ganancias del proyecto se van a institucionalizar y que posiblemente se pueden replicar en otros procesos similares. Debe servir para monitorear la solución e incluir toda la información, métricas y documentos de la operación.

Es necesario recalcar que este trabajo no se compromete con las etapas que requieren implementación en la empresa, sin embargo se llega hasta recomendar la ejecución de la quinta etapa para que se obtengan mejores resultados a largo plazo sobre la base de los resultados del trabajo.

### 3.1.3 Herramientas del control estadístico para el control de procesos

- Análisis de regresión: fue introducida por Gauss (1825) estudia y predice el valor medio de una variable sobre la base de valores fijos de una o más variables. La variable dependiente es estocástica, su valor depende de una distribución de probabilidades, mientras que, las variables independientes tienen valores fijos en muestras repetidas. El objetivo de esta herramienta es realizar un modelo sobre la relación entre los dos tipos de variables, estudiar su grado de asociación y su covarianza o tendencia a “moverse juntas”. (Gujarati & Porter, 2010).

- Prueba de hipótesis: teniendo en cuenta que una hipótesis estadística es una aseveración o conjetura frente a una población, la prueba de hipótesis consiste en observar una muestra aleatoria de dicha población para que el analista de datos pueda establecer una conclusión firme cuando rechaza la hipótesis. La estructura de la prueba consiste de una hipótesis nula ( $H_0$ ) que es cualquier hipótesis que se desee probar y una hipótesis alternativa ( $H_1$ ) que es aceptada si se rechaza la  $H_0$  y a menudo es el complemento lógico de  $H_0$ . (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012).

- Diseño experimental: esta herramienta ayuda a descubrir las variables de influencia claves en las características de la calidad en el proceso, en este método se varían sistemáticamente las variables de entrada del proceso controlables y se determina el efecto que estas tienen en las variables de salida o las especificaciones del producto. El objetivo es reducir la variabilidad y determinar los niveles de las variables controlables que optimicen el desempeño del proceso. Un tipo de diseño experimental muy usado es el diseño factorial, en éste los factores son variados a la misma vez de tal forma que todas las posibles combinaciones pueden ser probadas y así observar cuáles combinaciones producen los mejores resultados (Montgomery, 2009).

- Estratificación: analizar problemas, fallas, quejas, datos, clasificándolos o agrupándolos de acuerdo con los factores que se cree que pueden influir en la magnitud de los mismos, para así localizar las mejores pistas para resolver los problemas de un proceso o para mejorarlo. Es una estrategia de búsqueda para entender cómo influyen los diversos factores o variantes que intervienen en una solución problemática, con el fin de localizar diferencias y prioridades (Gutiérrez & De la Vara, 2009).

-Metodología de superficies de respuesta: técnica de optimización basada en experimentos diseñados, útil para el modelado y análisis en las aplicaciones donde una respuesta de interés recibe la influencia de varias variables y se tiene como objetivo optimizar esta respuesta (Montgomery, 2009).

## 3.2 ANTECEDENTES

### 3.2.1 Antecedentes del marco teórico

En el parque industrial Sumicol - Corona de Sabaneta, Antioquia se aplicó el ciclo DMAIC de Seis Sigma a modelos de gestión energética y por medio de las herramientas de esta metodología, se logró una optimización del gasto energético eléctrico por tonelada. Se resalta que la

identificación de Paretos y “X” desde las etapas iniciales, permiten orientar más fácilmente la obtención del logro de resultados del proyecto (Morato Orozco, 2009).

Por otro lado en la industria química de Colombia también se ha utilizado la metodología DMAIC de Seis Sigma para disminuir consumos de disolvente químico Lule 10, utilizado en procesos de limpieza de equipos especializados para litografía sobre hojalata. El desarrollo del trabajo se alineó con las actividades de definir, medir, analizar, mejorar y controlar el problema, buscando alternativas estadísticas y administrativas específicas que permitió obtener resultados satisfactorios como una reducción significativa del consumo del disolvente, mejora en los procesos de limpieza de los equipos de la línea de producción, y minimización los costos de producción y de impacto en la salud de los operarios del área. A modo de conclusión, agrega el autor, que el programa Seis Sigma se utiliza como una herramienta de tratamiento de problemas relacionados con el desarrollo sostenible y su pertinencia en la producción, haciéndola esbelta desde la perspectiva ambiental (Caicedo Solano, 2013).

En el 2014 se llevó a cabo un caso de estudio en un proceso de compras de una organización educativa por estudiantes de la Universidad Pontificia Universidad Javeriana de Colombia junto con otros de Chile y Reino Unido, donde se analizó el proceso por medio de las metodologías Business Process Management y Seis Sigma. En el caso se comprueba que las dos metodologías pueden complementarse y que las herramientas cuantitativas de Seis Sigma permiten establecer las variables críticas que deben controlarse para mejorar el proceso y estimar las posibles mejoras. Se concluye que el control estadístico de procesos de Seis Sigma es una herramienta de gran utilidad para obtener el diagnóstico del desempeño del proceso y determinar la causa raíz de los problemas, sin embargo, se deben complementar con herramientas cualitativas como son el análisis de flujo del proceso y la documentación estructurada del proyecto de mejoramiento para obtener un análisis que permita identificar de forma objetiva las oportunidades de mejora. Además, a futuro se plantea este estudio en otro tipo de procesos logísticos o de manufactura para verificar que la propuesta es válida para otros casos de negocio. (Rincón García, Aguirre Mayorga, & Caballero Villalobos, 2014).

### **3.2.2 Antecedentes de la empresa**

En la división de termoformado de Alico S.A., aproximadamente hace 3 años se realizó un estudio para determinar los valores de los parámetros con los cuales operan la maquinaria, se hizo una recolección de datos por medio de los operarios, los cuales llenaban unas planillas de los parámetros que usaban cada vez que fueran ajustar la máquina, y arrojaba unos resultados basados en promedios. Este estudio fue suspendido debido a que la persona que lo estaba desarrollando culminó sus labores en la empresa y por ende no se le dio continuidad.

## 4. METODOLOGÍA

A continuación se explica cómo se pretende llegar a cumplir con los objetivos específicos del proyecto.

Para comenzar, con el fin de diagnosticar el estado actual de la planta, se realiza una recolección de datos por medio de unas planillas donde los operarios registran los valores con los cuales operan los diferentes parámetros del proceso (variables de entrada) y las unidades producidas en el tiempo operativo (variable de salida) ver Anexo 2: Plantilla parámetros de proceso máquinas automáticas. Es importante mencionar que otras variables de entrada del proceso como la composición de la materia prima, electricidad, temperatura ambiente, humedad ambiental, entre otros, no se toman en cuenta para el desarrollo del proyecto porque son factores que no se pueden controlar.

Para analizar la criticidad de las variables de entrada según la percepción de los implicados en el proceso, se desarrolla un método de clasificación de parámetros, en el cual se da una ponderación a cada variable respecto a su influencia en la calidad, productividad, estado de la máquina y según su tipo.

Se procede con un análisis cuantitativo de las variables, en el cual es importante reconocer que no se tiene un control total del proceso, es decir, que no se pueden manipular las variables de ajuste para experimentar, porque estos procesos se encuentran en marcha bajo una programación normal de producción, luego el estudio es de tipo observacional. Por lo anterior, se debe buscar el valor de los parámetros según datos históricos, los cuales, en este caso presentan variabilidad generada por los diferentes operarios. De modo que se realiza un estudio observacional y no un diseño experimental, donde se pretende evidenciar si hay una asociación entre las variables de entrada y la productividad de la máquina, mediante un análisis de regresión múltiple.

Posteriormente, se analiza el comportamiento de la productividad a lo largo del tiempo, tomando los datos de las unidades producidas por hora en cada uno de los diferentes lotes o trabajos que se han producido por referencia.

Por último, se determinan los valores operacionales para los parámetros de la muestra seleccionada y se realiza una propuesta de método de ajuste de parámetros para que la empresa pueda replicar el proyecto en máquinas similares.

## 5. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 5.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

Se determina la muestra para el proyecto, para esto se tiene como criterio usar una máquina de comportamiento similar a las demás de la planta, con el objetivo de replicar fácilmente el estudio y se escogen los productos que tienen mayor rotación para que se tenga un impacto significativo y se pueda recolectar la mayor cantidad de información.

Se establece como muestra la máquina SCOPE 2 y las referencias AL-42 DOMO TORTA y AL-42 BASE TORTA usando el material llamado BOPS (Poliestireno orientado biaxialmente).

*Los parámetros con los que opera la máquina SCOPE 2 se describen en la*

Tabla 2.

*Tabla 2: Descripción de parámetros*

*Fuente: división de termoformado de Alico S.A.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
Posición de transporte	<i>mm</i>	Es la posición del molde para iniciar el desplazamiento o el transporte.
Demora en transporte	<i>seg</i>	Es una pausa que hace la máquina después del tiempo de expulsión y antes del desplazamiento.
Posición de calentamiento	<i>mm</i>	Es la posición del molde para iniciar el tiempo de calentamiento.
Tiempo de Calentamiento	<i>seg</i>	Durante este tiempo la máquina inyecta aire a presión de la parte superior hacia la lámina haciendo que ésta tenga contacto con la placa de calentamiento. (Es el tiempo durante el cual se calienta la lámina).
Ventilación de calor	<i>seg</i>	Este parámetro expulsa el aire que queda comprimido entre el molde y la placa después del calentamiento.
Tiempo de formado	<i>seg</i>	Durante este tiempo la máquina inyecta aire a presión de la parte inferior hacia arriba, haciendo que la lámina tome la forma que tenga el molde. (Es el tiempo durante el cual se forma la unidad)
Ventilación de formado	<i>seg</i>	Este parámetro expulsa el aire que queda entre el molde y la placa después del formado.
Tiempo de corte	<i>seg</i>	Es el tiempo durante el cual el troquel hace presión sobre la placa.
Demora en desmolde	<i>seg</i>	Es una pausa que hace la máquina después del tiempo de corte para iniciar el desmolde o expulsión.
Tiempo de desmolde	<i>seg</i>	Es el tiempo durante el cual se expulsa la unidad.

