

Control estadístico de procesos para evaluación de costos por pérdida de calidad en el área de producción: caso estudio en industria química.

Statistical process control and cost evaluación due to loss of quality in the production área: case study in the chemical industry

Yineth Minelly Pardo Morales¹

¹<https://orcid.org/0000-0002-5455-1348>, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, yinethm-pardom@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 05/07/2019

Fecha de aceptación del artículo: dd/mm/año

Resumen

El estudio se fundamenta en la aplicación del control estadístico de procesos para evaluar y establecer mejoras en la calidad de productos de la industria química. La compañía requiere efectividad en los controles operacionales y una de las causas es el desconocimiento y análisis de herramientas estadísticas. Aplicar los métodos requeridos para identificar la variabilidad en las tres líneas de producción fue el objetivo del proyecto. El uso de herramientas de calidad, y el índice de capacidad, permitieron determinar la variabilidad, el modelo de costos por pérdida de calidad y un indicador de eficiencia y eficacia. Con resultados disímiles en las líneas, emitiendo señales de alerta pues no todos los procesos se encuentran bajo control estadístico, ni son capaces para satisfacer al cliente, el bajo nivel de efectividad y alto costo asociado en uno de los productos, conlleva a planificar acciones correctivas y adoptar un método de muestreo.

Palabras claves: Capacidad y estabilidad de procesos, costos por pérdida de calidad, causas de variación, límites de control y especificación

Abstract

The study is based on the application of statistical process control to evaluate and establish improvements in the quality of products of the chemical industry. The company requires effectiveness in operational controls and one of the causes is the lack of knowledge and analysis of statistical tools. Applying the required methods to identify the variability in the three production lines was the objective of the project. The use of quality tools, and the capacity index, allowed to determine the variability, the cost model for loss of quality and an indicator of efficiency and effectiveness. With dissimilar results in the lines, issuing warning signals since not all the processes are under statistical control, nor are they capable of satisfying the customer, the low level of effectiveness and high cost associated with one of the products, leads to planning corrective actions and adopt a sampling method.

Keywords: Capacity and stability of processes, costs for loss of quality, causes of variation, control limits and specification.

1. Introducción

La industria química mundial y su crecimiento del año 2010 al 2023 en miles de euros es de 2.353 a 4.637 principalmente en Asia-Pacífico, África, Oriente Medio y Latinoamérica (Montes Valencia, 2015); el sector colombiano se encuentra en los primeros 6 puestos de crecimiento de las exportaciones a América Latina, América del Norte y Asia, ha presentado un crecimiento promedio anual del 11,6% desde 2005 (Aristizábal, 2018).

La presente investigación hace énfasis en el control estadístico de procesos CEP de la industria química, cuyo objetivo es hacer predecible un proceso en el tiempo y es una herramienta para la toma de decisiones (NTC ISO 9004: 2015 Sistemas de Gestión de calidad. Directrices para la mejora de desempeño), mejora, competitividad, oportunidades y crecimiento en el mercado internacional con productos de alta calidad.

Una de las herramientas vitales en el CEP es la gráfica desarrollada por Walter A. Shewhart (Fermin, Valdivieso, & Orlandoni, 2009) la cual señala que la variación del proceso es el resultado de dos fuentes: causas comunes, obedece a su naturaleza inherente y no pueden ser alteradas sin cambiar el proceso mismo y causas asignables o especiales, aquéllas que no son parte del proceso y no están siempre presentes, pero surgen en circunstancias específicas.

Esta metodología permite planificar y determinar cuándo está fuera de control estadístico, su estabilidad y capacidad, las mejoras son notorias, en términos de: disminución en costos, eliminación de actividades que no agregan valor al proceso productivo, identificación de cuellos de botella y retrasos en producción,

evitar incumplimientos de los requisitos solicitados por el cliente final, entre otra.

El interés por tratar este tema surge de la necesidad de identificar los riesgos y oportunidades (NTC ISO 9001: 2015 Sistemas de gestión de calidad. Requisitos) de cada una de las líneas (reacción, sólidos y líquidos), si bien es cierto que ningún producto puede liberarse fuera de especificaciones, esto implica tiempo, costos y variabilidad (Montgomery & Douglas, 2011), de ahí la importancia por controlar estadísticamente y hacer mejoras de acuerdo a el origen de variación.

2. Materiales y Métodos

2.1. Control estadístico de proceso- CEP

Existen actualmente herramientas que pueden ser utilizadas para posibles mejoras y diagnósticos, pero una de las principales es el uso de técnicas estadísticas que viene a lo largo de los años, mejorando todo sistema operacional además de permitir que los productos fabricados sean competitivos.

Según Campos- Rocha (2009) "el CEP permite que las acciones correctivas sean aplicadas antes del surgimiento de inconformidades, responde a la pregunta si el proceso está funcionando como debía o si está fuera de las especificaciones de calidad y ejecuta acciones apropiadas para lograr y mantener un estado de control estadístico" (pág. 113)

2.2 Herramientas utilizadas y recolección de datos

Se realizó una recolección de datos (2017-2018) para kilogramos vendidos e ingresos por ventas a fin de optar por los productos que se encontraban en el 80% del diagrama de Pareto, en consecuencia, se

designaron las variables críticas de cada producto y se llevó a cabo el análisis en estabilidad y capacidad; una de las limitantes fue no tener un número de muestras igual para todas las referencias estudiadas. (ver diagrama No.1)

Metodología CEP

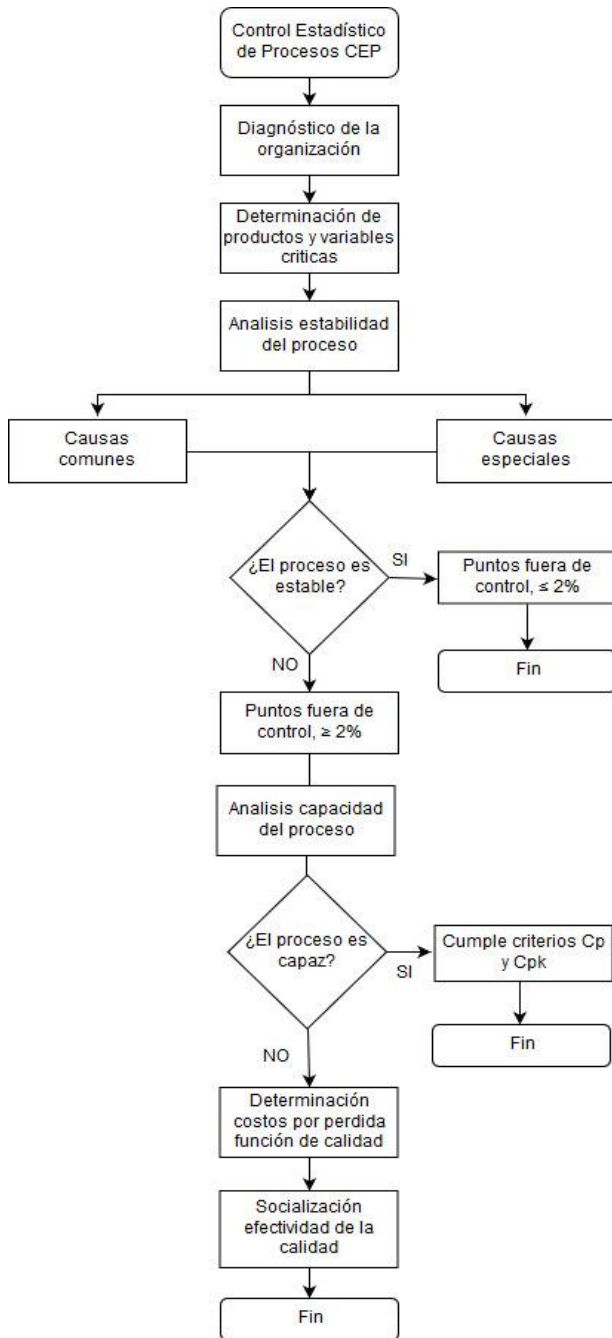


Figura 1. Metodología CEP.

