REVISTA INGENIERÍA UC. Vol. 11, Nº 2, 78-91, 2004

Evaluación del sistema de dosificación de aditivos para la harina panadera en una empresa molinera

Mónica Figueredo, Alberto Mieres-Pitre, Edgar Monserrat, Edward Vásquez
Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela
Email: monicalfv@hotmail.com, albertopitre@icnet.com

Resumen

El trabajo consiste en evaluar el sistema de dosificación de aditivos para la harina panadera de una empresa molinera, con la finalidad de determinar la confiabilidad del mismo. Se realizó un diagnóstico de la situación inicial, mediante observaciones directas del proceso, entrevistas, toma de datos y el posterior análisis estadístico. Se determinaron las variables críticas que causan influencia en la dosificación fuera de especificaciones mediante el desarrollo de un diagrama causa efecto, determinando su efecto por medio de análisis cualitativos y cuantitativos. Se construyeron las curvas de calibración de las máquinas dosificadoras por cada polea de la máquina mediante toma de muestras y la obtención de correlaciones. Se determinó el tiempo de respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de operación, además del estudio de la relación entre las variables críticas mediante un diseño de experimentos. Se generaron las alternativas de solución, desarrollando las bases para un control estadístico de proceso y elaborando una metodología de control siguiendo las normas COVENIN ISO-9000: 2000 Sistemas de Gestión de la Calidad.

Palabras claves: Harina de trigo, molienda, aditivos, dosificación.

Evaluation of the additive metering system for bakery flour in a milling company

Abstract

The purpose of this work was to evaluate the metering additive system for bakery flour in a milling company, in order to determine its reliability. A diagnosis of the initial situation was made, with direct observations of the process, interviews, data collecting with the following statistical analysis. The critical variables which leaded the metering specifications out of the permissive ranges were determined by means of the development of a cause-effect diagram, determining their effect by means of qualitative and quantitative analyses. Next, the calibration charts of the dispenser machines were developed to each one of the additive machine pulley, taking samples and obtaining the respective correlations. Then, the reaction time of the system was determined according to the changes in the operation conditions, besides the verification of the relationship between the critical variables by experiments design. Alternatives solution to the problem described were generated, developing the bases for a statistical process control and constructing a control methodology of the standardized metering system, following the rules of the COVENIN ISO-9000: 2000 quality Management systems.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de las empresas de generar productos de alta calidad que satisfagan las necesidades de los clientes y que cumplan con las normas establecidas, las llevan a valerse de todas las herramientas posibles que puedan prevenir o disminuir dichos problemas.

La harina de trigo panadera es un producto que, como su nombre lo indica, se emplea en la fabricación de pan a nivel industrial, en panaderías y pastelerías, las cuales a su vez le distribuyen su producto a los habitantes de la comunidad en la que se encuentran ubicados. La incorporación de aditivos a la harina de trigo con fines de panificación es una de las bases fundamentales para elaborar un buen pan.

Existe un problema de confiabilidad en el sistema de dosificación de aditivos a la harina panadera y no se puede garantizar que este proceso se esté llevando a cabo de manera adecuada, es decir, la cantidad de aditivo dosificada a la harina no es la correcta y que por tanto no se estén cumpliendo las especificaciones establecidas por el departamento de aseguramiento de la calidad, el cual, a su vez se rige por lo establecido en las normas oficiales de referencia venezolana *(COVENIN 217-2001*).

Es muy importante que la dosificación en la harina panadera sea la establecida, ya que, las características del producto final dependen en gran parte de la cantidad de este aditivo; no pudiendo encontrarse este ni en exceso, ni en defecto.

La evaluación que se realiza ayuda a la empresa a construir y reforzar un Sistema de Gestión de la Calidad, tan importante para la obtención de productos de alta calidad y generar el menor número de rechazos posibles.

2. LA HARINA DE TRIGO

La harina de trigo es la materia prima por excelencia en todos los procesos panarios. Conocer su composición y los efectos que cada una de estas materias pueden aportar durante la elaboración de los productos en el obrador es básico para el profesional, puesto que, la calidad de esas elaboraciones dependerá de la correcta interrelación de los elementos constitutivos de la harina. Igualmente, la harina como tal tiene una serie de propiedades y requiere de una atención especial a la hora de su almacenamiento y conservación [1].

Se llama harina, sin precisar la especie de grano molido, al producto obtenido por la molienda del grano de trigo, limpio e industrialmente puro. En la Tabla 1 se presenta la composición de la harina para panificación.

Tabla 1. Composición de la harina destinada a la fabricación del pan.

Almidón	70-75 %	Proteínas	8-12 %
Agua	< 15 %	Azúcares simples	1-2 %
Materias Grasas	1,2-1,4 %	Materias Minerales	0,5-0,6 %

2.1 Aditivos agregados a la harina de trigo

Los aditivos alimentarios son sustancias que se añaden a los alimentos intencionalmente con el fin de modificar sus propiedades, técnicas de elaboración, conservación o mejorar su adaptación al uso a que estén destinados. En ningún caso tienen un papel enriquecedor del alimento.

A las harinas destinadas a la panificación se le agregan una serie de aditivos que dependerán de las formulaciones generadas por cada empresa. En general a esta mezcla de aditivos se le denomina premezcla (AP-4) y puede estar constituida por:

- Sustancias que impiden las alteraciones químicas biológicas (antioxidantes y conservantes).
- Sustancias estabilizadoras de las características físicas (emulgentes, espesantes, gelificantes, antiespumantes, antipelmazantes, antiaglutinantes, humectantes, reguladores de pH).
- Sustancias correctoras de las cualidades plásticas (mejoradores de la panificación, como la azodicarbonamida) [2].

2.2 Tecnología de dosificación

La tecnología para fortificar la harina es simple. Primero se necesita una premezcla de los micronutrientes que se desean agregar. El proceso de fortificación en sí se logra agregando micronutrientes a través de un alimentador volumétrico (Figura 1) ubicado hacia el final del proceso de molienda.

El alimentador que se usa con mayor frecuencia está formado por un tornillo alimentador giratorio que gira dentro de una cámara que contiene la premezcla e impulsa esta premezcla a través de una descarga. La cantidad de premezcla que se agrega a la harina se puede modificar variando la velocidad del motor.