Adjuste de golpe	de	<i>mm</i>	Es el espacio que hay entre el filo del troquel y la superficie de la placa de calentamiento. Esta apertura se pone de acuerdo a la profundidad del molde.
Longitud de transporte	de	<i>mm</i>	Es la distancia que recorre el material entre golpe y golpe, esta distancia se da de acuerdo con la longitud del molde.
Precierre		<i>mm</i>	Este parámetro sirve para dar más rapidez a la máquina, ya que inicia un nuevo ciclo antes de terminar el transporte o avance.
Velocidad		<i>mm/seg</i>	Es la velocidad con la que transporta las unidades en la longitud de transporte o avance
Presión de calentamiento	de	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Es la presión con la que inyecta aire de la parte superior hacia la lámina, hay que tener en cuenta que este aire es frío.
Presión de moldeo	de	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Es la fuerza con la que la máquina inyecta aire a presión de la parte inferior hacia arriba haciendo que la lámina tome la forma que tenga el molde.
Presión de expulsión	de	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Es la presión con la que la máquina inyecta aire para expulsar la unidad del molde
Corte		<i>mm</i>	Es la distancia de donde se inicia el proceso de corte de la pieza
Agarre		<i>mm</i>	Es la distancia que recorre la cuchilla del troquel en el material, se debe tratar de que la cuchilla entre lo más posible en el material (sin que lo corte).
Velocidad de prensa	de	<i>mm/seg</i>	Velocidad en la que la placa de calentamiento regresa a su posición inicial después de realizada el ciclo

La recolección de datos directos se hace por medio de unas planillas de parámetros de proceso de la máquina a estudiar (Anexo 2: Plantilla parámetros de proceso máquinas automáticas), diligenciadas por cada operario que trabaja en la muestra, donde se registran los valores de los parámetros utilizados, unidades producidas y el tiempo operativo. Es de gran importancia resaltar que se presentaron ciertos inconvenientes y dificultades durante la recolección de datos, ya que los operarios no fueron muy constantes diligenciando las planillas cada que había producción de las referencias seleccionadas como muestra, no hubo un seguimiento oportuno y además no todas las planillas se diligenciaron completamente, por ende se disminuyó significativamente la cantidad de observaciones recolectadas, lo cual dificultó el análisis de datos.

Desde Septiembre de 2016 hasta Junio de 2017, se logran recolectar 4 observaciones correctamente diligenciadas para AL-42 DOMO TORTA, y 5 observaciones para la AL-42 BASE TORTA ver Anexo 3: Datos recolectados AL-42 DOMO TORTA; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Anexo 4: Datos recolectados AL-42 BASE TORTA.

## 5.2 ANÁLISIS PERCEPTUAL

Con el fin de identificar los parámetros más críticos para el proceso, se desarrolla un estudio de criticidad basado en la percepción del personal que opera la máquina en estudio, donde se clasifican los parámetros según los criterios mostrados en la Tabla 3:

Tabla 3: Clasificación estudio de criticidad  
Fuente: propia

<b>Calidad</b>		
<b>Clasificación</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Descripción</b>
Baja	1	La variable no afecta la calidad del producto
Media	2	La variable afecta la calidad del producto pero no da lugar a rechazo
Alta	3	La variable afecta la calidad del producto y da lugar a rechazo
<b>Productividad</b>		
<b>Clasificación</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Descripción</b>
Baja	1	La variable no afecta la productividad de la máquina
Media	2	La variable afecta la productividad de la máquina pero no baja la velocidad de esta
Alta	3	La variable afecta la productividad de la máquina y es necesario bajar la velocidad de esta
<b>Estado de máquina</b>		
<b>Clasificación</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Descripción</b>
Baja	1	La variable no afecta el estado de la máquina
Media	2	La variable afecta el estado de la máquina y puede acelerar un daño prematuro a esta
Alta	3	La variable afecta el estado de la máquina y puede causar un paro de máquina
<b>Tipo</b>		
<b>Clasificación</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Descripción</b>
Fija	1	El parámetro de proceso solo se configura una vez y éste se debe volver a mover.
Por referencia	2	El parámetro de proceso cambia con las diferentes referencias
Variable	3	El parámetro varía constantemente independiente de la referencia que se esté fabricando

Se procede a calcular la criticidad de las variables, la cual es el producto de las ponderaciones asignadas según la influencia de la variable en la calidad, productividad y estado de máquina. El resultado se presenta en la Tabla 4



Tabla 4: Resultados estudio de criticidad  
Fuente: propia

Parámetro de proceso	Unidad de medida	Calidad	Productividad	Estado de máquina	Criticidad	Tipo
Posición de Transporte	mm	1	3	3	9	Por referencia
Demora en Transporte	seg	1	3	1	3	Por referencia
Posición de Calentamiento	mm	1	1	1	1	Por referencia
Tiempo de Calentamiento	seg	3	3	1	9	Por referencia
Ventilación de Calentamiento	seg	3	3	1	9	Por referencia
Tiempo de Formado	seg	3	3	1	9	Por referencia
Ventilación de Formado	seg	1	3	1	3	Fija
Tiempo de Corte	seg	3	3	1	9	Por referencia
Demora de Desmolde	seg	3	3	1	9	Por referencia
Tiempo de Desmolde	seg	3	3	1	9	Por referencia
Ajuste de Golpe	mm	1	1	1	1	Por referencia
Longitud de Transporte	mm	1	1	1	1	Por referencia
Velocidad	mm/seg	1	3	1	3	Por referencia
Pre Cierre	mm	1	3	1	3	Por referencia
Presión de calentamiento	bar kg/cm <sup>2</sup>	3	3	1	9	Por referencia
Presión de Moldeo	bar kg/cm <sup>2</sup>	3	3	1	9	Por referencia
Presión de Expulsión	bar kg/cm <sup>2</sup>	3	1	1	3	Por referencia
Corte	mm	3	3	1	9	Por referencia
Agarre	mm	3	1	1	3	Por referencia
Velocidad de la Prensa	mm/seg	1	3	1	3	Por referencia

Se observa que todas las variables utilizadas cambian con las diferentes referencias, excepto Ventilación de formado, la cual es fija y solo es necesario configurarla una vez.

Como resultado se obtiene que perceptualmente los parámetros más críticos son: Posición de transporte, Tiempo de calentamiento, Ventilación de calentamiento, Tiempo de formado, Tiempo de corte, Demora de desmolde, Tiempo de desmolde, Presión de calentamiento, Presión de moldeo y Corte.

### 5.3 ANÁLISIS CUANTITATIVO

Para comenzar, se clasifican las variables como se observa en la

Tabla 5, con el objetivo de centrar el estudio solamente en las variables independientes, ya que son las causas del fenómeno que se está estudiando, mientras que las demás deben adquirir por razones técnicas valores dependientes de aquellas.

Tabla 5: Clasificación variables según su dependencia

Fuente: División de termoformado de Alico S.A.

Variable	Unidad	Dependiente	Independiente	Variable(s) de la(s) que depende
Posición de Transporte	mm	x		Demora de transporte y Pre-cierre
Demora en Transporte	seg		x	
Posición de Calentamiento	mm		x	
Tiempo de Calentamiento	seg	x		Presión de calentamiento
Ventilación de Calor	seg		x	
Tiempo de Formado	seg	x		Presión de moldeo
Ventilación de Formando	seg		x	
Tiempo de Corte	seg		x	
Demora de Desmolde	seg	x		Velocidad de prensa
Tiempo de Desmolde	seg	x		Velocidad de prensa
Ajuste de Golpe	mm		x	
Longitud de Transporte	mm		x	
Velocidad	mm/seg		x	
Pre Cierre	mm	x		Velocidad
Presión de calentamiento	bar kg/cm <sup>2</sup>		x	
Presión de Moldeo	bar kg/cm <sup>2</sup>		x	
Presión de Expulsión	bar kg/cm <sup>2</sup>		x	
Corte	mm		x	
Agarre	mm		x	

<b>Velocidad de la Prensa</b>	<i>mm/seg</i>		x	
-------------------------------	---------------	--	---	--

Después, se procede a darle una clasificación a las variables según su naturaleza y basándose en los datos recolectados sobre cada una de ellas (Anexo 3: Datos recolectados AL-42 DOMO TORTA y Anexo 4: Datos recolectados AL-42 BASE TORTA), de la siguiente manera: si mantiene un mismo valor en todas las observaciones, se dice que es fija, si sólo toma dos valores, se dice que es dicótoma y si toma cualquier valor dentro de un rango y presenta variabilidad en sus datos durante las diferentes muestras, se dice que es continua. La clasificación se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Clasificación de variables según su naturaleza  
Fuente: propia

<b>AL-42 BASE TORTA</b>		<b>AL-42 DOMO TORTA</b>	
<b>Variable</b>	<b>Naturaleza</b>	<b>Variable</b>	<b>Naturaleza</b>
Demora en Transporte	Dicótoma	Demora en Transporte	Dicótoma
Posición de Calentamiento	Fija	Posición de Calentamiento	Fija
Ventilación de Calor	Continua	Ventilación de Calor	Fija
Ventilación de Formando	Dicótoma	Ventilación de Formando	Fija
Tiempo de Corte	Dicótoma	Tiempo de Corte	Fija
Ajuste de Golpe	Continua	Ajuste de Golpe	Fija
Longitud de Transporte	Continua	Longitud de Transporte	Continua
Velocidad	Dicótoma	Velocidad	Continua
Presión de calentamiento	Continua	Presión de calentamiento	Dicótoma
Presión de Moldeo	Continua	Presión de Moldeo	Continua
Presión de Expulsión	Continua	Presión de Expulsión	Dicótoma
Corte	Continua	Corte	Continua
Agarre	Continua	Agarre	Continua
Velocidad de la Prensa	Continua	Velocidad de la Prensa	Fija

Las variables clasificadas como fijas no necesitan incluirse en el análisis, ya que en los datos históricos conservan un valor único durante todas las observaciones, por lo tanto se puede decir que no se tiene problema con estos parámetros.

En el caso de las variables clasificadas como dicótomas, su variabilidad no tiene un efecto muy significativo en el proceso, ya que se puede observar su valor únicamente varía en una de las observaciones realizadas, mientras que en las demás mantiene un valor fijo. Por lo tanto, su variación se considera no significativa en el proceso y, al igual que las variables fijas, no necesitan incluirse en el análisis.

Las variables clasificadas como continuas si presentan variabilidad significativa en las observaciones, por lo tanto éstas son las que se tendrán en cuenta en el análisis como variables

explicativas, junto con la variable dependiente que es la productividad representada en unidades producidas por hora.

Para determinar cómo es la influencia de cada una de las variables sobre la variable de salida (unidades producidas/hora), según datos históricos cuantitativos, se realiza un análisis de regresión múltiple por el método de mínimos cuadrados usando el software EViews 10.

Por requerimientos del software, las variables se trabajan con las abreviaciones indicadas en la Tabla 7

*Tabla 7: Abreviación variables independientes*  
Fuente: propia

<b>Variable</b>	<b>Abreviación</b>
Unidades producidas por hora	Y
Demora en Transporte	DTRANS
Ventilación de Calor	VCAL
Ventilación de Formando	VFORM
Tiempo de Corte	TCORT
Ajuste de Golpe	AGOL
Longitud de Transporte	LTRANS
Velocidad	VEL
Presión de calentamiento	PCAL
Presión de Moldeo	PMOL
Presión de Expulsión	PEXP
Corte	CORTE
Agarre	AGARRE
Velocidad de la Prensa	VPREN

Debido a las limitaciones en la recolección de datos, se obtuvo un número de observaciones inferior al número de variables independientes que se identificaron, es decir, se encuentra bajo una situación con menos ecuaciones que incógnitas, lo cual impide realizar una correlación completa y, por ende, formular la ecuación conjunta. En consecuencia, se decide proceder con un modelo de entrecruces que consiste en agrupar de diferentes maneras las variables haciendo covarianza entre ellas de forma coherente, esto con el fin de observar, en forma relativa, cuáles de las variables afectan significativamente la productividad, estando en presencia de las demás.

Para la construcción de los modelos se tiene en cuenta el coeficiente de determinación  $R^2$  y se utiliza el método de la prueba de significancia, prueba  $t$ , con:

Nivel de significancia:

$$\alpha = 0.25$$

Se toma el valor del nivel de significancia debido a la baja cantidad de datos históricos recolectados.