- Diagrama de Pareto

Es una de las 7 herramientas de calidad (pocos vitales, muchos triviales) establece que hay muchos problemas sin importancia frente a solo unos graves, por lo general, el 80% de los resultados totales se originan en el 20% de los elementos (Hwaiyu , 2016).

En este caso de estudio se aplicó para diferenciar dentro del amplio portafolio de la compañía los productos más vendidos (\$) - kg) en cada una de las líneas y que constituyen el 80% de las ventas.

Cabe aclarar que para la línea sólidos se llevó a cabo una preselección de datos, en total existen 77 referencias; se clasificaron de acuerdo a su uso, eligiendo los 5 primeros en cantidad (kg) y ventas. Los escogidos fueron; AH (zona húmeda), CL (colorantes), RR (recurtientes), RS (recurtientes) y 2 de otras para un total de 22, lo que representa un 28,6% del total de la línea.

De manera análoga línea líquidos cuenta con 397 productos, se preseleccionaron los 2 primeros (en kilogramos y ventas) de cada una de las referencias AA (auxiliares de acabado), AC (ceras de acabado), AE (aceites), AM(modificadores), AP (pigmentos líquidos), EG (engrases), ETA (tratamiento de aguas), LH (lacas), RA (resinas), RC (adhesivos), AH (zona húmeda líquidos), otras) para un total de 24, conformando una muestra del 6.04%.

- Gráficos de Control

Herramienta de calidad para detectar si el proceso está funcionando correctamente o produciendo

situaciones atípicas a través del tiempo, cuando existen puntos fuera

de control; es una gráfica dinámica que contienen dos líneas horizontales representados como límite superior de control (LSC) y el límite inferior de control (LIC) y se utiliza para detectar si son causas comunes o especiales de variación y así tomar las acciones necesarias. (Alfaro, 2013)

Causa-común: inherentes al proceso, conocidas como causas naturales, son las fuentes de variación aleatorias, no identificables, que son inevitables en un proceso específico. (Brenna, 2011)

Causa-especial: origina una variación excesiva y debe ser corregida, las causas especiales o asignables incluyen cualquier factor que pueda identificarse y eliminarse, las seis fuentes principales de variación del proceso son personas, máquinas, materiales, métodos, medición y entorno. (Brenna, 2011)

En cada una de las variables se efectuó el gráfico I, en el cual los límites de control se calculan a partir de los datos del proceso y constituyen el rendimiento real por opción predeterminada, los límites de control de Minitab 2018 muestran 3 desviaciones estándar arriba y abajo de la línea central; como criterio de evaluación se estableció que cuando más del 2% de los valores están por fuera de los límites se considera inestable (Minitab, s.f.)

- Capacidad del Proceso

Es una medición de la variación inherente de un proceso para predecir el rendimiento futuro, es práctico y significativo si el proceso se encuentra bajo control estadístico: solo los procesos estables son predecibles.

Índice Cp: Es útil para especificaciones bilaterales; es decir, cuando hay un límite superior e inferior, determina si el proceso está centrado.

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

La condición óptima es cuando el promedio del proceso se ubica exactamente en el punto medio de los límites de especificación. El índice Cp no contempla la ubicación del proceso, solo la variación del proceso (desviación estándar), esta limitación restringe su uso y conduce al desarrollo del índice Cpk que tiene una aplicación y un uso más amplios. (Montgomery & Runger, 2012)

Índice Cpk: Debido a que el índice Cp solo nos indica si está produciendo dentro de las especificaciones, se necesita una indicación de si el proceso está centrado entre los límites; según Keller (2011) el Cpk incluye tanto la dispersión del proceso como la ubicación del proceso en relación con las especificaciones (pág. cap. 3.3.2)

$$Cpk = \frac{\text{Min}[\frac{x - LSL}{3\sigma}, \frac{USL - x}{3\sigma}]}{1} \quad (2)$$

Según Green y Perry (2008) "un objetivo común es tener un índice de capacidad de 2.0 mientras que un valor mayor que 1.5 se considera aceptable. Si el valor de Cpk es demasiado bajo, se puede mejorar haciendo un cambio que reduzca la variabilidad del proceso o haga que se acerque más al objetivo." (Cap. 8 -8.2.7) (pág. cap 8.2.7)

Tabla 1. Clasificación del proceso según Cp y Cpk

Capacidad Real Cpk (www.ingenieriaindustrialonline.com, s.f.)	
Cpk > 1,33	Capaz
1 < Cpk < 1,33	Marginalmente capaz
Cpk < 1	No Capaz

Capacidad Potencial Cp (www.ingenieriaindustrialonline.com, s.f.)	
Cp > 2	Clase Mundial
1,33 ≤ Cp ≤ 2	Clase 1. Más que adecuado
1 ≤ Cp ≤ 1,33	Clase 2. Adecuado
0,67 ≤ Cp ≤ 1	Clase 3. No adecuado. Análisis del proceso, requiere modificaciones.
Cp < 0,67	Clase 4. Requiere modificaciones

2.3 Función Pérdida de Calidad

Según Arthur (2011) "Taguchi sugiere que cada proceso tiene un valor objetivo y que a medida que el producto se aleja del valor objetivo, la sociedad incurre en una pérdida" (pág. cap. 8.4.3). El producto se ajusta a los límites de especificación, pero afectan los factores de rentabilidad de un sistema productivo: MUDA (Taiichi Onho) termino japones que hace referencia a; sobreproducción, tiempo, transporte, procesos, inventario, movimientos y defectos (Vilana Arto, 2011). Según Kai (2009) "Taguchi concluyó que cualquier desviación del rendimiento y de su valor objetivo incurrirá en una pérdida de calidad (pág. cap. 14.2.1).

$$L(x) = \frac{C}{(LES-N)^2} (x - N)^2 \quad (3)$$

donde; L = pérdida de calidad; N= Valor nominal, LES=Limite de especificación superior; x= valor a evaluar, C= costo por perdida

2.4 Indicador: Efectividad de la Calidad

Según ISO 9000 (2015): la "eficacia es el grado en que se realizan las actividades

planificadas y se alcanzan los resultados planificados y eficiencia es la relación entre el resultado alcanzado y los recursos utilizados" (pág. 23) siendo la efectividad la suma de las dos anteriores.

Teniendo en cuenta el costo de la variabilidad de los procesos, la definición de efectividad y el modelo de Lynch y Cross (Montero Fernandez Vivanco, 2016) se diseña el siguiente indicador para las variables más críticas en los productos que no son capaces ni estables

Mejía:

$$Efectividad = Eficiencia + Eficacia \quad (4)$$

$$Eficacia = \frac{RA}{RE} * 100 \quad (5)$$

$$Eficiencia = \left(\frac{\frac{RA}{CA}}{\frac{TE}{CE}} \right) * 100 \quad (6)$$

(pág. 2) en donde; RA=resultado alcanzado; RE=resultado esperado; CA= costo alcanzado; CE= costo esperado; TE= tiempo esperado; TA=tiempo alcanzado.