La concentración de la premezcla que se agrega a la harina se puede calcular pesando la cantidad de premezcla depositada por el alimentador en un minuto, dividido por el volumen del flujo que pasa por debajo durante el mismo período de tiempo.

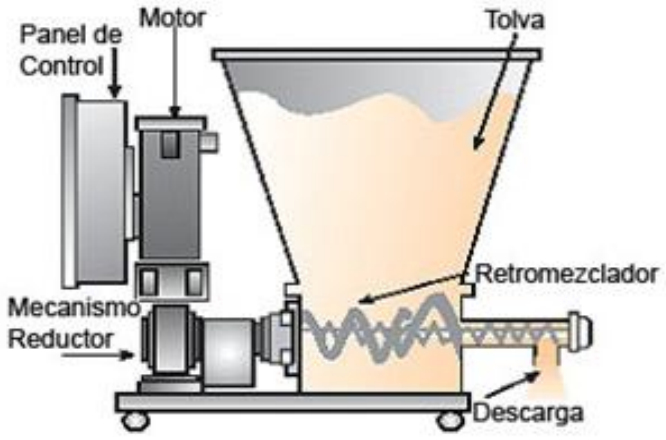


Figura 1. Alimentador volumétrico para agregar la premezcla de micronutrientes.

La homogeneidad de los micronutrientes en la harina fortificada depende en gran medida de la ubicación del alimentador. Es muy importante que los micronutrientes se mezclen bien con la harina [3].

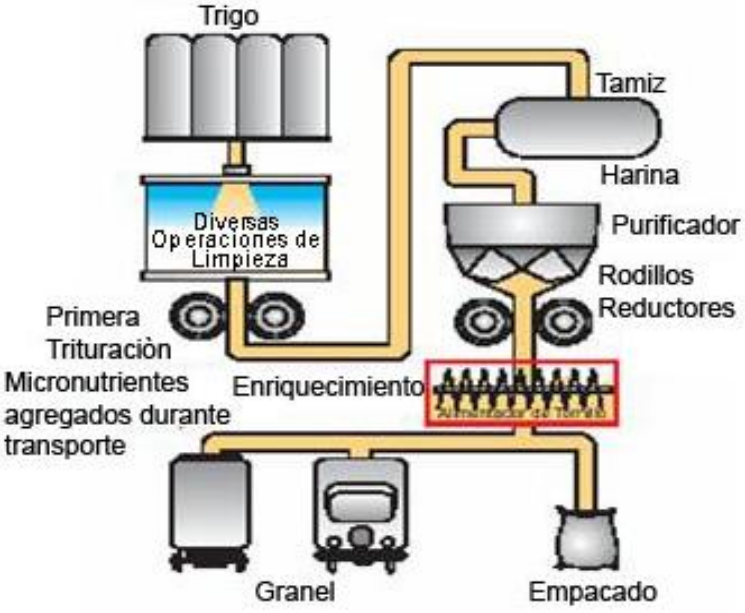


Figura 2. Diagrama de producción simplificado

En el sistema que opera por gravedad, la experiencia ha demostrado que el lugar más apropiado para agregar los micronutrientes es alrededor del punto medio del transportador de tornillo sin fin que recoge la harina de todos los pasos del molino, justo antes del almacenamiento a granel o ensacado (Figura 2). Si el alimentador se coloca más hacia el principio del tornillo sin fin, la cantidad de harina en el transportador será muy pequeña. Por otra parte, si se coloca el alimentador hacia el final del transportador de tornillo sin fin, no se logrará la homogeneización necesaria [3].

Otro término importante es el Feedrate, el cual es un parámetro colocado en el computador que le indica al controlador automático cual va a ser la cantidad de aditivo a dosificar según la carga de harina. Este es un valor que depende de la máxima dosificación de la máquina y de la densidad del aditivo que se esté utilizando.

3. METODOLOGÍA APLICADA A LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Figura 3. Etapas para la solución del problema.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diagnóstico de la dosificación de aditivos para la harina panadera

Se realizó una inducción al proceso productivo que se lleva a cabo en el molino, incluyendo entrevistas del tipo no estructurado al personal involucrado en el sistema de dosificación; además de la revisión de manuales y proyectos previos acerca de la dosificación de aditivo a la harina panadera, indagación de los parámetros y procedimientos necesarios para establecer la cantidad de aditivo a dosificar. Asimismo se investigó acerca de los límites de especificaciones.

El sistema automático depende de la señal que envía la balanza de harina panadera a las máquinas dosificadoras. Esta señal representa la carga de harina o la cantidad de harina que se produce por hora en el molino. La cantidad de harina producida en el molino obedece a la carga de trigo que se esté incorporando y a cómo se encuentre la extracción para ese momento. Como el molino donde se realiza el estudio tiene una capacidad de 20 ton/h y la extracción máxima es 74 %, para harina panadera, se estaría tratando con una carga de harina aproximadamente de 14800 kg/h.

Existen dos (2) máquinas encargadas de dosificar el aditivo en el molino, y están dispuestas para que dosifiquen entre las dos la cantidad total de aditivo necesaria para la mezcla de trigo. Para esta evaluación se dosificó 240 g de AP-4 por cada 100 kg de harina, lo que dividido entre las dos máquinas correspondería a 120 g de AP-4 por cada 100 kg de harina, manteniendo las especificaciones en ± 5 %.

Se tomaron una serie de datos a lo largo de dos semanas en el molino y se realizaron histogramas de frecuencia para la dosificación, usando el programa EXCEL, indicando un número de clases igual a cinco (5), obteniéndose como resultado las Figuras 4 y 5.

En la Figura 4, la cual representa la dosificación de máquina 1, se nota que pocos valores se encuentran dentro de los límites de especificaciones, aunque se comprueba que la dosificación tiene un comportamiento normal.

En la Figura 5 se observa que la dosificación media de la máquina 3 estaba desplazada de la media nominal.