Y las hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$$

### 5.3.1 Análisis de regresión múltiple: AL-42 DOMO TORTA

Para el análisis de regresión de los parámetros de la referencia AL-42 DOMO TORTA se utilizan los siguientes modelos:

$$\text{Modelo 1: } Y = \beta_1 * LTRANS + \beta_2 * VEL + \beta_3 * PMOL$$

$$\text{Modelo 2: } Y = \beta_1 * AGARRE + \beta_2 * PMOL + \beta_3 * VEL$$

$$\text{Modelo 3: } Y = \beta_1 * PMOL + \beta_2 * CORTE + \beta_3 * LTRANS$$

$$\text{Modelo 4: } Y = \beta_1 * VEL + \beta_2 * AGARRE + \beta_3 * LTRANS$$

*Los resultados obtenidos con el análisis de regresión lineal en EViews, para cada uno de los modelos de la referencia AL-42 DOMO TORTA, muestra que éstos representan bien los datos, ya que la variación en la productividad es explicado en un 92% o más por su relación de las variables independientes y, además, se puede observar en la Figura 3, Figura 4,*

Figura 5 y Figura 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que las ecuaciones de los modelos representan muy bien los datos.

*Se puede decir que Presión de moldeo es el parámetro más influyente, ya que en los modelos construidos, al combinarse con los demás parámetros, está acompañado de coeficientes con valores muy lejanos en comparación con los coeficientes de las demás variables presentes (Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 4 y*

Figura 5), lo que implica que cada cambio unitario en la presión de moldeo hace incrementar en gran proporción la productividad

Además, se puede decir con una confianza del 75% que la Velocidad no es estadísticamente significativa en presencia de la Presión de moldeo, ya que obtiene valores de probabilidad superiores al nivel de significancia (Figura 4). Mientras que los parámetros Longitud de transporte y Agarre tienen una aceptación estadística en presencia de las demás variables, sin embargo, no influyen en gran medida en la productividad (Figura 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Por último, se observa (Figura 5) que el coeficiente de Corte es negativo cuando se covaría con Presión de moldeo, lo que significa que el su efecto es contrario, es decir, Corte implica una disminución en la productividad, mientras que Presión de moldeo un aumento.

Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/02/17 Time: 15:50  
 Sample: 1 4  
 Included observations: 4

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LTRANS	1.397335	0.085678	16.30908	0.0390
VEL	3.003003	1.264207	2.375405	0.2537
PMOL	77.24325	13.98185	5.524537	0.1140

R-squared	0.995365	Mean dependent var	1385.000
Adjusted R-squared	0.986096	S.D. dependent var	142.6534
S.E. of regression	16.82130	Akaike info criterion	8.596874
Sum squared resid	282.9560	Schwarz criterion	8.136595
Log likelihood	-14.19375	Hannan-Quinn criter.	7.586826
Durbin-Watson stat	1.531061		

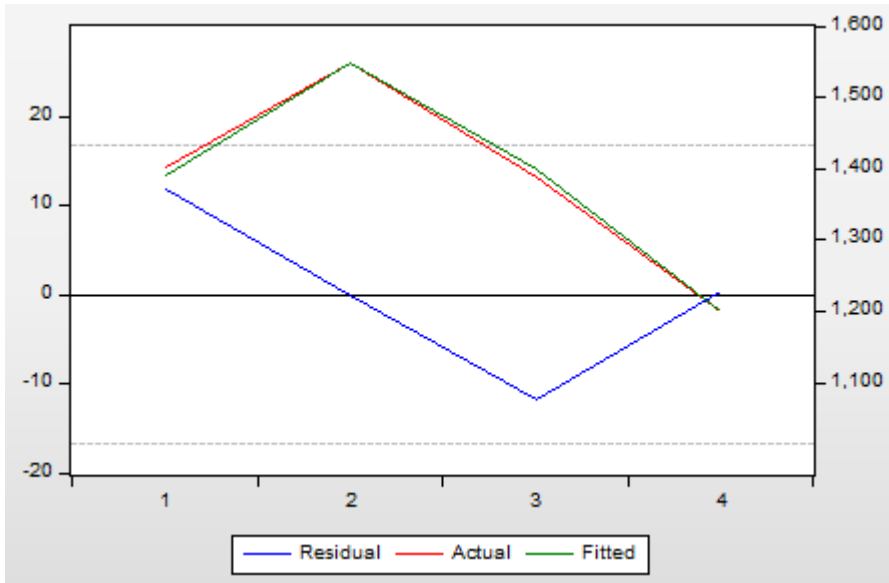


Figura 3: Resultado Modelo 1  
 Fuente: formato estándar de EViews

Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/02/17 Time: 15:53  
 Sample: 1 4  
 Included observations: 4

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AGARRE	15.51468	3.848017	4.031865	0.1548
PMOL	177.3127	46.02557	3.852482	0.1617
VEL	-6.837256	5.584699	-1.224284	0.4360

R-squared	0.928289	Mean dependent var	1385.000
Adjusted R-squared	0.784868	S.D. dependent var	142.6534
S.E. of regression	66.16597	Akaike info criterion	11.33592
Sum squared resid	4377.935	Schwarz criterion	10.87564
Log likelihood	-19.67183	Hannan-Quinn criter.	10.32587
Durbin-Watson stat	1.738294		

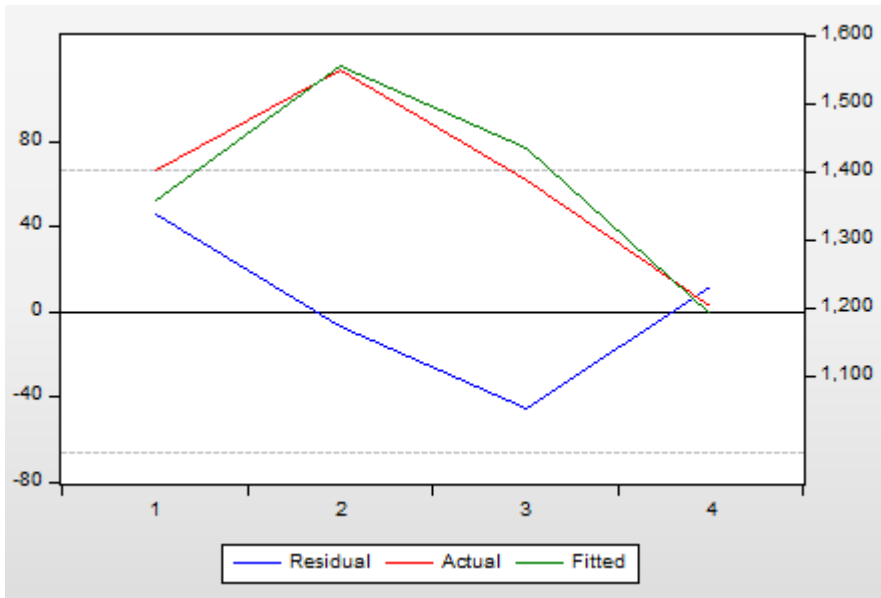


Figura 4: Resultado Modelo 2  
 Fuente: formato estándar de EViews

Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/02/17 Time: 15:55  
 Sample: 1 4  
 Included observations: 4

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PMOL	138.9302	13.29568	10.44928	0.0607
CORTE	-19.06266	6.306274	-3.022809	0.2034
LTRANS	1.376162	0.069843	19.70365	0.0323

R-squared	0.996963	Mean dependent var	1385.000
Adjusted R-squared	0.990889	S.D. dependent var	142.6534
S.E. of regression	13.61645	Akaike info criterion	8.174141
Sum squared resid	185.4078	Schwarz criterion	7.713861
Log likelihood	-13.34828	Hannan-Quinn criter.	7.164092
Durbin-Watson stat	1.700478		

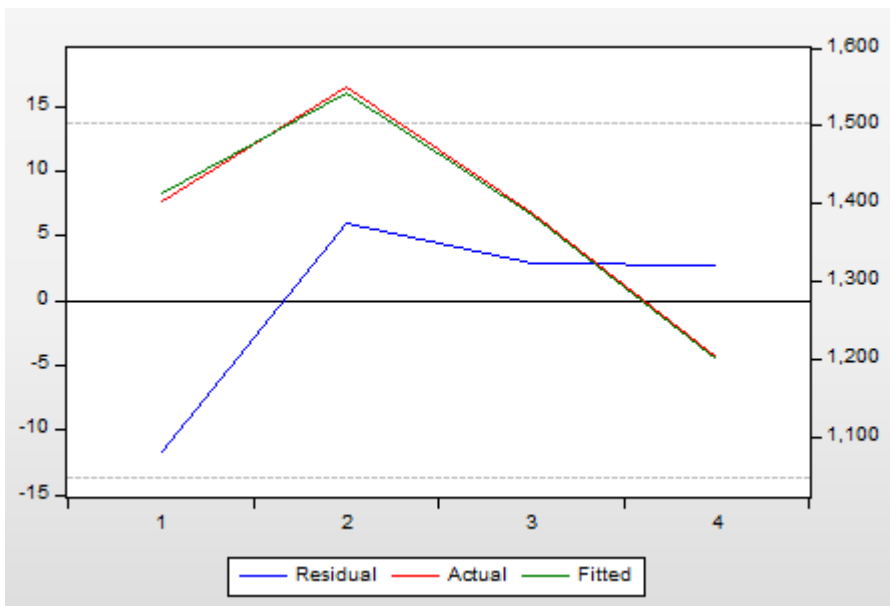


Figura 5: Resultado modelo 3  
 Fuente: formato estándar de EViews



Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/05/17 Time: 10:09  
 Sample: 1 4  
 Included observations: 4

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
VEL	10.85198	1.044997	10.38469	0.0611
AGARRE	-11.57319	2.616990	-4.422329	0.1416
LTRANS	2.417498	0.191810	12.60362	0.0504

R-squared	0.992893	Mean dependent var	1385.000
Adjusted R-squared	0.978680	S.D. dependent var	142.6534
S.E. of regression	20.82938	Akaike info criterion	9.024311
Sum squared resid	433.8629	Schwarz criterion	8.564032
Log likelihood	-15.04862	Hannan-Quinn criter.	8.014263
Durbin-Watson stat	2.238901		