2.5 Coeficiente de variación de Karl Pearson (1985)

Cociente entre la desviación típica y la media, sirve para comparar la variabilidad entre varias distribuciones de frecuencias, (Montgomery & Runger, 2012). Se determinó el CV para cada una de las variables dado a las limitantes del proyecto soportadas en diferenciación amplia del número de datos entre los productos y se clasificó cómo sugiere la tabla 2.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (7)$$

Tabla 2. Clasificación coeficiente de variación

Clasificación	Rango CV	Grado de estimación
Muy bueno	0-5	Precisa
Bueno	5-15	Se considera una buena estimación, sin embargo, hay que tomar en cuenta si el número de observaciones es suficiente o no.
Regular	15-20	Se podría considerar una estimación poco confiable, dependiendo si el número de observaciones es suficiente o no.
No Recomendable	20-100	La estimación se presenta como poco precisa y por ende no recomendable, independiente el número de observaciones que se tenga disponible

Fuente: Adoptado de: (INE. Instituto Nacional de estadística, 2016)

3. Resultados

La compañía con tres líneas de producción; reacción, sólidos y líquidos procesa 490 referencias de productos (designadas con letras mayúsculas y números) distribuidas de forma tal, que para reacción son 16, sólidos cuenta con 77 y líquidos con 397 con un porcentaje del 81% sobre el total de las referencias.

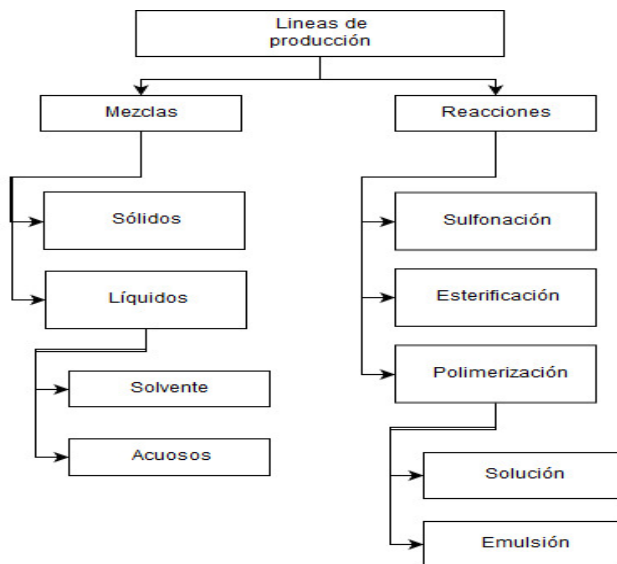


Figura 2. Líneas de Producción

3.1 Diagrama de Pareto Línea Reacción

En la figura No 3 (kg), AA18 representa un 33,4% de la totalidad, RR09 un 18,7% y muy cerca el AH06 con 16,2%; por consiguiente, la sumatoria de porcentajes del RR09 con AH06 constituyen aproximadamente el mismo porcentaje que el AA18. El RA16 se encuentra en el cuarto lugar con un 10.5 %, del mismo modo las otras referencias aportan un porcentaje menor al 4.8%.

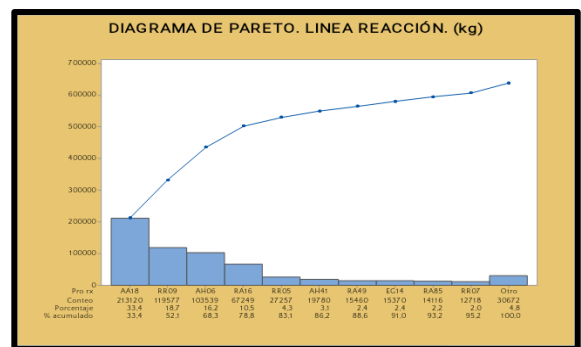


Figura 3. Diagrama Pareto reacción(kg).

De modo similar en la figura No 4(ventas), AA18 constituye la tercera parte del total de la línea, en consecuencia, el AH06

(15,4%), RR09 (11,3%) y RA16 (11%) ocupan el segundo, tercero y cuarto lugar respectivamente.

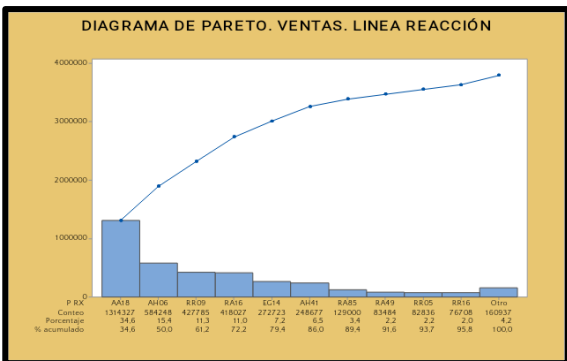


Figura 4. Diagrama Pareto reacción (\$).

La producción y los ingresos se concentran en el AA18, la distribución del diagrama tiene carácter diferenciador del primer producto al segundo y de este en adelante la variación se hace de vez en cuando apreciable.

De acuerdo con los hallazgos, los productos de reacción a estudiar son; AA18, AH06, RR09, RA16, que reflejan en el Pareto los más producidos y vendidos.

3.2 Diagrama de Pareto Línea Sólidos

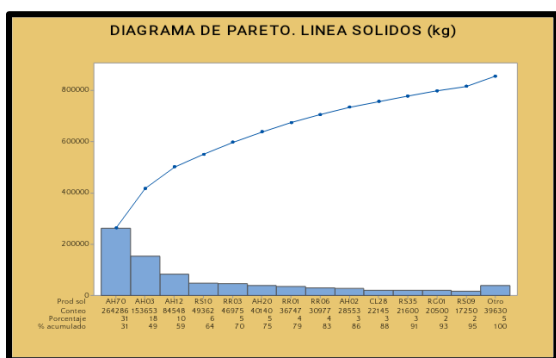


Figura 5. Diagrama Pareto sólidos(kg).

En la figura No 5 (kg), AH70 encabeza esta línea con un 31%, posteriormente AH03, AH11 y RS10 suman un total de 34%, a partir del RR03 el porcentaje es menor al 5%. Hay

una diferencia marcada en los tres primeros, pero a partir del RS10 la variabilidad del Pareto es casi nula.

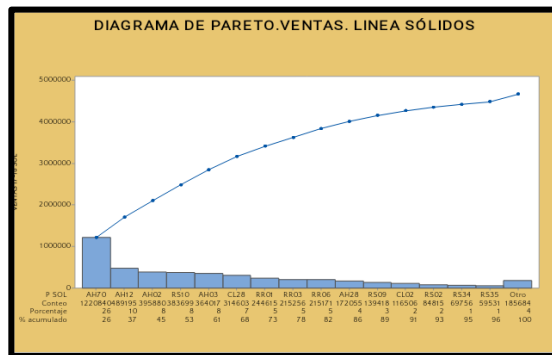


Figura 6. Diagrama Pareto sólidos (\$).