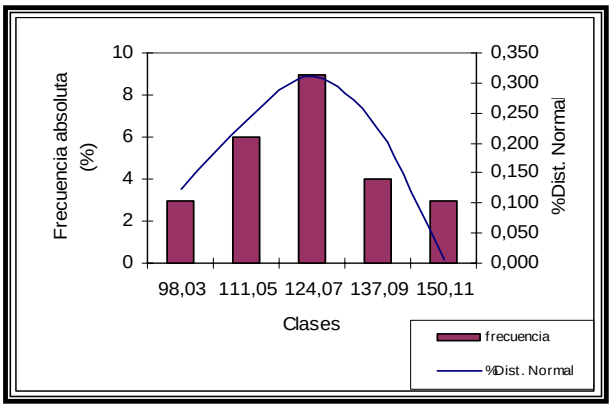


Figura 4. Histograma de frecuencias de la dosificación de la máquina 1.

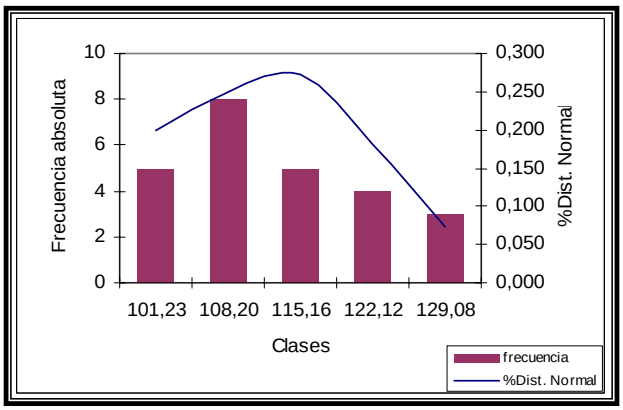


Figura 5. Histograma de frecuencia de la dosificación de la máquina 3.

4.2. Determinación de las variables críticas que influyen en el proceso de dosificación de aditivos

La identificación de las variables que influyen en la dosificación fuera de especificaciones, se realizó mediante el desarrollo de un diagrama causa-efecto; recopilando información de las materias primas y el producto terminado, tomando muestras a diferentes condiciones de operación, para luego realizar un análisis cualitativo de las condiciones físicas del producto para caracterizar las variables críticas efectuando pruebas de panificación. Además se realizaron gráficos de observaciones individuales para la evaluación cuantitativa.

En la Figura 6 se muestra el diagrama causa efecto general, el cual fue depurado luego de considerar los siguientes aspectos:

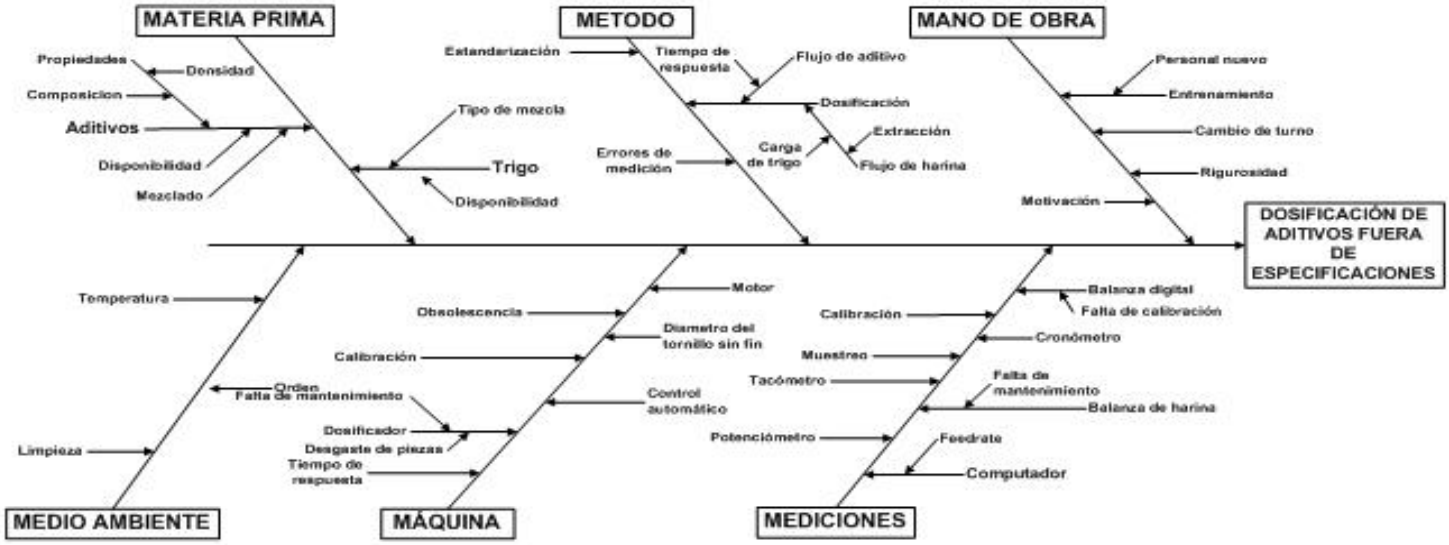


Figura 6. Diagrama Causa-efecto de las variables que inciden en la dosificación de aditivos a la harina panadera fuera de especificaciones.

Materia Prima: En cuanto a la premezcla AP-4 se determinó que la densidad era una variable fundamental en este estudio, debido a que se está trabajando con dosificadores volumétricos y la variable a controlar es el flujo másico de aditivo. El tipo y la mezcla de trigo determinan la cantidad de aditivo que tiene que llevar la harina panadera para cumplir con las especificaciones de la panificación. Durante el desarrollo de esta investigación esta variable no influyó, ya que se dosificaron 240 g de AP-4 por cada 100 kg de harina.

Medio ambiente: Se determinó que el medio ambiente no tenía influencia sobre el proceso de dosificación de aditivos a la harina panadera.

Máquina: En esta parte se hace referencia a los equipos que forman parte del sistema de dosificación de aditivos a la harina panadera, como lo son el control automático, las máquinas dosificadoras, para las cuales se sugirió la inclusión de las mismas en el cronograma de calibración de los equipos del molino y el mantenimiento y limpieza periódica de todas sus partes.

Mano de obra: La falta de un procedimiento estándar de control de la dosificación de la harina panadera originó un producto final fuera de especificaciones, y se determinó que tomar en cuenta al personal involucrado en el control de la dosificación es fundamental en el estudio del sistema.