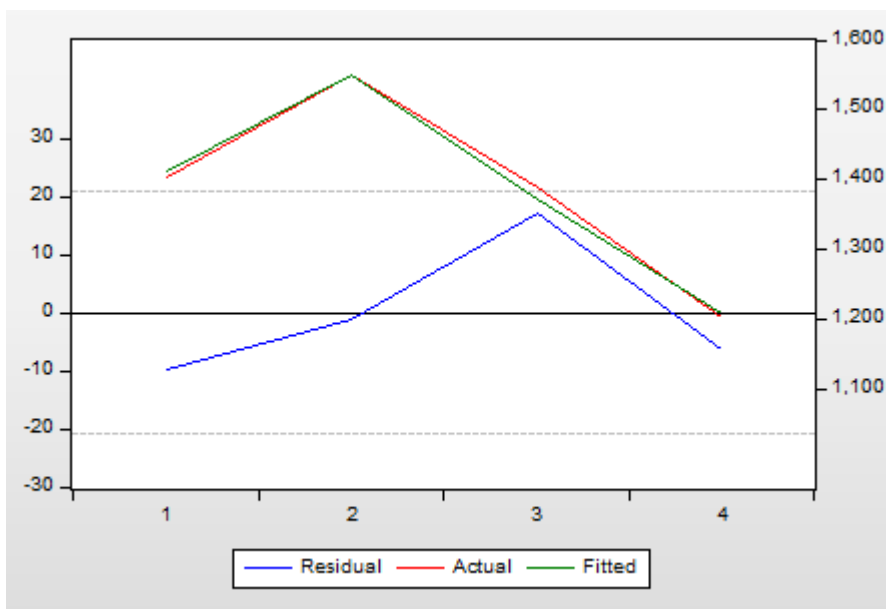


Figura 6: Resultado modelo 4  
 Fuente: formato estándar de EViews

### 5.3.2 Análisis de regresión múltiple: AL-42 BASE TORTA

Para el análisis de regresión de los parámetros de la referencia AL-42 BASE TORTA se utilizan los siguientes modelos:

$$\text{Modelo 5: } Y = \beta_1 * AGOL + \beta_2 * LTRANS + \beta_3 * PEXP + \beta_4 * VPREN$$

$$\text{Modelo 6: } Y = \beta_1 * PCAL + \beta_2 * PMOL + \beta_3 * PEXP + \beta_4 * VPREN$$

$$\text{Modelo 7: } Y = \beta_1 * \text{AGARRE} + \beta_2 * \text{CORTE} + \beta_3 * \text{VCAL} + \beta_4 * \text{LTRANS}$$

Los resultados obtenidos con el análisis de regresión múltiple en EViews, para cada uno de los modelos de la referencia AL-42 BASE TORTA, muestra que éstos representan bien los datos, ya que la variación en la productividad es explicado en un 88% o más por su relación de las variables independientes y, además, se puede observar en las (Figura 7 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 8 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 9) que las ecuaciones de los modelos representa bien los datos.

Se observa que los parámetros Agarre y Corte, al tener valores negativos en sus coeficientes (Figura 9), tienden a covariar de manera similar produciendo un efecto de disminución en la productividad en presencia del parámetro Velocidad de calentamiento que, por lo contrario, representa una alta influencia en el aumento de la productividad.

También, se evidencia que los parámetros Presión de expulsión, Velocidad de prensa (Figura 7) y Presión de moldeo (Figura 8), en ese orden, tienen una gran influencia positiva en la productividad por los altos coeficientes que obtienen en el análisis.

Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/02/17 Time: 15:34  
 Sample: 1 5  
 Included observations: 5

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AGOL	-7.060823	0.517805	-13.63607	0.0466
LTRANS	2.882881	0.080395	35.85904	0.0177
PEXP	120.8916	7.918452	15.26708	0.0416
VPREN	73.26385	5.232616	14.00138	0.0454

R-squared	0.997480	Mean dependent var	1875.200
Adjusted R-squared	0.989921	S.D. dependent var	66.76601
S.E. of regression	6.702801	Akaike info criterion	6.633490
Sum squared resid	44.92754	Schwarz criterion	6.321040
Log likelihood	-12.58373	Hannan-Quinn criter.	5.794906
Durbin-Watson stat	2.070149		

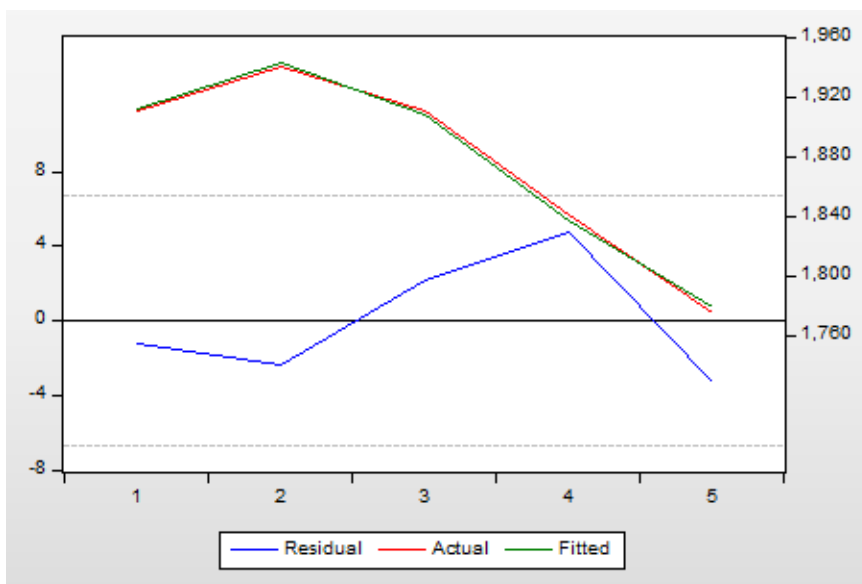


Figura 7: Resultado Modelo 5  
 Fuente: formato estándar de EViews

Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/02/17 Time: 15:43  
 Sample: 1 5  
 Included observations: 5

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PCAL	-93.28957	106.4616	-0.876274	0.5419
PMOL	85.59300	20.88389	4.098519	0.1524
PEXP	187.1086	31.74472	5.894166	0.1070
VPREN	166.2735	35.64243	4.665044	0.1344

R-squared	0.889579	Mean dependent var	1875.200
Adjusted R-squared	0.558317	S.D. dependent var	66.76601
S.E. of regression	44.37220	Akaike info criterion	10.41367
Sum squared resid	1968.892	Schwarz criterion	10.10122
Log likelihood	-22.03416	Hannan-Quinn criter.	9.575081
Durbin-Watson stat	2.170282		

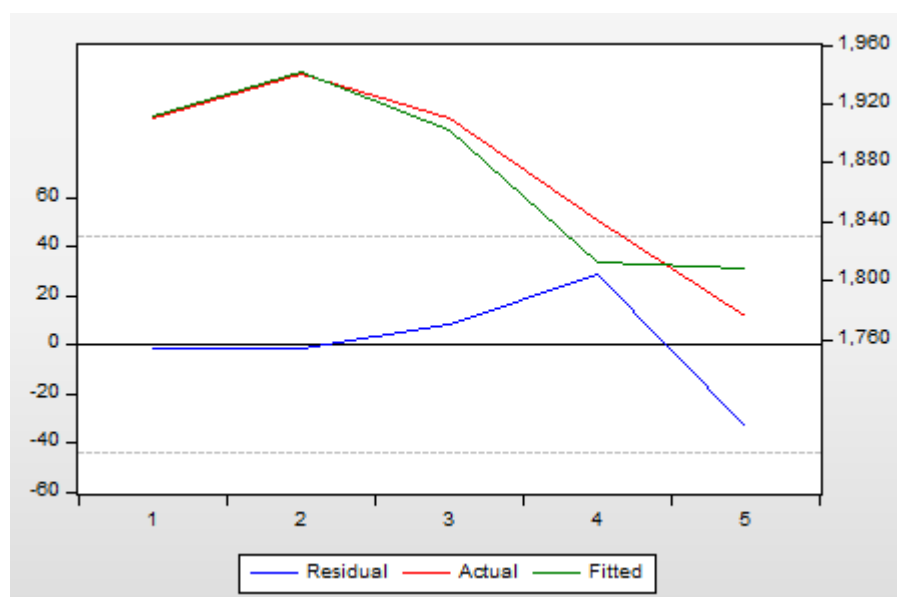


Figura 8: Resultado Modelo 6  
 Fuente: formato estándar de EViews

Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/02/17 Time: 15:46  
 Sample: 1 5  
 Included observations: 5

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AGARRE	-9.478737	1.348848	-7.027286	0.0900
CORTE	-29.80906	4.932906	-6.042901	0.1044
VCAL	324.2010	64.28099	5.043496	0.1246
LTRANS	4.107095	0.157977	25.99811	0.0245

R-squared	0.988326	Mean dependent var	1875.200
Adjusted R-squared	0.953304	S.D. dependent var	66.76601
S.E. of regression	14.42757	Akaike info criterion	8.166720
Sum squared resid	208.1546	Schwarz criterion	7.854271
Log likelihood	-16.41680	Hannan-Quinn criter.	7.328136
Durbin-Watson stat	2.481835		

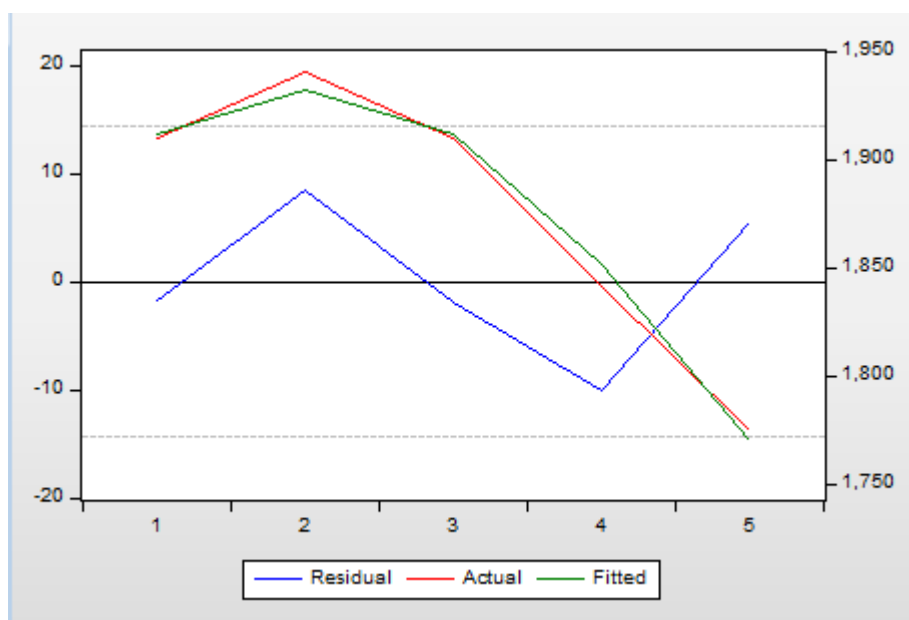


Figura 9: Resultado Modelo 7  
 Fuente: formato estándar de EViews

En la Figura 8, se observa que el parámetro Presión de calentamiento, al estar en presencia de las demás variables, explica una cantidad muy insignificante de la variación de Y, según su valor-p, por lo que se puede decir que su presencia altera los modelos, por consiguiente se construye un nuevo modelo sin tener en cuenta esta variable con el objetivo de ver como se relaciona la importancia relativa de los otros parámetros, Presión de moldeo, Presión de expulsión y

Velocidad de prensa, que a diferencia de Presión de calentamiento, si se muestran estadísticamente significativos. El modelo que se construye es:

$$\text{Modelo 8: } Y = \beta_1 * PMOL + \beta_2 * PEXP + \beta_3 * VPREN$$

Al analizar los resultados obtenidos (Figura 10), se puede decir que, al tener en cuenta la productividad en función de estos tres parámetros, se observa que mejora su significancia estadística en gran medida y que siguen presentando una alta influencia en el incremento de la productividad por sus altos coeficientes, sobresaliendo la importancia relativa de la Presión de expulsión.