De manera análoga en la figura No 6 (ventas), AH70 representa el 26% en efecto AH12, AH02 y RS10 ocupan un 26%, ciertamente existe una tendencia constante a partir del AH12. Por tanto; AH70, AH03, AH12, RS10, RR03, RR01, RR06, AH20, AH02 y CL28, fueron el objeto de estudio, pues conforman el 80% del Pareto.

3.3 Diagrama de Pareto Línea Líquidos

En la figura No 7 (kg), el 30% de la producción se concentra en el AH23, el otro 30% está distribuido entre el AH11, EG25 y LH03, registra un pico en el AH23 respecto al AH11 y a medida que se avanza se hace constante el diagrama.

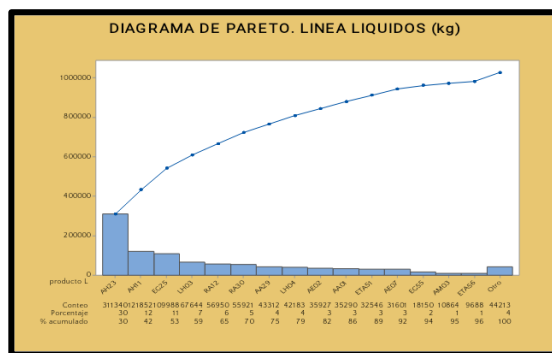


Figura 7. Diagrama Pareto líquidos(kg).

Para ventas (figura No 8), el comportamiento es muy equivalente a kilogramos, AH23 en primer lugar con un

25%, LH03, AH11 y EG25 suman el 30%, Pareto con un comportamiento muy poco variable a partir de LH03 y AH23 primer lugar en producción y venta.

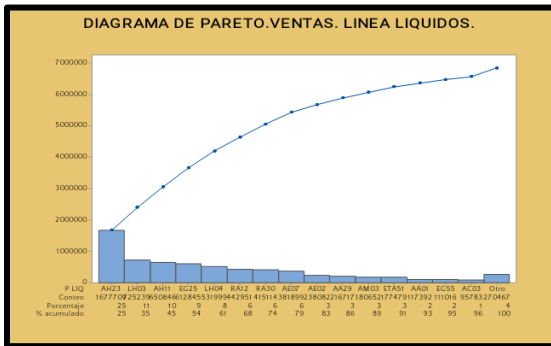


Figura 8. Diagrama Pareto líquidos (\$).

AH23, AH11, EG25, LH03, RA12, RA30, LH04, AE02, AA29, AE07 concentran el 80% tanto en kilogramos como en ventas.

3.4 Determinación del coeficiente de variación (CV)

Las estimaciones hechas a través del muestreo presentan dos tipos de errores; aquellos que son ajenos al muestreo (métodos, equipos, humano, etc.) y los errores de los cuales se contempla el CV que junto con la desviación estándar (σ) y número de muestras (n) proyectan las siguientes deducciones:

Tabla 3 Coeficiente de variación

Producto	Variable	n	σ	CV	Clasificación CV
RR09	V	32	5077,7	23,4	NR
AH70	pH	54	0,3	19,2	R
RR01	pH	8	0,9	15,1	R
CL28	pH	22	0,7	16,8	R
EG25	V	24	865,2	42,5	NR
LH03	V	21	362,6	15,6	R
LH04	V	22	447,4	15,6	R
AE02	V	16	244,7	16,7	R

NR: No recomendable; R: Regular

Es importante tener en cuenta la relación entre el tamaño de la muestra y el coeficiente de variación, tal es el caso del EG25 (v) y RR09 (v) que alcanzan una clasificación de no recomendable en CV, dicha estimación se considera poco confiable independientemente del tamaño de la muestra pues la desviación de estos dos productos es muy alta.

Del mismo modo las referencias; AH70 (pH), RR01 (pH), CL28(pH), LH04(v), LH03 (v), AE02(v) el CV es poco confiable, pero depende si el número de muestras es suficiente o no, a medida que la desviación se aproxima a cero el CV es más confiable, pero dicha tendencia a cero depende de

la proximidad o lejanía de cada uno de los datos con relación a la media.

En términos generales el coeficiente de variación proporciona una confiabilidad en el 80,48% de las variables excepto los ya citados cuyas causas son dispersión elevada de datos y en algunos casos el tamaño de la muestra.

3.5 Estabilidad de Procesos

A partir del criterio técnico y conocimiento de los productos se eligieron 41 variables (pH, %sólidos (%s), viscosidad (v), valor ácido (va) y densidad (d)) distribuidas así; 10 en línea reacción (4 productos), 11 en

sólidos (10 productos) y 20 en líquidos (10 productos), se desarrollaron los gráficos de estabilidad encontrando procesos inestables asociados a las posibles causas de variación.

y/o control de la reacción; C5: Ajuste de % sólidos; C6: alteración especificaciones materia prima; C7: cambio de formulación; C8: métodos de análisis; C9: proceso- tipo de mezclado- Condiciones Operativas.

Criterios de clasificación: C1: Ajuste pH; C2: adición equivocada de materia prima; C3: Gestión del Conocimiento; C4: alteración

Tabla 4. Procesos no estables

Líneas	Producto	Variable	Fuera de control estadístico	
			Causas comunes	Causas especiales
Línea Reacción	AA18	pH	C1	C3-C4
	AA18	%s	C2-C5	C3-C4
	AH06	pH	C2	C4-C3
	AH06	%s	C2	C3-C4
	RR09	pH	C2	C3-C4
	RA16	pH	C1	C3-C4
	RA16	%s	C2-C5	C4-C3
Línea Sólidos	AH70	pH	C2	C6
	RS10	pH	C2	C6
	RR03	pH	C2	C6-C7
	RR01	pH	C2	C6-C7
	RR06	pH	C2	C6-C7
	AH20	pH	C2	C6-C7
	AH02	pH	C2	C6-C7
	CL28	pH	C2	C6-C7
	AH23	va	C9	C6-C8
	EG25	pH	C2	C6-C7
	EG25	v	C2- C9	C6
	RA12	pH	C2	C6
	RA12	%s	C2- C9-C5	C3
	RA30	pH	C2	C6-C7
	RA30	%s	C2- C9-C5	C3

Inferencia Global

De las 41 variables tratadas el 56.1% (23) corresponden a procesos no estables y el 43.9% (18) a estables.

A nivel global las causas comunes caracterizan el 43,5% de la variación y el restante son especiales, esas 23 variables no estables corresponden a 16 productos de los 24 es decir el 66,66% del total, este alto porcentaje de variables y productos fuera de control estadístico refleja la voz del proceso.

Los 16 productos inestables están categorizados así; 25% línea reacción, 50% sólidos y 25% líquidos, es así como la línea crítica que más aporta inestabilidad a los procesos es sólidos.

De las nueve posibles causas de variación halladas, cuatro son comunes y cinco especiales; dentro de las comunes la que exhibe mayor porcentaje de frecuencia absoluta, 20 veces de 30, es la C2 (adición equivocada de materia prima), la C1 tiene un 6,7%, C5 y C9 13,3% para cada una.

En causas especiales la máxima frecuencia relativa es para C6 con un 35,9%, seguida por C3 con 23,1%, C7 con 20,5%, C4 con 17,9% y finalmente C8 con un 2,6%.

Inferencia por línea de producción

Las causas comunes y especiales enfrentadas se dividen por línea de producción y por participación en las causas totales.