Para mejorar la mano de obra se procedió a realizar un entrenamiento del personal involucrado en el control de la dosificación, tomando en cuenta siempre sus sugerencias, destacando su rol en el proceso y en su mejoramiento continuo. Además de informarles como funciona el sistema con el cual trabajan, ya que se comprobó que existían muchos paradigmas en torno al funcionamiento del sistema de dosificación y sus variables.

Medición: En esta sección se incluyen todas las mediciones de las variables que se realizan en el sistema de dosificación de aditivos a la harina panadera. Todos los equipos de medición, como balanzas, tacómetro y cronómetro, estaban calibrados o en su defecto se les calibró antes de comenzar el estudio. Por tanto la medición fue descartada como causa de la dosificación de aditivo fuera de especificaciones.

Método: El proceso de control de la dosificación de aditivos a la harina panadera carece de un procedimiento estándar, lo que trae como consecuencia que cada operario realice el control a su criterio. La falta de rigurosidad en el muestreo, consecuencia de la falta del procedimiento, ocasiona una toma arbitraria de medidas por parte del personal para mejorar una dosificación de la cual se desconocía su estado. Es por esto que el método resulta ser una variable crítica en la dosificación de aditivos fuera de especificaciones. Por estas razones es que se tomó la decisión de normalizar el método de trabajo estableciendo procedimientos de medición y posterior control. Para este

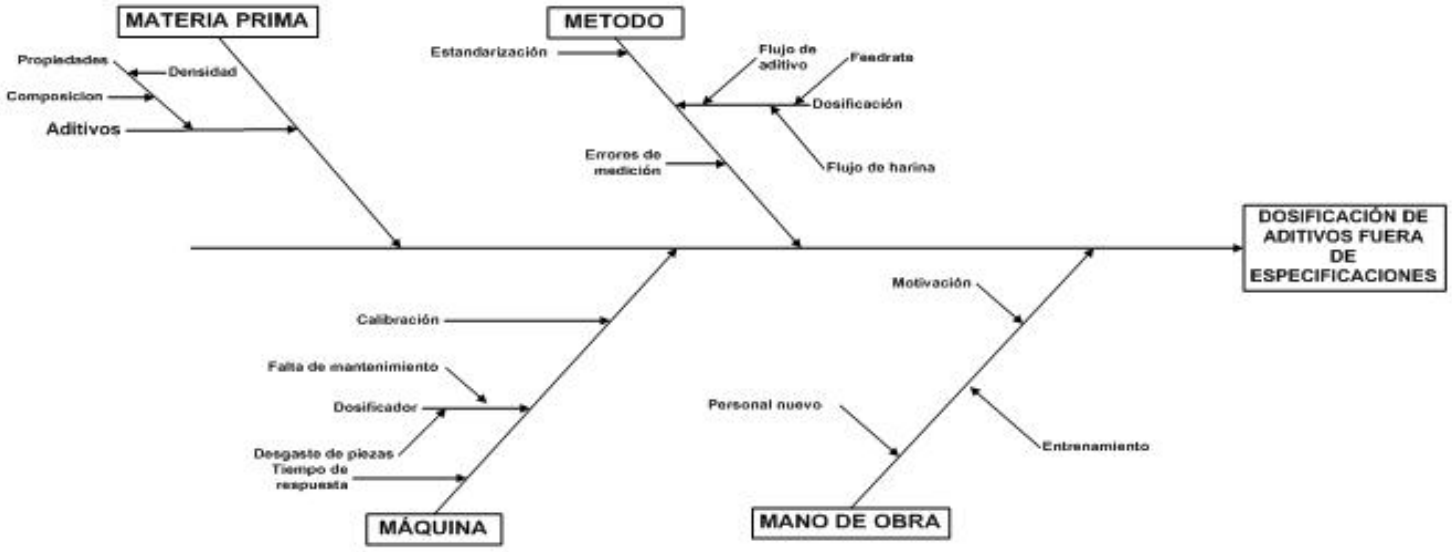


Figura 7. Diagrama causa-efecto de las variables críticas de la dosificación de aditivos fuera de especificaciones

caso se implantaron gráficos de control para cada uno de los dosificadores de aditivo. En la Figura 7 se muestra el diagrama causa-efecto de las variables críticas determinadas después de este análisis.

También se realizó una prueba de panificación para evaluar los efectos de la dosificación fuera de especificaciones. Las etapas principales del procedimiento de panificación son mezclado, amasado, sobado, fermentación y cava, elaboración y horneado. La prueba se realizó tomando 3 muestras de harina en las proporciones mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Prueba de panificación.

Muestras	Cantidad de AP-4 (g)	Dosificación que representa (g/100 kg harina)
1. Patrón	1,2	240
2. Defecto	0,2	40
3. Exceso	2,0	400

Durante este proceso se apreciaron la acción de masa, apariencia física, elasticidad y dureza. Además se realizaron chequeos de volumen, miga, apariencia y peso (ver Tabla 3).

Siguiendo con la elaboración para la muestra 1 se obtuvo un resultado igual que el estándar, la muestra 2 resultó una masa suave y elástica debido a su poca cantidad de AP-4, y por último la muestra 3 tuvo en acción de masa corta (se rompía al tratarla de estirar), gomosa y débil para el momento de hacer los panes, esto se debe al exceso de aditivo que hace que la masa se rompa. Luego de la segunda fermentación y antes del horneado se notó que la muestra 2 presentaba unos panes suaves y largos; y la muestra 3 presentó unos panes bastante deformes, abiertos (véase Figura 8).

Exceso Aditivo (3)

Aditivo Estándar (1)

Poco aditivo (2)

Figura 8. Aspecto de los panes después de la fermentación.

Después del horneado se evidenció lo ya apreciado después de la segunda fermentación. En la Figura 9 de izquierda a derecha se tiene pan con sobre dosificación (3), pan con poca dosificación (2) y el último es el patrón (1). Se observa claramente que los panes 1 y 2 no abrieron, que el 1 tiene una forma

Tabla 3. Resultados de la panificación de pan francés.