Dependent Variable: Y  
 Method: Least Squares  
 Date: 10/05/17 Time: 09:52  
 Sample: 1 5  
 Included observations: 5

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PMOL	71.69086	12.76827	5.614765	0.0303
PEXP	198.8680	27.04759	7.352523	0.0180
VPREN	136.8064	11.10683	12.31732	0.0065

R-squared	0.804792	Mean dependent var	1875.200
Adjusted R-squared	0.609584	S.D. dependent var	66.76601
S.E. of regression	41.71761	Akaike info criterion	10.58343
Sum squared resid	3480.718	Schwarz criterion	10.34910
Log likelihood	-23.45858	Hannan-Quinn criter.	9.954495
Durbin-Watson stat	2.161193		

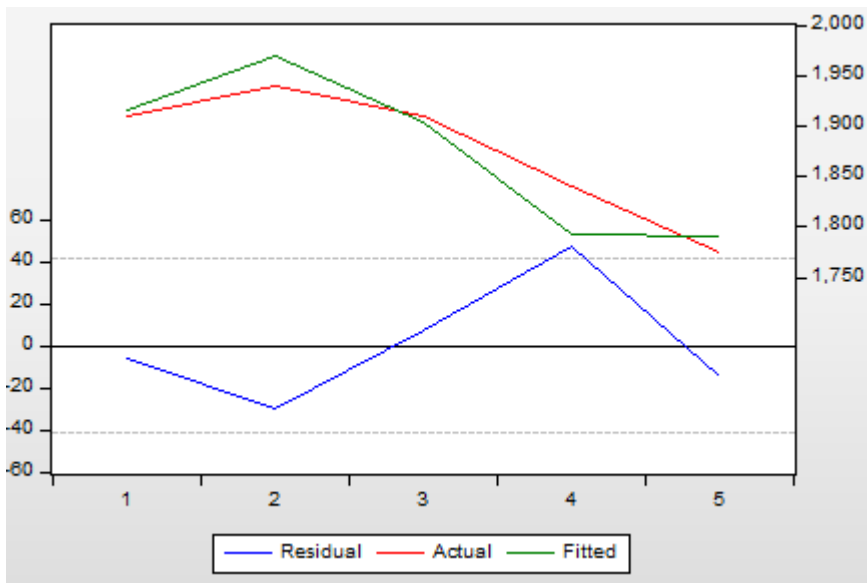


Figura 10: Resultado Modelo 8  
Fuente: formato estándar de EViews

Por último, con el fin de observar el comportamiento de los parámetros que han mostrado ser más influyentes en la variable de respuesta, se construye un modelo con estos:

$$\text{Modelo 9: } Y = \beta_1 * PEXP + \beta_2 * VPREN + \beta_3 * VCAL$$

En los resultados obtenidos (Figura 11) se demuestra que la Velocidad de calentamiento es la variable que más influye en el aumento de la productividad por tener un coeficiente tan superior al de las demás.

Dependent Variable: Y  
Method: Least Squares  
Date: 10/05/17 Time: 09:56  
Sample: 1 5  
Included observations: 5

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PEXP	197.8037	30.63885	6.455977	0.0232
VPREN	116.2111	13.62325	8.530349	0.0135
VCAL	600.3875	121.0185	4.961124	0.0383

R-squared	0.754085	Mean dependent var	1875.200
Adjusted R-squared	0.508170	S.D. dependent var	66.76601
S.E. of regression	46.82338	Akaike info criterion	10.81435
Sum squared resid	4384.858	Schwarz criterion	10.58001
Log likelihood	-24.03588	Hannan-Quinn criter.	10.18541
Durbin-Watson stat	1.764542		

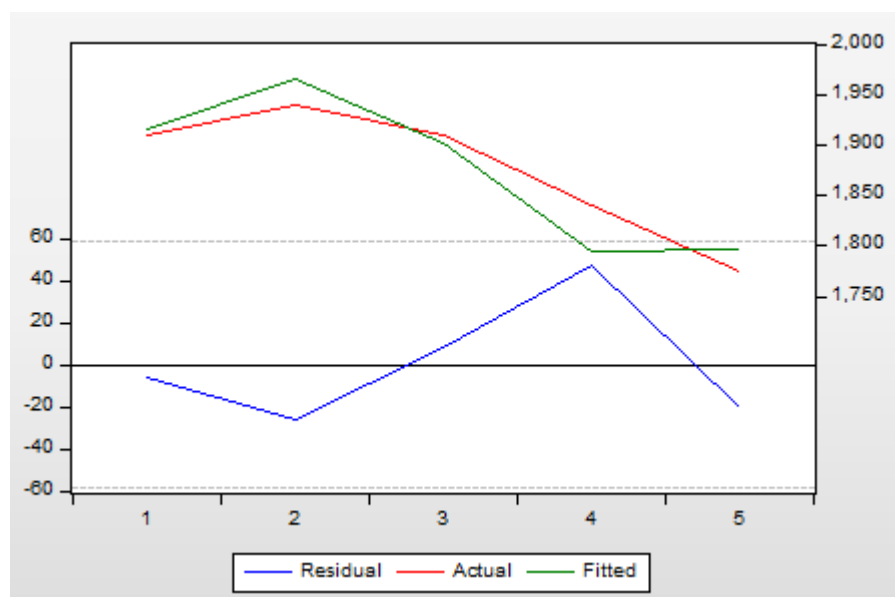


Figura 11: Resultado Modelo 9  
Fuente: formato estándar de EViews

## 5.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCTIVIDAD

Se recolecta la información de productividad desde Septiembre de 2016 hasta Junio de 2017, que es el período en el cual se hizo el registro de los valores de los parámetros operacionales.

A continuación se muestran la Figura 12 y la Figura 13, que corresponden a la productividad obtenida por cada lote producido de las referencias AL-42 DOMO TORTA y AL-42 BASE TORTA respectivamente.

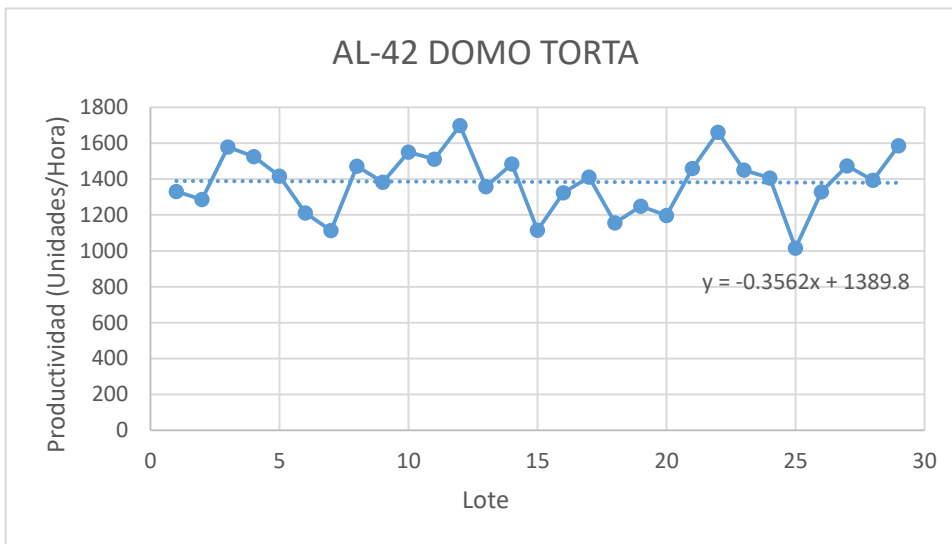


Figura 12: Comportamiento productividad AL-42 DOMO TORTA  
Fuente: propia



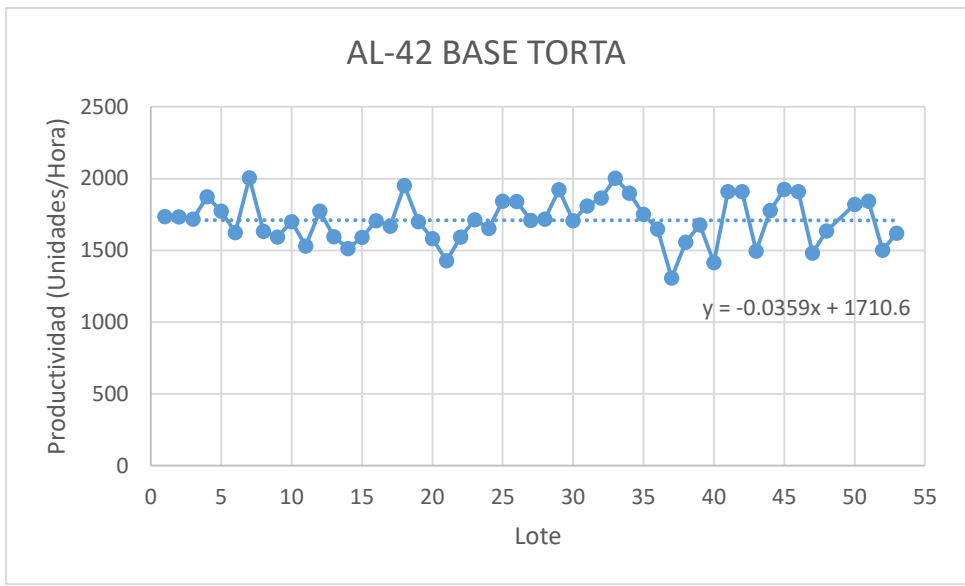


Figura 13: Comportamiento productividad AL-42 BASE TORTA  
Fuente: propia

Se observa que la productividad, en ambas referencias, tiene un comportamiento aleatorio a lo largo del tiempo al oscilar entre un rango estrecho y no presenta tendencias marcadas, lo cual se puede validar observando el valor de la pendiente en la ecuación de la línea de tendencia, el cual representa poca variación y un efecto negativo en la productividad.

Para tener un análisis más detallado, se procede a hacer un análisis de estadística descriptiva utilizando el software Microsoft Excel donde se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 8: Resumen estadística descriptiva AL-42 DOMO TORTA  
Fuente: propia

AL-42 DOMO TORTA	
Media	1384
Error típico	31
Mediana	1407
Desviación estándar	168
Varianza de la muestra	28391
Rango	684
Mínimo	1016
Máximo	1700
Suma	40149
Cuenta	29

Tabla 9: Resumen estadística descriptiva AL-42 BASE TORTA  
Fuente: propia

<i>AL-42 BASE TORTA</i>	
Media	1710
Error típico	22
Mediana	1708
Desviación estándar	159
Varianza de la muestra	25348
Rango	698
Mínimo	1309
Máximo	2007
Suma	88900
Cuenta	52

Para analizar la información se realizan los siguientes cálculos:

$$\text{Error típico asociado a la media} = \frac{\text{Error típico}}{\text{Media}} * 100$$

$$\text{Intervalo de confianza para la media al 68\% (IC)} = \text{Media} \pm \text{Desviación estándar}$$

$$\text{Espacio de mejoramiento (Unidades por hora)} = \text{Máximo} - \text{Media}$$

$$\text{Espacio de mejoramiento (\%)} = \frac{\text{Espacio de mejoramiento (Unidades por hora)}}{\text{Media}} * 100$$

Tabla 10: Cálculos estadística descriptiva AL-42 DOMO TORTA  
Fuente: propia

<i>AL-42 DOMO TORTA</i>	
Error típico asociado a la media	2%
Límite superior IC	1553
Límite inferior IC	1216
Espacio de mejoramiento (Unidades por hora)	315
Espacio de mejoramiento (%)	23%

Tabla 11: Cálculos estadística descriptiva AL-42 BASE TORTA  
Fuente: propia

AL-42 BASE TORTA	
Error típico asociado a la media	1%
Límite superior IC	1869
Límite inferior IC	1550
Espacio de mejoramiento (Unidades por hora)	297
Espacio de mejoramiento (%)	17%

En el resumen estadístico (Tabla 8 y Tabla 9), se puede observar que, para ambas referencias, la Media está centrada y que el error típico es bajo, demostrando que no se presentan muchas variaciones en la productividad.