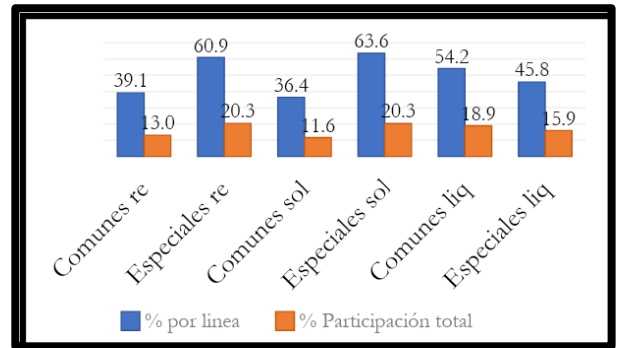


Figura 9. Distribución porcentual de las causas de variación.

Contrastando los tipos de causas por línea tenemos que:

Línea reacción: las causas comunes son el 39,1% y especiales el 60,9%, la causa común sobresaliente dentro de ese 39,1% es la C2 con 21,7%, por tanto, en las especiales hay una participación equivalente en las causas C3 y C4.

Línea sólidos: El 36,4% son comunes con una única causa C2, las especiales conforman el 63,6% donde existen ocho para tipo C6 y seis para tipo C7, correspondiente al 36,3 y 27,3% respectivamente.

Línea líquidos: A diferencia de las dos anteriores donde prevalecen las especiales sobre las comunes, aquí los dos tipos de causas están contenidas en porcentajes muy similares, siendo líderes las comunes con un margen estrecho. Reiteradamente la causa común C2 es la que más interviene en el proceso (7 de 13) y en las especiales la C6 con un 25% del total (45,8%)

3.6 Capacidad de Procesos

Se encontraron los índices de capacidad potencial Cp y real Cpk representados en las siguientes tablas, los valores sombreados indican las variables que no son capaces en Cp ni en Cpk

Tabla 5. Capacidad real Cp y capacidad potencial Cpk- línea reacción

Cp y Cpk Línea reacción										
	AA18		AH06			RR09			RA16	
	p H	%s	p H	va	%s	p H	v	%s	pH	%s
Cp	3,99	1,18	1,34	0,85	0,93	2,34	0,66	1,29	0,73	1,76
Cpk	3,88	1,03	0,98	0,74	0,16	1,96	0,55	0,29	0,52	0,58

Para empezar el AA18 y RR09 tienen calidad seis sigma (clase mundial) y son capaces en la variable pH.

De otro lado el AH06 (p H) y RA16 (%s) en Cp se consideran más que adecuado, clase 1 pero no son capaces en Cpk; así pues el AA18, RR09 (%s) son clase 2, adecuado para el trabajo, pero requiere modificaciones, en Cpk el AA18 es marginalmente capaz y el RR09 no es capaz, luego el AH06(va-%s) y RA16 (pH) son clase 3 y no son capaces; por consiguiente el RR09(v) es clase 4 y no capaz en Cpk.

Se deduce entonces que el 20% de las variables (pH) representadas en AA18 y RR09 son capaces; dentro de este contexto los procesos con capacidad potencial y real son AA18, pero la variable (%s) baja su capacidad a clase 2 y es marginalmente capaz en Cpk; y con respecto al RR09 en viscosidad se considera no capaz y en % sólidos es capaz en Cp y no en Cpk, es oportuno entonces revisar estos productos para optimizar las variables que le restan

respuesta a su capacidad sumándole a esto que el AA18 es el que más genera ingresos por venta al año y el de mayor rentabilidad para esta línea.

A su vez se debe potencializar la capacidad del AH06 y RA16 en sus variables analizadas para mejorar el desempeño estadístico de los productos, puesto que después del AA18 las ventas para los demás productos son semejantes, siendo más rentable en su orden RR09, RA16 y AH06.

Tabla 6. Capacidad real Cp y capacidad potencial Cpk- línea sólidos

Cp y Cpk Línea sólidos											
	AH70		AH03	AH12	RS10	RR03	RR01	RR06	AH20	AH02	CL28
	pH	Va	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
Cp	1,00	0,69	1,21	1,40	1,42	1,77	0,36	1,38	2,29	0,74	1,06
Cpk	0,73	0,63	0,77	1,19	1,34	1,34	-0,06	1,28	1,37	0,49	0,49

El AH20 es de clase mundial y es un proceso capaz en Cpk.

Por otro lado, el AH12, RS10, RR03, RR06 son clase 1, en Cpk AH12 y RR06 son marginalmente capaces, RS10 y RR03 son capaces. Además, AH03 y CL28 son clase 2, en Cp y no son capaces en Cpk, para AH70, AH02 no son capaces en Cpk y el proceso requiere modificaciones en Cp (clase 3).

El RR01 tiene Cpk negativo lo que indica que no cumple con las especificaciones y es clase 4.

Se infiere en que el 9.09% de las variables es capaz en Cp, clase mundial y en Cpk para el AH20-pH, y es el de menor volumen de ventas cerca de ocho veces inferior al AH70. Por otro lado, el 54,54% no son capaces (AH70, AH02, RR01, CL28), es de resaltar que el AH70 líder en ventas, muy superior a las demás referencias y con una rentabilidad que si bien no es la más alta está dentro de las mejores, por lo que se deben sumar esfuerzos para conseguir su capacidad.

Tabla 7. Capacidad real Cp y capacidad potencial Cpk- línea líquidos

Cp y Cpk línea líquidos											
	AH23		AH11		EG25			LH03		RA12	
	pH	va	pH	d	pH	v	%s	%s	v	pH	%s
Cp	0,99	1,51	1,24	1,31	1,17	1,21	0,81	0,61	1,01	0,93	1,72
Cpk	0,78	0,6	0,9	0,86	1,07	0,51	0,76	0,28	0,63	0,53	0,58
	RA30		LH04		AA29			AE07	AE02		
	pH	%s	%s	v	v	%s	pH	V	v		
Cp	1,42	0,88	1,70	1,12	0,41	0,87	1,63	0,98	0,68		

Cpk	0,47	0,77	1,6	0,85	0,36	0,73	0,98	0,71	0,62	
-----	------	------	-----	------	------	------	------	------	------	--

En esta línea ningún producto es clase mundial y uno solo es totalmente capaz en Cpk (LH04 %s)

Por consiguiente AH23 (va), RA12 (%s), RA30 (p H), LH04 (%s), AA29(p H) son clase 1; AH11 (pH y d), EG25 (p H y v), LH03 (v), LH04 (v) corresponden a la clase 2 en efecto AH23 (pH), EG25 (%s), RA12 (pH), RA30 (%s), AA29 (%s), AE07 y AE02 requieren de un análisis para alcanzar un nivel más alto de satisfacción (clase 3) y finalmente el AA29 (v-%s) es el único clase 4.

Esta línea de líquidos en particular resalta que solo una es capaz en cpk y la otra es marginalmente capaz, ninguna es clase mundial. Corresponden a clase 1 y 2 el 55%, de aquí que el 45% no son capaces potencialmente. Conviene decir que la línea más generadora de ingresos por ventas dentro de las referencias estudiadas es líquidos con un 46,7%, seguida de solidos con 31,6% y finalmente la línea reacción con 21,7%. El AH 11 es el segundo en ventas, pero el doble en rentabilidad respecto al primero que es AH23, siendo esta última clase 1 y el AH 11 clase 2. Se debe enfocar en centrar las variables dentro de los límites de especificaciones para así conseguir un creciente aumento en la capacidad real Cpk.