Muestra	Proceso			Volumen (cm^3)	Panes cerrados	Color de miga
	Mezclar (Temp ºF)	Elaborar (Acción masa)	Hornear (Acción masa)			
1	85	Igual estándar	Igual estándar	3100	2	Mejor est.
2	87	Suave y elástica	Suave	2450	8	Inferior est.
3	87	Corto, gomoso y débil	8 abiertos	2550	8	Inferior est.

poco común, y que tanto el 1 como el 2 presentaron poco volumen, estando por debajo del estándar de 3100 cm^3.

Figura 9. Aspecto final de los panes.

Análisis del procedimiento de control de la dosificación

El control de la dosificación consiste en comparar el flujo másico real de aditivo y la carga de harina panadera, resultando un valor que se denomina dosificación que tiene que ser 240 g/100 kg de harina. En la búsqueda de reducir al máximo los errores de medición, fue necesaria la estandarización del procedimiento.

Para caracterizar variables críticas como el flujo de harina, el flujo de aditivo, y el feedrate se realizó la toma de datos y se analizaron por medio de un gráfico de lecturas individuales y rangos móviles. En las Figuras 10 y 11 se observan valores de la dosificación de aditivos para distintas condiciones de operación donde se ve reflejada la influencia de estas variables.

La carga de harina para estos datos estuvo en un rango de (13000-14100) kg/h, y el feedrate varió entre (23-25) para la máquina 1 y (24-26) para la máquina 3. De las Figuras 10 y 11 también se puede observar que el proceso no era capaz de cumplir con las especificaciones, ya que se obtuvo un valor de Cpk para la máquina 1 de 0,42 y un Cp de 0,52. Igualmente para la máquina 1 se obtuvo un Cpk de 0,22 y un Cp de 0,48.

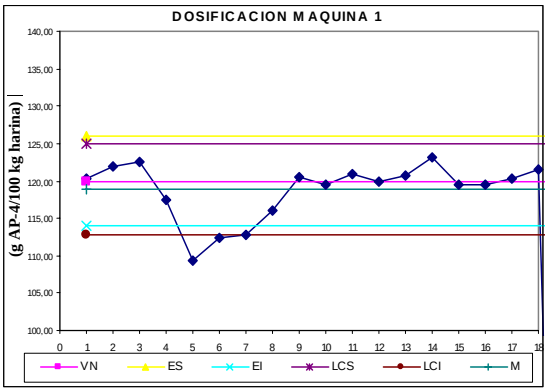


Figura 10. Dosificación de la máquina 1.

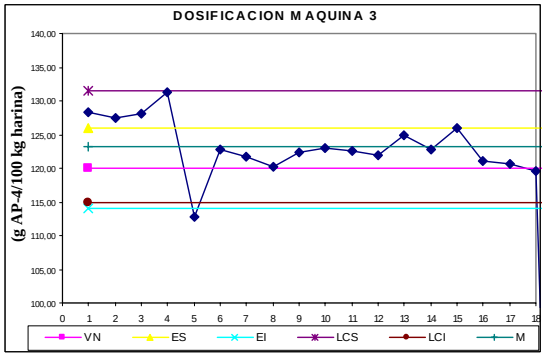


Figura 11. Dosificación de la máquina 3.

4.3. Elaboración de la curva de calibración de los dosificadores de aditivo para la harina panadera por cada tamaño de polea.

Las máquinas dosificadoras constan de cuatro (4) poleas de diferentes diámetros que proporcionan al tornillo sin fin cuatro (4) velocidades de giro distintas, lo que se ve traducido en velocidades de dosificación.

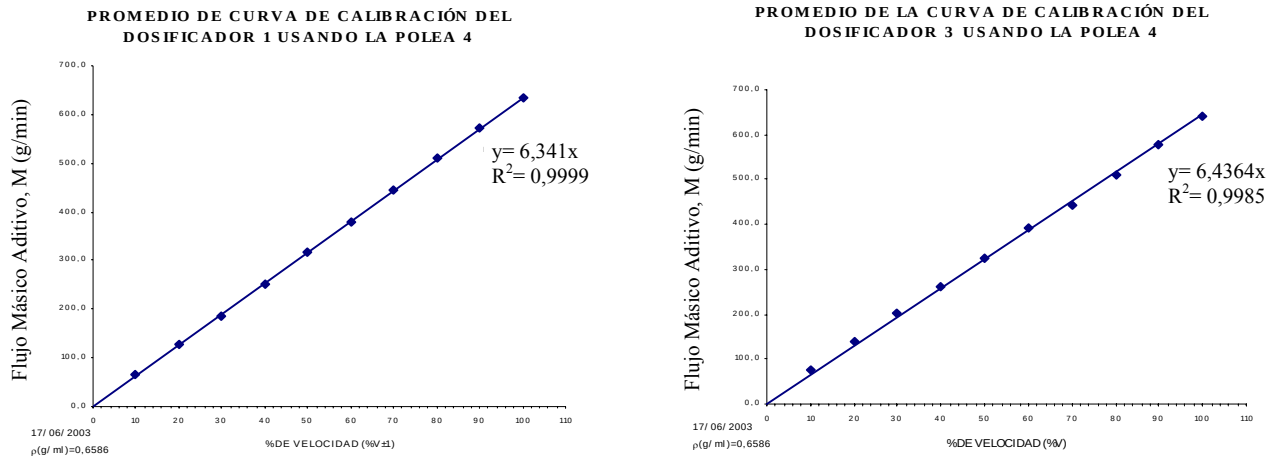


Figura 12. Curvas de calibración de los dosificadores de aditivo usando la polea 4.

Cada una de estas cuatro poleas según el manual de operación presentan velocidades de giro (rpm) específicas con cierta tolerancia por lo que fue preciso antes de realizar las curvas de calibración verificar estas rpm; de no ser las indicadas en el manual se procede a una calibración del equipo.

Las curvas se graficaron utilizando el programa EXCEL, obteniéndose en todos los casos tendencias lineales con índices de correlación bastantes altos, lo que indica que los datos se ajustan muy bien a una línea recta. En el manual de operación del equipo se sugiere que las máquinas trabajen a porcentajes de dosificación mayores al 50 %, de esta manera se estaría garantizando un flujo más uniforme y se cometería menos error al tomar las muestras. Por tanto, se estableció que para una dosificación de 240 g/100 kg de harina es correcto trabajar con la polea 4, cuyas curvas de calibración se muestran en la Figura 12.