*Analizando los valores de la desviación estándar (*

*Tabla 10 y*

Tabla 11), se puede decir que los datos no se apartan mucho de los valores de la media y tiene bajas oscilaciones a su alrededor. Además, al obtener un error típico asociado a la media tan bajo, se evidencia que es muy consistente la predicción de la media que representa este proceso y no hay tanta dispersión en la respuesta.

*Al observar el rango en el que caen el 68% de los datos (*

*Tabla 10 y*

Tabla 11), se encuentra que hay un espacio de mejoramiento en el proceso que, en condiciones ideales, es de máximo 23% o 315 unidades por hora para AL-42 BASE TORTA y 17% o 297 unidades por hora para AL-42 DOMO TORTA.

## 6. PRODUCTOS, RESULTADOS Y ENTREGABLES OBTENIDOS

En el desarrollo del proyecto se tuvo como principal dificultad la poca cantidad de observaciones en la recolección de datos debido a los inconvenientes ya mencionados, lo cual limitó significativamente el alcance del proyecto. Como resultados del trabajo se tienen dos entregables, cuya implementación y control quedan en manos de la empresa. En el entregable 1 se proponen los valores operacionales para ajustar los parámetros, los cuales serían útiles provisionalmente como un estándar de trabajo para la producción de las referencias de la muestra seleccionada; y, en el entregable 2 se propone un método para que la empresa pueda replicar este proyecto con las demás referencias de su portafolio, con el fin de tener un mayor control de sus procesos por medio de estándares de ajuste. La ejecución de lo anterior, le permitiría a la empresa lograr un incremento en su productividad, disminuir tiempos perdidos y deterioro en su maquinaria, y tener más precisión en sus cotizaciones.

### 6.1 ENTREGABLE 1: VALORES OPERACIONALES DE LOS PARÁMETROS DE AJUSTE DE LA MUESTRA

A continuación se definen los valores propuestos para ajustar los parámetros de la máquina (Tabla 12 y Tabla 13), los cuales se determinaron según los siguientes métodos:

-Método modal: las variables que tienen un comportamiento dicotómico, se recomienda ajustar su estándar a la moda, es decir, al valor con el que mayor frecuencia se ha operado según los datos históricos recolectados.

-Método media: las variables que tienen un comportamiento aleatorio, se recomienda ajustar su estándar al histórico promedio.

Las variables dependientes también se determinaron según estos dos casos, pero teniendo en cuenta la relación que tienen con las variables de las cuales dependen.

Tabla 12: Valores operacionales AL-42 BASE TORTA  
Fuente: propia

Referencia	Material	Calibre	Maquina
AL-42/ BASE TORTA 1/2 LIBRA EN BOPS	BOPS	420	Scope 2 TF07

Parámetro	Unidad	Valor
Posición de Transporte	mm	2
Demora en Transporte	seg	0.3
Posición de Calentamiento	mm	4
Tiempo de Calentamiento	seg	2.1
Ventilación de Calor	seg	0.89

Tiempo de Formado	seg	1.1
Ventilación de Formando	seg	0.3
Tiempo de Corte	seg	0.3
Demora de Desmolde	seg	0.3
Tiempo de Desmolde	seg	0.2
Ajuste de Golpe	mm	82
Longitud de Transporte	mm	563
Velocidad	mm/seg	48
Pre Cierre	mm	100
Presión de calentamiento	bar kg/cm <sup>2</sup>	2.3
Presión de Moldeo	bar kg/cm <sup>2</sup>	5.8
Presión de Expulsión	bar kg/cm <sup>2</sup>	3.4
Corte	mm	11
Agarre	mm	41
Velocidad de la Prensa	mm/seg	6

Tabla 13: Valores operacionales AL-42 DOMO TORTA  
Fuente: propia

Referencia	Material	Calibre	Maquina
<b>AL-42 DOMO TORTA 1/2 LIBRA EN BOPS TR</b>	<b>BOPS</b>	<b>420</b>	<b>Scope 2 TF07</b>

Parámetro	Unidad	Valor
Posición de Transporte	mm	3
Demora en Transporte	seg	0.4
Posición de Calentamiento	mm	4
Tiempo de Calentamiento	seg	2
Ventilación de Calor	seg	1.00
Tiempo de Formado	seg	1.2
Ventilación de Formando	seg	0.3
Tiempo de Corte	seg	0.3
Demora de Desmolde	seg	0.49
Tiempo de Desmolde	seg	0.4
Ajuste de Golpe	mm	140
Longitud de Transporte	mm	561
Velocidad	mm/seg	52
Pre Cierre	mm	100

Presión de calentamiento	<i>bar kg/cm<sup>2</sup></i>	2.0
Presión de Moldeo	<i>bar kg/cm<sup>2</sup></i>	5.8
Presión de Expulsión	<i>bar kg/cm<sup>2</sup></i>	2.0
Corte	<i>mm</i>	10
Agarre	<i>mm</i>	47
Velocidad de la Prensa	<i>mm/seg</i>	1

## 6.2 ENTREGABLE 2: MÉTODO PARA ESTANDARIZAR EL AJUSTE DE LAS MÁQUINAS DE TERMOFORMADO EN ALICO S.A.

A continuación se desarrolla la propuesta del método para estandarizar el ajuste de las máquinas con condiciones similares a la SCOPE 2.

Este procedimiento se debe realizar para una referencia en específico trabajada en determinada máquina y, cabe resaltar, que se puede implementar para cualquier variable de salida del proceso que se quiera optimizar.

### 1. Recolección de datos.

Diligenciar la planilla de parámetros de procesos de máquinas automáticas (Anexo 5: Plantilla propuesta para recolección de datos) con los valores de operación que cada operario ajusta en el momento de trabajar la referencia en estudio. En la planilla deben estar todos los parámetros con los que opera la máquina y se debe registrar las unidades producidas y el tiempo operativo.

Para garantizar que los resultados del procedimiento sean confiables, se debe mantener constantes las condiciones del sistema durante el estudio (*Ceteris Paribus*) y calcular un número de observaciones  $n$  es decir, de registros de los valores de parámetros, de la siguiente manera (Green, S. B., 1991):

$$n \geq 104 + m$$

Donde  $m$  es el número de variables independientes.

Lo anterior sirve para garantizar una confianza en la prueba de hipótesis de cada uno de los coeficientes individuales, tomando un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

Además, la cantidad mínima de observaciones  $n$  debe ser mayor, en al menos una unidad que el número de términos que se incluyan en el modelo. Es decir, es necesario trabajar con un número de observaciones que supere la cantidad de  $\beta_s$  para poder realizar el análisis de regresión múltiple.

### 2. Clasificación de variables independientes.

Analizar la variación histórica de los valores que toman los parámetros en la muestra recogida y clasificar las variables de la siguiente manera:

- Fija: si toma un único valor en todas las observaciones.
- Continua: si toma cualquier valor dentro de un rango o presenta variabilidad en sus datos durante todas las observaciones.

Lo anterior con el fin de excluir del análisis las variables clasificadas como fijas, ya que no presentan ninguna variabilidad en los datos históricos.

### 3. Regresión múltiple:

Realizar un análisis de regresión múltiple con el fin de identificar los parámetros más influyentes en la productividad, ya que la regresión permite, de una manera simplificada, mirar el efecto simultáneo de todas las variables independientes.

Construir la ecuación del modelo de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{i=m} \beta_i * X_i$$

Donde:

Y: Unidades producidas por hora.

X: Parámetros independientes con los que opera la máquina.

Nota: si hay efectos cruzados entre algunas variables, es importante incluirlos en el modelo. Por ejemplo, si se considera que es importante tener en cuenta el efecto de la interacción de la variable  $X_1$  al combinarse con la variable  $X_2$  el modelo quedaría:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{i=m} \beta_i * X_i + \beta_1 * X_1 * X_2$$

Analizar:

- Probabilidad o valor-p: su valor obtenido determina la significancia estadística de la variable de entrada en el modelo, así:

$$Si Prob. \leq \alpha$$

Se puede decir, con una confianza del  $(1-\alpha)\%$ , que la variable explica significativamente la variación de  $Y$  en presencia de las demás regresoras del modelo. En caso contrario, se puede decir que la variable explica una cantidad muy insignificante de la variación de  $Y$ , por lo que se puede eliminar del modelo sin alterar los efectos de las otras variables.

Se recomienda trabajar con un  $\alpha = 0.05$ , sin embargo, este puede variar según la confiabilidad de los datos recolectados.

- Coeficiente de las variables: su valor obtenido indica el cambio relativo o porcentual en la variable dependiente por cada cambio unitario en el valor de la variable explicativa (Montgomery, D. C., 2004). Entre mayor sea el valor del coeficiente, mayor será la influencia en la variable de respuesta y su signo determina si la influencia es positiva o negativa.

Se recomienda utilizar el software EViews como en el desarrollo de este proyecto, u otros como MINITAB, Excel, STATA o MathLab.

4. Una vez identificado cuáles de los parámetros operacionales son los dos que más influencia tienen en la productividad, se proponen dos alternativas:

- 4.1 Método matemático: buscar los valores que maximicen la productividad por medio de la utilización de derivadas de primer y segundo orden, de la siguiente manera:

- 4.1.1 Plantear la ecuación:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_1 * X_2$$

Donde,  $X_1$  y  $X_2$  son las variables que resultaron ser las más influyentes en la productividad en el análisis de regresión realizado anteriormente y  $Y$  es la productividad

- 4.1.2 Despejar la variable  $X_1$  y reemplazar en la ecuación anterior.

- 4.1.3 Realizar derivada de primer orden a la función e igualar a 0 para hallar los extremos locales.

- 4.1.4 Realizar derivada de segundo orden y sustituir los valores obtenidos para encontrar los puntos máximos.

- 4.2 Método empírico: realizar un proyecto de mejora basada en un estudio de superficie de respuesta, que es un tipo especial de diseño experimental en el cual, con las dos variables que resultaron con mayor influencia del análisis de regresión múltiple, se genera una superficie para encontrar allí los puntos máximos por medio de algoritmos de búsqueda óptima como lo son el método del ascenso más pronunciado, método de recocido simulado, método tabú, entre otros. Para la ejecución de esta alternativa se recomiendan los mismos software mencionados en el punto 3 y trabajar con la ecuación de superficie de respuesta:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_1 * X_2$$

Donde,  $X_1$  y  $X_2$  son las variables que resultaron ser las más influyentes en la productividad en el análisis de regresión realizado anteriormente y  $Y$  es la productividad.