3.7 Costos por pérdida de Calidad- QLF

Se desarrolló un modelo de costos con base en la función de pérdida de calidad QLF de Taguchi y ajustado a las necesidades y variables de la compañía se llevó a cabo una simulación para lo cual se seleccionó el EG25 por su alto coeficiente de variación y desviación estándar, no

estable, no capaz(ver figura 10 y 11) y el batch récord registra ser el producto dentro de los estudiados con un elevado índice de ajustes para cumplir con la función objetivo (viscosidad fuera del límite de especificación superior).

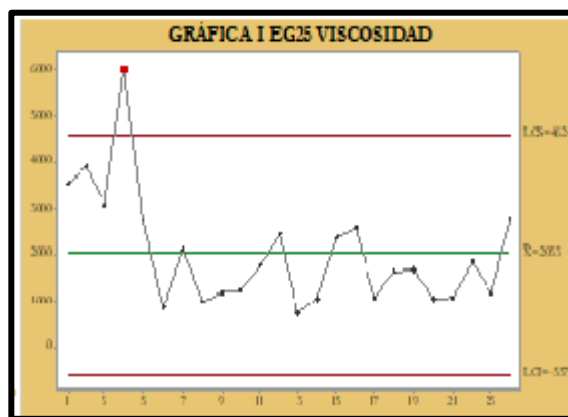


Figura 10. Estabilidad EG25 (viscosidad).

Punto fuera de límites de control, tendencia medianamente oscilatoria y la mayoría de los puntos por debajo de la media, es decir se acerca al límite inferior.

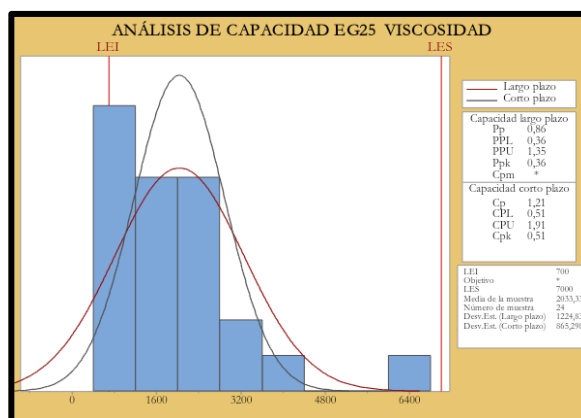


Figura 11. Estabilidad EG25 (viscosidad).

Histograma no centrado en los límites de especificación, con sesgo a la derecha, los datos se acercan al límite de especificación menor.

Para el modelo de costos por pérdida de calidad se tendrán en cuenta:

Costos por fallos Internos(\$/kg): Es el costo de adición de materias primas para ajustar al proceso o pérdida total del producto.

Costos de inspección y ajuste por variabilidad (\$/kg): Los que incurren en el tiempo gastado para controlar la producción, realizar los análisis respectivos y adiciones necesarias al producto.

Tabla 8. Costos por pérdida de calidad

Pérdida por variabilidad	
Producto	EG25
Parámetro	Viscosidad
Rango (Cp)	700-7000
Nominal (Cp) (N)	3850
LES	7000
Total (C) (\$/kg)	32
Función Pérdida de Calidad	
$L(X)=2,1588E-06(x-3150)^2$	
Viscosidad del Producto (Por Encima de LES)	Pérdida de Calidad (\$/kg)
3850	0,0
7500	43,0
8500	69,7
9500	102,9
10500	142,6
11500	188,7

12500	241,3
--------------	-------

El punto crítico señalado en rojo indica el valor de la viscosidad más frecuente (10.000 centipoises), con un costo por pérdida de calidad de 102.9 \$ /kg, el incremento exponencial entre el costo y los valores de la variable conlleva a una pérdida bastante significativa para la compañía por variabilidad en los procesos, causas principalmente C9 como común, C6 y C8 como especiales

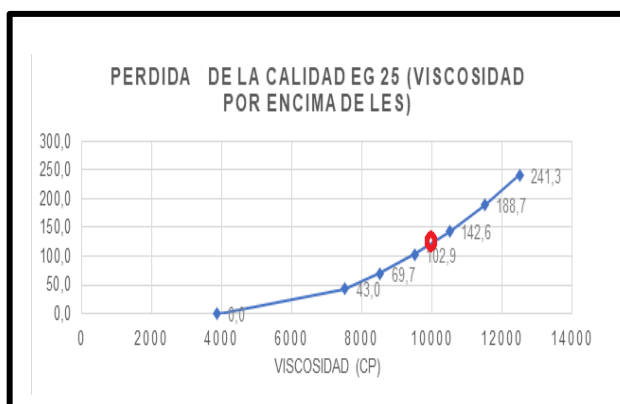


Figura 12. Función pérdida de Calidad EG25

3.8 Indicador: efectividad de la calidad

Se estableció la efectividad de la calidad (2017-2018) para el producto EG25, bajo la variable más crítica y se realizaron los siguientes planteamientos:

Tabla 9. Simulación Indicador efectividad de la calidad EG 25

Efectividad de la Calidad= Eficacia + Eficiencia		
Eficacia (Viscosidad) = kg obtenidos sin ajuste de viscosidad/kg totales producidos		
Eficacia (Viscosidad)	$40.000\text{kg} / 120.000\text{kg} * 100$	33,33%
Eficiencia (Viscosidad)= $(40.000\text{kg}/\text{CA}) * \text{TA} / (120.000\text{kg}/\text{CE}) * \text{TE}$		
Costo alcanzado (CA)	$40.000\text{kg} * 3320\$/\text{kg}$	\$132.800.000
Costo esperado (CE)	$120.000\text{kg} * 3320\$/\text{kg}$	\$398.400.000
Tiempo alcanzado (TA)	20h	20h
Tiempo esperado (TE):	60h	60 h
Eficiencia (Viscosidad)	$(40.000\text{kg} / \$132.800.000) * 20\text{h}$ $/(120.000\text{kg} / \$398.400.000) * 60\text{ h}$	33,44%
Efectividad de la calidad	0,3333+0,3344	0,6674

El EG25 tiene una efectividad del proceso en la variable viscosidad del 0,6674 y de acuerdo con los umbrales establecidos se encontraría en estado ineficiente.

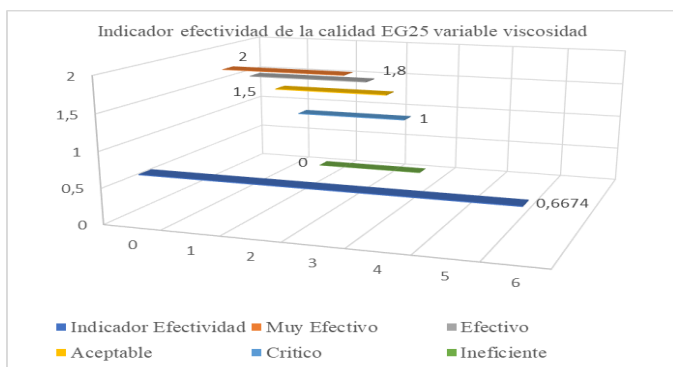


Figura 13. Efectividad de la calidad EG25 (viscosidad)

Se determinaron los siguientes umbrales para el indicador:

Tabla 10. Umbrales Indicador efectividad de la calidad EG 25

Valor	Umbral
≥ 2	Muy Efectivo

<2 y <1,8	Efectivo
<1,8 y <1,5	Aceptable
<1,5 y <1	Critico
<1 y <0	Ineficiente

4. Discusión

Basándose en la integración e interrelación de los conceptos estabilidad y capacidad

para cada una de las líneas se generaron múltiples hallazgos dado a la cantidad de variables y productos, se obtuvo la siguiente matriz:

Tabla No. 11. Matriz de relación capacidad y estabilidad.