Como ya se mencionó, la densidad es una variable crítica por lo que la cantidad máxima que dosifica la máquina en una polea en específico depende de ella. Como el feedrate depende directamente de esta cantidad máxima se buscó encontrar una relación que ayudará a determinar el feedrate de operación usando cualquier aditivo (cualquier densidad).

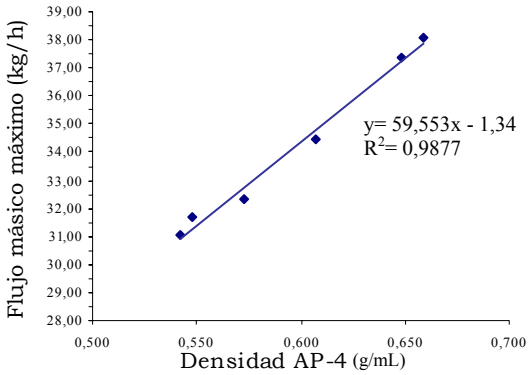
Las cantidades máximas que dosifica cada máquina en cada polea dan una idea del rango de trabajo de las máquinas, indicando cual es la polea ideal para trabajar con la dosificación establecida por aseguramiento de la calidad (240 g de AP-4/ 100 kg de harina). En la Tabla 4 se pueden observar estas cantidades. De allí se deduce que ambas máquinas tienen flujos másicos máximos similares, demostrando por una parte, la correcta calibración de las mismas, y por otra las capacidades de flujo de cada polea.

Tabla 4. Flujos másicos máximos dosificadas por cada máquina.

Polea	Flujo másico máximo máquina 1 (g/min)	Flujo másico máximo máquina 3 (g/min)
4	634,10	643,64
3	415,66	412,36
2	326,80	325,18
1	203,45	200,73

Para comprobar que existe una relación entre la densidad y el feedrate correspondiente, experimentalmente se tomó manualmente el flujo de aditivo colocando las máquinas al 100 % de velocidad y midiendo la densidad del aditivo proveniente de distintos lotes (ver Tabla 5). Luego se procedió a representarlos sobre un sistema de coordenadas rectangulares, donde el conjunto de puntos resultantes se llama diagrama de dispersión del flujo másico máximo en la densidad del AP-4, de allí se obtuvo la Figura 13 para la máquina 1 y la 3, la cual sugiere que existe una relación lineal entre el flujo másico máximo y la densidad de la premezcla.

De la Figura 13, se obtiene que el coeficiente de determinación R^2 para la máquina 1 es 0,9877; el cual



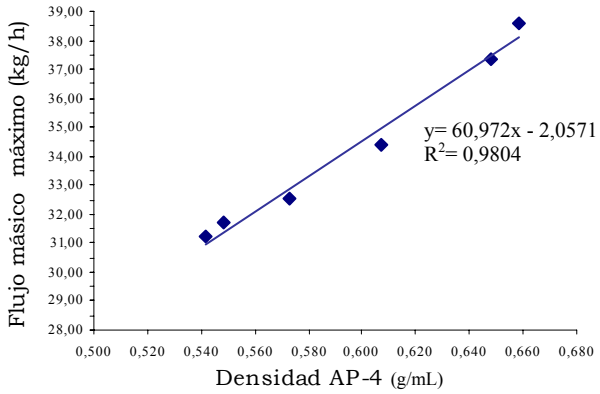


Figura 13. Diagrama de dispersión del flujo másico máximo de la máquina 1 y 3 respectivamente en la densidad del AP-4.

implica que el 98,77 % de los valores de flujo másico máximo se explican por la influencia lineal de la densidad de la premezcla AP-4. Se interpreta lo mismo para la máquina 3 que presentó un R^2 de 0,9804.

La ecuación de la recta es especialmente útil para determinar el flujo máximo de aditivo que genera cada máquina cuando se utilizan premezclas de diferentes densidades, así no es necesario hacer la calibración cada vez que cambie la densidad del AP-4.

Tabla 5. Flujos másicos máximos a diferentes densidades de AP-4

Densidad (g/ml)	Flujo másico máximo (kg/h)	
	Máquina 1	Máquina 3
0,648	37,40	37,33
0,542	31,07	31,20
0,607	34,46	34,36
0,573	32,31	32,52
0,548	31,67	31,70
0,659	38,05	38,62

4.4. Determinación del tiempo de respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de operación.

El tiempo de respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de operación se refiere a cuanto tarda la dosificación en cambiar luego de un cambio en la carga de harina. Este análisis se hizo por medio de un diseño de experimentos.

Se realizaron cambios en la cantidad de harina que llegaba a la balanza tomando datos antes del cambio, e inmediatamente después del cambio hasta que se observara que alguna de las dos variables (carga de harina o flujo de aditivo) se mantuvieran constantes (tomando en cuenta la fluctuación natural del molino). Las Figuras 14 y 15 muestran en un mismo gráfico la carga de harina y el flujo de aditivo de cada máquina en función del tiempo que iba transcurriendo entre cambios de la posición de la válvula.

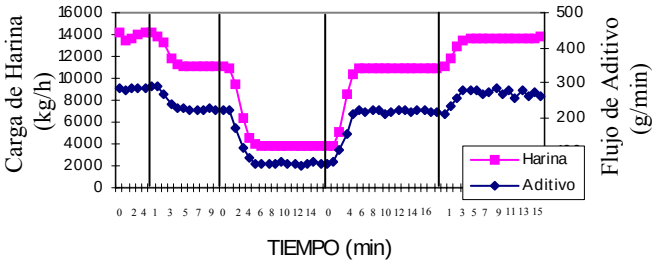


Figura 14. Comparación del flujo de aditivo de la máquina 1 y la carga de harina.

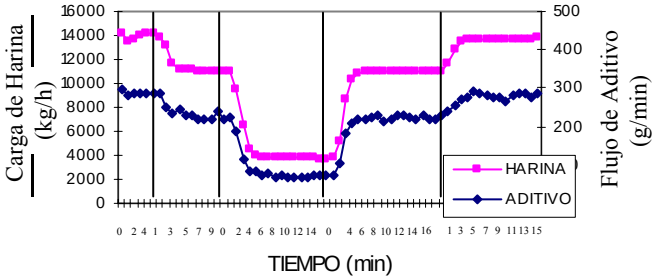


Figura 15. Comparación del flujo de aditivo de la máquina 3 y la carga de harina.