5. Teniendo los valores operacionales de los parámetros más influyentes que maximizan la productividad, ajustar los demás parámetros en el valor histórico que se ha trabajado según el valor determinado para los influyentes, de acuerdo a los requerimientos del producto.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El modelo de Seis Sigma y su método DMAIC es una herramienta de gran utilidad para llevar a cabo proyectos con objetivos similares al de este trabajo, permite dar una adecuada orientación hacia la obtención del logro de resultados de una forma clara y da pie al uso de una gran cantidad de herramientas estadísticas, que se pueden adaptar fácilmente a las diversas situaciones.
- El análisis de regresión múltiple permite examinar el efecto simultáneo de todas las variables independientes de una manera simplificada, lo cual resulta muy útil para situaciones en las que se cuenta con una gran cantidad de variables de entrada y se necesita realizar una correcta caracterización de éstas, con el fin de identificar las más influyentes y sintetizar el estudio.
- La SCOPE 2 se puede considerar como una máquina muy robusta que acepta varios valores operacionales sin generar mucha variabilidad en su respuesta, sin embargo, no hay ninguna razón técnica que soporte las modificaciones que realizan los operarios actualmente, ya que no se tiene evidencia de que estos ajustes afecten significativamente la productividad y en el análisis de su comportamiento histórico se demuestra que no son razonables cuantitativamente pues su variabilidad no soporta un incremento en la productividad.
- Para la referencia AL-42 DOMO TORTA, la variable que más influye en el aumento de la productividad es la Presión de moldeo; Corte, resulta con un efecto negativo en la productividad, lo cual implica que, de alguna manera, corte se opone al efecto de la Presión de moldeo, mientras que las demás variables no son tan influyentes, en consecuencia es necesario focalizar el control inmediato en estos dos parámetros y enfocarse en su optimización para un proyecto futuro de mejora.
- Para la referencia AL-42 BASE TORTA, la variable que más influye en el aumento de la productividad es Velocidad de calentamiento, seguida por Presión de expulsión y Velocidad de prensa, por esta razón se recomienda enfocarse en su optimización para un proyecto futuro de mejora. Además, se evidencia que los parámetros Agarre y Corte resultan con un efecto negativo en la productividad y covarían de manera similar, lo cual se debe a que el Agarre influye en el proceso de corte minimizando su tiempo y esfuerzo requerido, en consecuencia es necesario tener un control especial en el ajuste de estos parámetros.
- El análisis perceptual desarrollado indica que la mayoría de las variables son críticas para la productividad del proceso, no obstante, el análisis cuantitativo contrarresta lo anterior demostrando que sólo unas pocas son realmente influyentes en la productividad y, además, son diferentes para cada referencia trabajada, lo cual justifica realizar un estudio con mayor profundidad que permita optimizar la productividad focalizándose en los factores más influyentes de cada referencia.
- El análisis de estadística descriptiva del comportamiento histórico de la productividad arroja que, en teoría, existen una posibilidad de mejora equivalente a incrementar la productividad máximo en un 23% y 17% para las referencias AL-42 DOMO TORTA y AL-42 BASE TORTA respectivamente, no obstante, sólo es posible lograr lo anterior en condiciones ideales donde no existan incertidumbres en factores no controlables, por lo tanto, la probabilidad real de mejora se disminuye a 12% y 9% que puede significar un espacio económico tentativo para emprender proyectos de mejora que

- permitan producir alrededor de 158 y 149 unidades más por hora, utilizando los mismos recursos.
- Se recomienda para las referencias AL-42 DOMO TORTA y AL-42 BASE TORTA comenzar ajustando los parámetros según los valores propuestos en el entregable 1 y, para cada una de las referencias del portafolio de termoformado, emprender un proyecto utilizando el método propuesto en el entregable 2, donde se realice un montaje de levantamiento de datos más completo para garantizar la confiabilidad de los resultados, lo cual puede requerir mucho tiempo y por ende se sugiere, durante esta fase, establecer como estándar los valores de los parámetros trabajados que generen el mejor valor de la productividad que se vaya obteniendo a lo largo del tiempo.
  - Es necesario realizar un análisis exclusivo para cada referencia trabajada en cada máquina, ya que, además de que los valores de los parámetros dependen de los requerimientos específicos del producto, la tendencia de ajuste de los parámetros tiene comportamientos diferentes, lo cual implica una clasificación distinta de las variables y por ende su influencia varía según la referencia en estudio.
  - Para la implementación adecuada de este proyecto, se recomienda a la empresa involucrar desde el primer momento a los empleados encargados de operar las máquinas y, en general, a todos aquellos que estén relacionados con el proceso de producción, con el fin de generar compromiso y sentido de pertenencia con el proyecto, ya que de ellos depende el éxito de su ejecución.

## 8. REFERENCIAS

- Alico - NOSOTROS. (2016). Retrieved April 13, 2016, from <http://www.alico-sa.com/en/node/1>
- Bhushan, R. K. (2013). Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *Journal of Cleaner Production*, 39, 242–254. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.008>
- Cerquera, A. C. (2013). Propuesta de estructuración de un modelo de planeación, programación y control de la producción para la sección de termoformado de una empresa del sector de plástico en la ciudad de Bogotá. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- DANE. (2015). Encuesta de desarrollo e innovación tecnológica - EDIT (industria manufacturera 2013 – 2014).
- Fisher, R. A. (1934). *Statistical methods for research workers* (5th ed.). London: Oliver and Boyd Ltd.
- Gauss, C. F. (1825). *Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae*.
- Ghobadnam, M., Mosaddegh, P., Rezaei Rejani, M., Amirabadi, H., & Ghaei, A. (2014). Numerical and experimental analysis of HIPS sheets in thermoforming process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5-8), 1079–1089. <http://doi.org/10.1007/s00170-014-6329-y>
- Green, S. B. (1991). How many subjects does it make to do a regression analysis? *Multivariate behavioral research*, 26, 449-510.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2010). *Econometría* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2009). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma* (2nd ed.). México: McGraw-Hill.
- Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The japanese way*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Juran, J. M., & Gryna, F. M. (1957). *Juran's quality control handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. (4th ed.) México: Pearson educación
- Li, Z., Cheng, T., Shen, Y., & Xuan, D. (2015). Optimal Heater Control with Technology of Fault Tolerance for Compensating Thermoforming Preheating System. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- López, M. (2012). *La gestión por procesos en centros geriátricos*. Universidad EIA.

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. (2nd ed.). New York, United States: Editorial Limusa S.A.

Montgomery, D. (2009). *Introduction to statistical quality control* (6th ed.). Arizona: John Wiley & Sons Inc. [http://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010316\)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C](http://doi.org/10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C)

Ruíz, A. N. (2012). *Propuesta para la implementación de dos pilares de mantenimiento productivo total en una PYME antioqueña del sector de alimentos*. Universidad EIA.

Runger, G., Lian, Z., & Del Castillo, E. (2010). Optimal multivariate bounded adjustment. *IIE Transactions*, 42(10), 746–752. <http://doi.org/10.1080/07408171003670967>

Shewhart, W. A. (1986). *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*. Mineola, NY: Dover Publications.

Taguchi, G., & Wu, Y. (1985). *Introduction to off-line quality control*. Japan: Central Japan quality control association.

Taylor, F. (1911). *The Principles of Scientific Management*. London: Harper & Brothers.

## 9. ANEXOS

### 9.1 ANEXO 1: ÁRBOL DE PÉRDIDAS

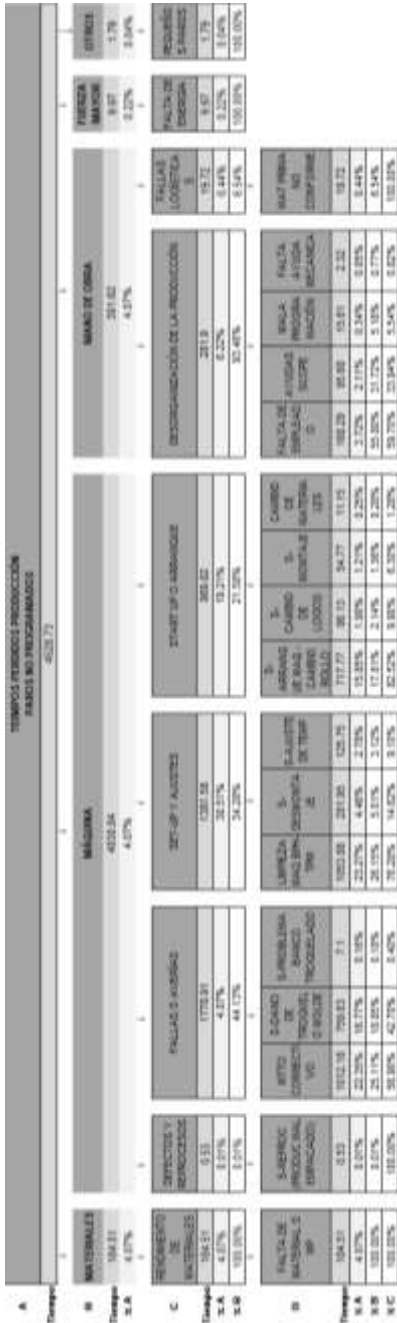


Figura 14: Árbol de pérdidas  
Fuente: propia

## 9.2 ANEXO 2: PLANTILLA PARÁMETROS DE PROCESO MÁQUINAS AUTOMÁTICAS

Parte		Referencia	Material	Color	Calibre	Maquina	Fecha:	Turno:	Operario	Nombre
T00017		AL-118 ESTUCHE 142 GR EN BOPS	BOPS	TR	250	Scope 2 TF07				
Trabajo		Unidad	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Observaciones:				
Hora										
Posicion de Transporte		mm								
Demora en Transporte		seg								
Posicion de Calentamiento		mm								
Tiempo de Calentamiento		seg								
Ventilacion de Calor		seg								
Tiempo de Formado		seg								
Ventilacion de Formando		seg								
Tiempo de Corte		seg								
Demora de Desmolde		seg								
Tiempo de Desmolde		seg								
Ajuste de Golpe		mm								
Longitud de Transporte		mm								
Velocidad		mm/seg								
Pre Cierre		mm								
Presión de calentamiento		bar kg/cm <sup>2</sup>								
Presion de Moldeo		bar kg/cm <sup>2</sup>								
Presion de Expulsion		bar kg/cm <sup>2</sup>								
Corte		mm								
Agarre		mm								
Velocidad de la Prensa		mm/seg								
Zona Interna	Teórica	°C								
	Real	°C								
Zona Externa	Teórica	°C								
	Real	°C								
Molde	Teórica	°C								
	Real	°C								
Pre Calentador	Teórica	°C								
	Real	°C								
Tiempo de ciclo		seg								

Figura 15: Plantilla parámetros de proceso máquinas automáticas  
Fuente: División de termoformado de Alico S.A