A (estable y capaz)			B (capaz- no estable)		
Reacción	Sólidos	Líquidos	Reacción	Sólidos	Líquidos
-	AH12(pH)	LH04(%s)	AA18(pH-%s) AH06(pH) RR09 (pH)	RS10, RR03, RR06, AH20(pH)	EG25(pH)
C (estable-no capaz)			D (no capaz- no estable)		
Reacción	Sólidos	Líquidos	Reacción	Sólidos	Líquidos
AH06(va) RR09(v-%s)	AH70(va) AH03(pH)	AH11(d-pH), EG25(%s), LH03(%s-v), LH04 (v) AE02(v), AA29(pH, v, %s), AE07(v)	AH06(% s) RA16(pH-%s)	AH70, RR01, AH02, CL28(pH)	AH23(pH-v) EG25(v), RA12(pH, %s) RA30(pH, %s)

Línea reacción

Para la línea de reacción no hay ninguna variable que sea capaz y estable, en el cuadrante B existe un 40%, en el C un 30 % y D un 30% del total de variables en la línea, dicho cuadrante es el crítico por lo tanto el AH06 (%s) y el RA16 (pH y % s) son productos que requieren tratamiento de sus causas de variación.

El AA18 es el producto con más volumen de ventas y mayor rentabilidad, sin embargo, es necesario realizar modificaciones al proceso de producción, control operacional; pH y %sólidos no están dentro de límites de control, pero se considera un proceso capaz.

El RA16 es un producto que no es capaz ni estable (pH y % de sólidos), es el menor volumen de ventas y kilogramos con la tercera rentabilidad.

Mientras que el RR09 tercero en volumen de ventas y rentabilidad tiene la viscosidad y % sólidos estables, pero no capaces, el pH no estable, pero si es capaz. Se debe minimizar esta alta variabilidad estadística.

Finalmente, el AH06 es el segundo en ventas y el de menor rentabilidad, el % de sólidos no es capaz ni estable, el pH no está dentro de los límites de control, pero es capaz, y el valor ácido está dentro de los límites de control, pero no es capaz. Este producto presenta alta diferenciación dentro de las tres variables pues cada una emite un concepto diferente de estabilidad y capacidad, se debe revisar la adición de materia prima, ajuste del proceso, muestreo y método de análisis.

Línea Sólidos

El AH12(pH) es estable y capaz representa un 9.09%, para el cuadrante B el 36.36% son capaces, pero no estables, 18.18 % son variables estables, pero no capaces

mientras que el 36.37% no son estables ni capaces y corresponden a los productos AH70, RR01, AH02, CL28(pH).

El producto AH12 segundo producto en ventas y cuarto en rentabilidad y único que es estable y capaz, por su parte el AH70 primero en ventas y sexto en rentabilidad no es capaz ni estable para la variable pH, en la variable valor ácido está dentro de los límites de control, pero no es capaz. El RR01, AH02, y CL28 son el séptimo, tercero y sexto en volumen de ventas y en rentabilidad son octavo, primero, y noveno respectivamente son no capaces y no estables.

Para los demás (RS10, RR03, RR06, AH20, AH03) se deben mejorar los procesos, importante tener en cuenta los cambios de materia prima que pueden estar ocasionando esta variabilidad, tiempo de mezcla, muestreo.

Línea Líquidos

De modo similar en líquidos el LH04(%s) es estable y capaz corresponde a un 5% de las variables, el 5 % EG25(pH) se halla en cuadrante B, 55% son estables y no capaces y un 35% no son estables ni capaces.

El producto LH04 es estable, capaz en la variable (% de sólidos), es el quinto más vendido y cuarto en rentabilidad, aunque la variable viscosidad es estable y no capaz.

Entonces el AH23 es el primero en ventas, noveno en rentabilidad y con calificación D (no estable, no capaz); la variabilidad en pH y valor ácido es alta, por consiguiente, se debe revisar proceso de producción, método de análisis y muestreo.

Para el RA12 (pH y %sólidos), sexto en ventas y primero en rentabilidad y RA30 (pH y %sólidos) séptimo en ventas y quinto

en rentabilidad; son calificación D (no capaces no estables)

Por su lado el EG25 (v), cuarto en ventas y sexto en rentabilidad, no capaz, no estable; la variable pH es no estable, si capaz y la variable % sólidos es estable no capaz.

AH11(d-pH), LH03(%s-v), son tercero en ventas y segundo en rentabilidad y segundo en ventas y tercero en rentabilidad respectivamente, pero solo cumplen con un requerimiento estadístico, son estables, pero no capaces. Son referencias a tener en cuenta pues se encuentran dentro de los primeros lugares en ventas y rentabilidad.

AE02(v), AA29(pH, v, % s), AE07(v) son estables, pero no capaces, en ventas y rentabilidad ocupan los últimos lugares.

Concluyendo se puede decir que la línea de líquidos es la que más ingresos deja a la compañía (46,7%), pero al mismo tiempo existe alta variabilidad en dicho proceso, pues solo el LH04 es estable y capaz en la variable crítica (% de sólidos), en viscosidad es estable pero no capaz; el 60% de las variables son estables o capaces (cuadrante B y C) y el 35% no es estable ni capaz

Mientras que la línea sólidos segunda en ingresos con el 31,6%, el AH12 es único estable y capaz, el 54,54% de las variables se concentran en B y C y en estado crítico (D) corresponden un 36,36%.

Por su lado línea reacción tienen menor participación en el mercado (21,7%), se identifica por tener el menor número de referencias, procesos complejos y costos de producción más altos, el 70% de las variables se encuentran en los cuadrantes que bien son capaces o estables y el 30% no son estables ni capaces.

La línea de reacción es la que más variables en cuadrantes B y C tiene (70%), le sigue la de líquidos con un 60%; de las 41 variables tratadas el 56.1% (23) corresponden a procesos no estables y el 43.9% (18) a estables y la línea crítica que más aporta inestabilidad a los procesos es sólidos.

La causa común que exhibe mayor porcentaje de frecuencia absoluta es la C2 con un 66,66% (adición equivocada de materia prima), se da principalmente por el factor humano, errores en pesaje, identificación incorrecta de materia prima, mantenimiento de básculas, que se hace muy común en este tipo de industria y es el foco para tomar las acciones pertinentes.

En causas especiales la máxima frecuencia relativa es para C6 con un 35,9%, seguida por C3 con 23,1%, C4 con 17,9%. La alteración de las especificaciones en materia prima (C6) denota un cambio de proveedor o materia prima que no cumple con los requisitos de entrada, no afecta la funcionalidad, pero si las especificaciones del producto final.