De las figuras anteriores se puede observar que el cambio en el flujo de aditivo es casi inmediato ante cambios en la carga de harina. Estos cambios se ven representados en las Figuras 14 y 15 con las líneas verticales en tiempos cero (0).

Aunque el cambio es puntual, es decir, de 14000 kg/h a 11000 kg/h aproximadamente para el primer cambio y así sucesivamente, se nota que la respuesta del dosificador va cambiando paralelamente con la señal que envía el controlador. Hay que destacar que la tarjeta que se encuentra en el computador realiza integraciones sucesivas de la señal enviada por la balanza, y ésta última funciona por cargas, es decir, abre y cierra sus compuertas cuando llega a su capacidad máxima establecida en la calibración (SPAN 0-40 kg).

4.4.1. Diseño de experimentos

Por medio de esta herramienta se quiso determinar el efecto que producen los cambios de carga de harina en la dosificación de aditivos a la misma.

Para realizar el diseño de experimentos se controlaron los efectos que causan variabilidad como la densidad del aditivo, colocando en las dos tolvas de las máquinas el mismo lote; el mismo feedrate el cual fue determinado anteriormente; se verificó la calibración de las máquinas y solicitó la ayuda al personal del molino para poder realizar los cambios y las mediciones de las variables, previa explicación del experimento y su procedimiento.

Una vez realizado el experimento se analiza la variable carga de harina y la variable respuesta, dosificación de AP-4. Los datos obtenidos para los diferentes niveles del factor se muestran en la Tabla 6; en ella se muestran valores promedio de la carga de harina, ya que una vez estabilizada la carga reflejada en el controlador, ésta variaba en un rango natural del proceso de molienda. Igualmente se promediaron los valores de flujo másico de aditivo obtenidos para esas cargas, debido a que eran bastante similares.

Las Figuras 16 y 17 sugieren una estrecha relación entre la carga de harina y el flujo de aditivo en cada máquina por lo cual se procedió a analizar los datos obtenidos por medio de un estudio de regresión lineal.

Las Figuras 16 y 17 muestran los diagramas de dispersión del flujo de aditivo como una variación de la carga de harina para cada máquina, tomando en cuenta los datos de la Tabla 6. En estas figuras se puede observar una tendencia lineal, por lo tanto los datos que se presentan en la Tabla 6 fueron tratados mediante un análisis de regresión.

Tabla 6. Dosificación de aditivos para distintas cargas de harina.

Cargas de harina (kg/h)	Flujo de aditivo máquina 1 (FA_1± 5,11) g/min	Flujo de aditivo máquina 3 (FA_3± 6,05) g/min
13876	283,10	286,64
13622	265,45	283,04
10934	220,48	222,88
11072	222,43	220,72
3762	68,45	69,28

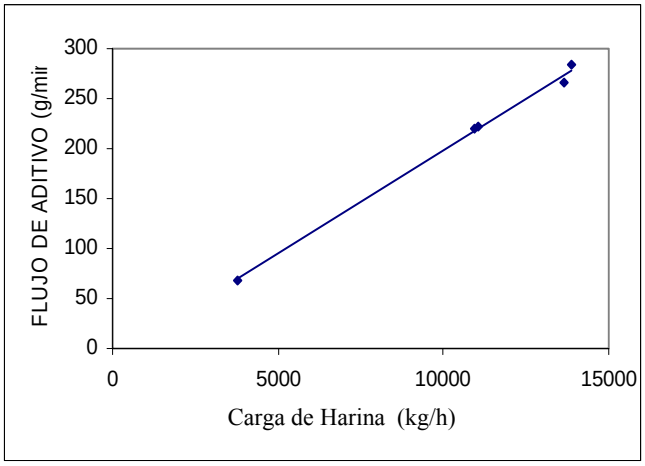


Figura 16. Diagrama de dispersión del flujo de aditivo de la máquina 1 en la carga de harina.

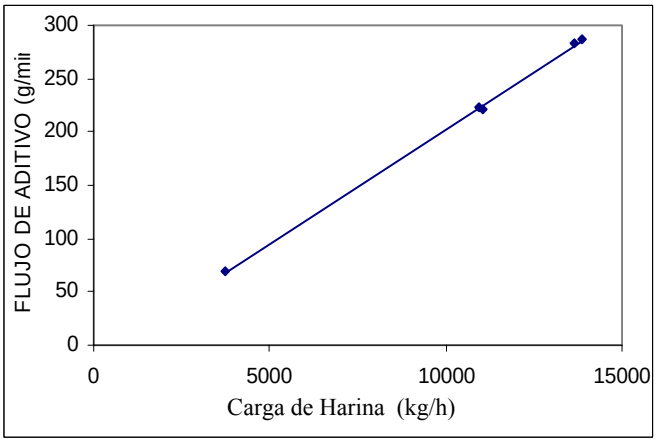


Figura 17. Diagrama de dispersión del flujo de aditivo de la máquina 2 en la carga de harina.

Tabla 7. Análisis de regresión para el flujo de aditivo de la Máquina 1 y la carga de harina.

Estimadores por mínimos cuadrados		Error estándar de los estimadores		Residuo (S^2)
B_0	B_1	$S(B_0)$	$S(B_1)$	31
-8,234	0,0207	7,71	0,00068	

Tabla 8. Análisis de regresión para el flujo de aditivo de la Máquina 3 y la carga de harina.

Estimadores por mínimos cuadrados		Error estándar de los estimadores		Residuo (S^2)
B_0	B_1	$S(B_0)$	$S(B_1)$	11
-12,91	0,0215	4,49	0,00039	

Prueba de hipótesis para el modelo lineal simple de ambas máquinas:

Se planteó la hipótesis nula en ambos casos:
"No existe una relación lineal entre el factor carga de harina y el flujo de aditivo de la máquina dosificadora"
Lo que en notación estadística se escribe como:

H0: B1=0

H1: B1≠0

Lo anterior significa que si el valor de la pendiente (B1) es igual a cero es cierta la hipótesis nula [5]. Aunque de las Figuras 16 y 17 se puede observar una tendencia lineal es necesario comprobarlo estadísticamente, lo que se realiza por medio de un análisis de varianza para un solo factor (ANOVA). En la Tabla 9 y 10 se muestran los resultados del ANOVA para la máquina 1 y 2 respectivamente.