### 9.3 ANEXO 3: DATOS RECOLECTADOS AL-42 DOMO TORTA

Tabla 14: Datos recolectados AL-42 DOMO TORTA  
Fuente: División de termoformado de Alico S.A


PARÁMETROS DE PROCESO MAQUINAS AUTOMÁTICAS					
Referencia	Material	Calibre	Maquina		
AL-42 DOMO TORTA 1/2 LIBRA EN BOPS TR	BOPS	420	<b>Scope 2 TF07</b>		
	Unidad	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4
<b>Hora</b>			5:00	9:01	
<b>Trabajo</b>		FT088904	FT093425	FT090382	FT130480
<b>Fecha</b>		19/09/2016	17/10/2016		10/06/2017
<b>Turno</b>		1	1	3	3
<b>Operario</b>			10474	10474	10474
<b>Unidades producidas</b>		10000	40000	9300	5850
<b>Tiempo total</b>	<i>h</i>	7.13	25.82	6.7	4.87
<b>UNIDADES PRODUCIDAS/HORA</b>		<b>1402</b>	<b>1549</b>	<b>1388</b>	<b>1201</b>
Posición de Transporte	<i>mm</i>	2	2	3	3
Demora en Transporte	<i>seg</i>	0.5	0.4	0.4	0.4
Posición de Calentamiento	<i>mm</i>	4	4	4	4
Tiempo de Calentamiento	<i>seg</i>	2.1	2	2	2
Ventilación de Calor	<i>seg</i>	1	1	1	1
Tiempo de Formado	<i>seg</i>	1.1	1.1	1.2	1.2
Ventilación de Formando	<i>seg</i>	0.3	0.3	0.3	0.3
Tiempo de Corte	<i>seg</i>	0.3	0.3	0.3	0.3
Demora de Desmolde	<i>seg</i>	0.51	0.54	0.54	0.46
Tiempo de Desmolde	<i>seg</i>	0.43	0.35	0.45	0.29
Ajuste de Golpe	<i>mm</i>	140	140	140	140
Longitud de Transporte	<i>mm</i>	560	567	567	550
Velocidad	<i>mm/seg</i>	48	72	48	41
Pre Cierre	<i>mm</i>	100	100	100	100
Presión de calentamiento	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	2	3	2	2
Presión de Moldeo	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	6	7	6	4
Presión de Expulsión	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	2.3	2	2	2
Corte	<i>mm</i>	10	11	12	6
Agarre	<i>mm</i>	40	52	45	49
Velocidad de la Prensa	<i>mm/seg</i>	1	1	1	1



## 9.4 ANEXO 4: DATOS RECOLECTADOS AL-42 BASE TORTA

Tabla 15: Datos recolectados AL-42 BASE TORTA

Fuente: División de termoformado de Alico S.A.

		<b>PARÁMETROS DE PROCESO MAQUINAS AUTOMÁTICAS</b>				
Referencia	Material	Calibre	Maquina			
AL-42/AL-125 BASE TORTA 1/2 LIBRA EN BOPS	BOPS	420	<b>Scope 2 TF07</b>			
	Unidad	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
<b>Hora</b>		9:00	8:45			
<b>Parte</b>		T01611	T00531	T00531		
<b>Color</b>		TRANS	NEGRO	NEGRO		
<b>Trabajo</b>		FT09383	FT088403	FT085074	FT125243	FT130483
<b>Fecha</b>		23/09/2016	14/09/2016	7/09/2016	11/05/2017	9/06/2017
<b>Turno</b>		3	3	1	1	1
<b>Operario</b>		10474	10462	10474	10462	10635
<b>Unidades producidas</b>		15000	24900	15000	13000	6000
<b>Tiempo total</b>	<i>h</i>	<b>7.85</b>	12.83	7.85	7.06	3.38
<b>UNIDADES PRODUCIDAS/HORA</b>						
		<b>1910</b>	<b>1940</b>	<b>1910</b>	<b>1841</b>	<b>1775</b>
Posición de Transporte	<i>mm</i>	3	2	3	2	2
Demora en Transporte	<i>seg</i>	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
Posición de Calentamiento	<i>mm</i>	4	4	4	4	4
Tiempo de Calentamiento	<i>seg</i>	1.7	1.3	1.4	2.1	2.1
Ventilación de Calor	<i>seg</i>	1.1	0.96	0.7	0.9	0.8
Tiempo de Formado	<i>seg</i>	1	1.2	1	1	1.3
Ventilación de Formando	<i>seg</i>	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
Tiempo de Corte	<i>seg</i>	0.3	0.36	0.3	0.3	0.3
Demora de Desmolde	<i>seg</i>	0.36	0.35	0.44	0.3	0.29
Tiempo de Desmolde	<i>seg</i>	0.34	0.39	0.31	0.22	0.15
Ajuste de Golpe	<i>mm</i>	70	80	90	80	90
Longitud de Transporte	<i>mm</i>	565	566	562	563	559
Velocidad	<i>mm/seg</i>	48	48	49	48	48
Pre Cierre	<i>mm</i>	100	100	80	100	100
Presión de calentamiento	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	2	3	2	2.2	2.1
Presión de Moldeo	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	8	5.8	4	5.8	5.2
Presión de Expulsión	<i>bar</i> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	4	3	4	2.8	3
Corte	<i>mm</i>	12	9	12	10	13
Agarre	<i>mm</i>	43	46	28	48	42
Velocidad de la Prensa	<i>mm/seg</i>	4	7	6	6	6

## 9.5 ANEXO 5: PLANTILLA PROPUESTA PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 16: Plantilla propuesta para la recolección de datos  
Fuente: propia

	<b>PARÁMETROS DE PROCESO MÁQUINAS AUTOMÁTICAS</b>			
Parte	Referencia	Calibre	Material	Máquina
	Unidad	Medición 1	Medición 2	Medición 3
<b>Hora</b>				
<b>Color</b>				
<b>Trabajo</b>				
<b>Fecha</b>				
<b>Turno</b>				
<b>Operario</b>				
<b>Unidades producidas</b>				
<b>Tiempo operativo</b>				
Posición de Transporte	<i>mm</i>			
Demora en Transporte	<i>seg</i>			
Posición de Calentamiento	<i>mm</i>			
Tiempo de Calentamiento	<i>seg</i>			
Ventilación de Calor	<i>seg</i>			
Tiempo de Formado	<i>seg</i>			
Ventilación de Formando	<i>seg</i>			
Tiempo de Corte	<i>seg</i>			
Demora de Desmolde	<i>seg</i>			
Tiempo de Desmolde	<i>seg</i>			
Ajuste de Golpe	<i>mm</i>			
Longitud de Transporte	<i>mm</i>			
Velocidad	<i>mm/seg</i>			
Pre Cierre	<i>mm</i>			
Presión de calentamiento	<i>bar kg/cm<sup>2</sup></i>			
Presión de Moldeo	<i>bar kg/cm<sup>2</sup></i>			
Presión de Expulsión	<i>bar kg/cm<sup>2</sup></i>			
Corte	<i>mm</i>			
Agarre	<i>mm</i>			
Velocidad de la Prensa	<i>mm/seg</i>			

## 9.6 ANEXO 6: INFORMACIÓN PRODUCTIVIDAD AL-42 BASE TORTA SEPTIEMBRE 2016 – JUNIO 2017

Anexo 6: Información productividad AL-42 BASE TORTA Septiembre 2016 – Junio 2017  
Fuente: División de termoformado de Alico S.A.

TRABAJO	TIEMPO PRODUCTIVO (Horas)	UNIDADES	LOTE	PRODUCTIVIDAD (Unidades/Hora)
FT085074	8.64	15000	1	1736
FT086976	8.71	15100	2	1734
FT086977	2.91	5000	3	1718
FT088903	13.34	25000	4	1874
FT090032	8.46	15000	5	1773
FT090383	15.4	25000	6	1623
FT090573	5.98	12000	7	2007
FT093427	18.36	30000	8	1634
FT093429	6.28	10000	9	1592
FT095152	8.82	15000	10	1701
FT095319	19.6	30000	11	1531
FT095320	7.33	13000	12	1774
FT097628	7.24	11550	13	1595
FT098631	5.62	8500	14	1512
FT099444	7.76	12350	15	1591
FT100172	2.93	5000	16	1706
FT100732	11.39	19000	17	1668
FT100734	10.27	20050	18	1952
FT104394	13.78	21950	22	1593
FT105073	10.24	17550	23	1714
FT105073	9.29	15350	24	1652
FT106274	8.14	15000	25	1843
FT107227	9.89	18200	26	1840
FT109644	10.53	18000	27	1709
FT109645	5.85	10050	28	1718
FT111692	5.72	11000	29	1923
FT113275	7.62	13000	30	1706
FT113965	8.4	15200	31	1810
FT114832	9.11	17000	32	1866
FT116047	7.19	14400	33	2003
FT116192	5.32	10100	34	1898

FT116194	8.56	15000	35	1752
FT117663	9.1	15000	36	1648
FT117665	4.05	5300	37	1309
FT118977	3.37	5250	38	1558
FT118979	10.13	17000	39	1678
FT118980	2.97	4200	40	1414
FT121474	16.81	32100	41	1910
FT122430	6.28	12000	42	1911
FT124486	6.12	9150	43	1495
FT124752	2.25	4000	44	1778
FT124985	7.79	15000	45	1926
FT125243	6.81	13000	46	1909
FT126558	8.74	12950	47	1482
FT126793	7.18	11750	48	1636
FT130483	13.68	24900	50	1820
FT130506	13.67	25200	51	1843
FT131763	3.33	5000	52	1502
FT132706	6.11	9900	53	1620

## 9.7 ANEXO 7: Información Productividad AL-42 DOMO TORTA Septiembre 2016 – Junio 2017

Tabla 17: Información Productividad AL-42 DOMO TORTA Septiembre 2016 – Junio 2017  
Fuente: División de termoformado de Alico S.A

<b>TRABAJO</b>	<b>TIEMPO PRODUCTIVO (Horas)</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>LOTE</b>	<b>PRODUCTIVIDAD (Unidades/Hora)</b>
FT086975	15.11	20100	1	1330
FT088904	7.77	10000	2	1287
FT090382	23.42	37000	3	1580
FT093425	26.23	40000	4	1525
FT095318	28.23	40000	5	1417
FT097629	9.91	12000	6	1211
FT099446	11.63	12950	7	1113
FT100731	21.73	32000	8	1473
FT102845	14.47	20000	9	1382
FT105071	22.61	35050	10	1550
FT107228	9.4	14200	11	1511
FT109646	3.53	6000	12	1700
FT111696	8.25	11200	13	1358
FT113273	8.76	13000	14	1484
FT113964	13.82	15400	15	1114
FT114830	9.06	12000	16	1325
FT116045	13.61	19200	17	1411
FT117662	12.97	15000	18	1157
FT118978	13.62	17000	19	1248
FT118981	3.51	4200	20	1197
FT121473	22.05	32200	21	1460
FT122427	7.22	12000	22	1662
FT124984	10.34	15000	23	1451
FT125239	9.24	13000	24	1407
FT126792	11.57	11750	25	1016
FT129359	11.29	15000	26	1329
FT130480	16.97	25000	27	1473
FT131758	18.01	25100	28	1394
FT132704	6.24	9900	29	1587