La cantidad de variables que son estables y capaces es insignificante tan solo 2 de 41, una gran oportunidad de mejora son las 25 variables que se encuentran en B y C para lo cual se deben corregir las causas de variación, estar muy cerca de la función objetivo por cada lote de producción, reevaluar algunos límites de especificación y crear repetibilidad y reproducibilidad en las operaciones involucradas de la calidad de operación y producto.

Un riesgo son las 15 variables de 41 que no son capaces ni estables, exigen cambios estratégicos, operacionales con un enfoque holístico, toma de conciencia y acciones correctivas inteligentes y eficaces consolidadas en un plan estratégico de riesgos y oportunidades.

El ajuste de las variables para cumplir con la función objetivo exige un conocimiento técnico y operativo, la materia prima y cantidad adicionada son diferentes para cada producto y parámetro analizado, dependiendo si está por encima o por debajo de los límites de especificación.

La función pérdida de calidad del EG25 en su variable viscosidad no es capaz en Cpk, capaz potencialmente, el proceso es clase 2, no es estable, es el producto que más reparaciones presenta para llegar a los límites de especificación y por cada kilogramo producido existe una pérdida de aproximadamente 102.9\$, esto se traduce indudablemente en tiempo, costo de materia prima, mano de obra y así mismo la efectividad de la calidad es apenas la tercera parte de la meta hallándose en estado ineficiente.

Se debe enfocar la gestión de producción y calidad para minimizar las posibles causas de variación del EG 25: adición equivocada de materia prima, proceso-tipo de mezclado- condiciones operativas y alteración especificaciones materia prima.

Es imperativo centralizar la mejora de procesos evitando desperdicios, reprocesos, ociosidad, exceso de inventario, cuellos de botella, implementando una filosofía empresarial para crear condiciones óptimas en la cadena de abastecimiento desde la generación del pedido, compras de materiales e insumos, liberación y entrega al cliente garantizando un mejor acercamiento a la función objetivo, reducir la variación, disminuir costos y aumentar la competitividad en este tipo de industria con una economía emergente, cambiante y de crecimiento constante a nivel mundial.

Requiere establecer la compañía un método de muestreo enmarcado bajo la

norma ISO 2859:2012 para obtener información confiable, reducir tiempo, costos y controlar las causas y coeficiente de variación.

La gestión del conocimiento surge como causa especial principalmente en la línea reacción y es transcendental realizar acciones para la transferencia desde la fuente hasta las partes interesadas a través del conocimiento tácito, implícito o explícito haciendo cumplimiento al numeral 7.1.6 de la ISO 9001:2015.

Enfrentarse a un control estadístico de procesos en una pyme es un reto muy alto, por que exige cambio de cultura organizacional, madurez en el sistema de gestión de calidad, recursos, compromiso, convicción y formación; la relación costo beneficio como se pudo reflejar en los hallazgos es enorme solo falta vencer ese paradigma de pensar que esto solo es aplicable a producciones en línea y en industrias muy distantes a la química.

Se recomienda realizar diagnóstico de las principales causas de variación con datos, herramientas de calidad y análisis estadístico para soportar técnicamente el estudio en este tema.

Sugiere esta investigación implementar un modelo de control de variación para los productos más críticos fundado en la conformidad de los límites de especificación, para luego evaluar la función de pérdida de calidad y el indicador de efectividad como filosofía de mejoramiento continuo con el propósito de enfocarse en el producto perfecto, proyectándose a la existencia de un equilibrio trifuncional entre estadística, costos y calidad mediante la optimización del diseño de productos y de procesos innovadores.

Hacer uso del método QFD (Quality Function Deployment) (Yoji Akao) en el

área de producción y ventas que admita capturar la voz del cliente traducidas en necesidades y expectativas y los requerimientos técnicos para interrelacionarlas en un enfoque sistémico convergente, utilizando la casa de la calidad (House of Quality HOQ), accediendo a una mejora significativa del sistema de gestión de calidad y un paso hacia el cambio de filosofía de calidad actual.

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al docente Ingeniero Juan Carlos Santiago, por su tiempo, apoyo y asesoría técnica que facilitaron la consecución de los objetivos.

Así mismo, agradezco al Director Técnico de la Compañía, Rafael Tilaguy por brindar soporte en la recolección de datos e información punto de partida para el desarrollo del proyecto.

Referencias Bibliograficas

- Alfaro, C. A. (26 de agosto de 2013). Desarrollo e implementación de una carta control por variables para corridas cortas de producción en los Laboratorios Farmacéuticos Zaragoza. México.
- Aristizabal, M. C. (2018). *Anexo 3 Análisis Sector Químico*. Medellín.
- Arthur, J. (2011). *Lean Six Sigma Demystified, Second Edition*. New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill.
- Brenna, L. P. (2011). *Operations Management*. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Professional.
- Campos, R., & Rocha, R. (2009). *O controle estatístico de processos (CEP) para o monitoramento da qualidade do farelo lex no processo do óleo de soja na empresa CAC*". NUPEM.
- Fermin, J. S., Valdivieso, M., & Orlandoni, G. (2009). *Control Estadístico de Procesos multivariantes en la industria alimentaria: Implementación a través del estadístico T2-Hotelling*. *Agroalimentaria*, 15.
- Green, D. W., & Perry, R. H. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook* (octava ed.). New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw Hill Professional.
- <https://www.slideplayer.es>. (s.f.). Obtenido de <https://www.slideplayer.es/slide/28293/>
- Hwaiyu, G. C. (2016). *Manufacturing Engineering Handbook, Second Edition. Quality: Inspection, Test, Risk Management, and SPC* (Second ed.). New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Professional,
- INE. Instituto Nacional de estadística. (26 de abril de 2016). Coeficientes de variación y error asociado al estimador. Chile.
- ISO. (2015). NTC ISO 9000. 2015. *Sistemas de Gestión de la calidad, fundamentos y Vocabulario*. Icontec.

- ISO. (2015). NTC ISO 9001: 2015 Sistemas de gestión de calidad. Requisitos. Bogotá.
- ISO. (2015). NTC ISO 9004: 2015 Sistemas de Gestión de calidad. Directrices para la mejora de desempeño. Bogotá.
- Kai , Y. (2009). *Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development* (segunda ed.). New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, México City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill.
- Keller, P. (2011). *Statistical Process Control Demystified. Determining Suitable to Requirements*. New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto: Mc Graw Hill professional.
- Mejia, C. (s.f.). *Indicadores de Efectividad y Eficacia*. Obtenido de www.planning.com.co: <http://www.ceppia.com.co/Herramientas/INDICADORES/Indicadores-efectividad-eficacia.pdf>
- Minitab. (s.f.). www.support.minitab.com. Obtenido de support.minitab.com/es-mx/minitab/18/Asistente_Gráficas_de_control_de_variables.pdf
- Montero Fernández Vivanco, G. (noviembre de 2016). Diseño de indicadores para la gestión de proyectos. Tesis.
- Montes Valencia, N. (2015). La industria química: importancia y retos. *Lámpsakos*, 72-85.
- Montgomery, D., & Runger, G. C. (2012). *Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería* (segunda ed.). México: Limusa.
- Vilana Arto, J. R. (2011). Fundamentos de Lean Manufacturing. Escuela de Organización Industrial. Creative commons Reconocimiento No comercial (by-nc-sa).
- www.ingenieriaindustrialonline.com. (s.f.). Obtenido de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/gesti%C3%B3n-y-control-de-calidad/capacidad-de-proceso/>