En ambos casos se buscó el valor de F crítico como modo de comprobar la hipótesis, si F calculado es mayor a F crítico para los dos niveles de confianza (95 % y 99 %) quiere decir que un alto porcentaje de los valores del flujo de aditivo se explican con el modelo lineal que se postuló. En las Tablas 9 y 10 se observa que los valores exceden de sobremanera a los valores de F crítico correspondientes.

La fuerte influencia lineal de la carga de harina sobre el flujo de aditivo se evidencia con el coeficiente de determinación R^2 para la máquina 1 de 0,997; el cual implica que el 99,7 % de la variación del flujo de aditivo esta explicado de alguna forma por la influencia lineal de la variable independiente (carga de harina). Lo mismo sucede con la máquina 3 que presentó un R^2 de 0,999.

En cuanto al coeficiente de determinación R^2 para la máquina 1 fue de 0,998 y para la máquina 3 de 0,999; esto indica una medida de la bondad del ajuste entre la ecuación adoptada y los datos recogidos experimentalmente.

Las ecuaciones de regresión lineal por tanto son:
Flujo de aditivo máquina 1 = - 8,23 + 0,0207*Carga de harina

Flujo de aditivo máquina 3 = - 12,91 + 0,0215*Carga de harina

De las ecuaciones también se observa que el valor de la pendiente B1 para cada caso es distinto de cero, rechazándose la hipótesis nula y confirmando que

Tabla 9. ANOVA del modelo lineal simple del flujo de aditivo de la máquina 1 y la carga de harina.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F Calculado	F crítico (95 %)	F crítico (99 %)
Regresión	1	28605	28605	910,08	10,1	34,1
Residuos	3	94	31			
Total	4	28699	-			

Tabla 10. ANOVA del modelo lineal simple del flujo de aditivo de la máquina 2 y la carga de harina.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F Calculado	F crítico (95 %)	F crítico (99 %)
Regresión	1	31048	31048	2922	10,1	34,1
Residuos	3	32	11			
Total	4	31079	-			

existe una relación lineal en el flujo de aditivo y la carga de harina.

Analizando la pendiente de las rectas de las Figuras 16 y 17 se pudo determinar que ésta indica el feedrate y la máxima dosificación de la máquina, siendo entonces esta relación muy útil para la determinación del feedrate. Esta inferencia partió de la relación que existe entre el feedrate, la máxima dosificación y el flujo de aditivo de la máquina para una carga en particular.

Si se realiza el cociente del flujo máximo (kg/h) entre el feedrate (Ton/h) de cada máquina, se obtienen valores cercanos a la pendiente de ambas rectas. Esto se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación de las pendientes de las rectas.

Máquina	Flujo Máximo / (Feedrate*60)	Pendiente (B_1)	Desviación (%)
1	0,0203	0,0207	2,02
2	0,0207	0,0215	3,47

Es importante destacar que no solo haber determinado el tiempo de respuesta es importante, también se analizó si la dosificación (g AP-4/100 kg de harina) estaba dentro de las especificaciones, ya que no sólo se necesita que la respuesta ante cambios en la carga de harina sea rápida, de la misma manera la dosificación tiene que ser la necesaria para cada carga asegurando la calidad final del producto. Este análisis se puede observar para cada máquina en la Tabla 12, para los valores promedio usados en el análisis de regresión.

Tabla 12. Dosificaciones de aditivo ante cambios en la carga de harina.

Carga harina (kg/h)	Dosif. Máq. 1 (g/100kg hna)	Dosif. Máq. 3 (g/100kg hna)	Dosif. total (g/100kg hna)	Desv (%)
13876	122,41	123,94	246,36	2,65
11072	120,54	119,61	240,15	0,06
3762	109,17	110,49	219,67	8,47
10934	120,99	122,30	243,29	1,37
13622	116,92	124,67	241,59	0,66

En la Tabla 12 se nota que para los valores de carga por encima de los 10000 kg/h, se presenta una dosificación dentro de especificaciones y con una desviación del valor nominal (240 g/100 kg harina) por debajo del 3 %, lo cual es bastante aceptable, recordando que la tolerancia de las especificaciones es 5 %. Por otra parte, se puede observar en la tabla 12 que los resultados para la carga de harina de 3762 kg/h, son los únicos que no están dentro de especificaciones y es allí donde el flujo de aditivo sufrió una mayor variabilidad; esto no resulta preocupante, ya que el rango de operación del molino esta muy por encima de ese valor.

5. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Para incrementar la confiabilidad en el proceso de dosificación a la harina panadera se realizó en principio una tormenta de ideas con todos los involucrados en el control del sistema.

5.1 Generación de alternativas

Realizar una metodología estándar para el control de la dosificación de aditivo a la harina panadera:

En ella se establecen todos los pasos a realizar para llevar el control de la dosificación. Se tomaron en cuenta las variables críticas encontradas en el sistema, además de considerar lo sugerido por los operadores y su modo de realizar el control.

Una vez realizada la metodología, se divulgó y entrenó a los operadores en ella, para poder detectar posibles fallas o mejoras sugeridas por ellos, dando excelentes resultados, lo cual elimina esta causa de variación de la dosificación.

Este procedimiento sigue los lineamientos para la elaboración de los documentos que soportan al Sistema de Gestión de la Calidad adoptado por la empresa molinera con el fin de estandarizar la documentación y facilitar su entendimiento [6].

Revisar y si es necesario corregir las instrucciones de trabajo de la calibración de las máquinas dosificadoras:

El manual existente de calibración de las máquinas era una simple traducción del libro de instrucciones que envía el fabricante del equipo, que no es que este errado sino que no se ha adaptado al sistema donde se encuentran instaladas las máquinas. Además que se quiso realizar las instrucciones bajo la

normativa de ISO-9000 con la ayuda del Departamento de Aseguramiento de la Calidad de la planta. En las instrucciones se estableció el responsable de la calibración y de verificar que se lleve a cabo, personal de mantenimiento y del molino respectivamente; y la frecuencia de revisión de las rpm de la polea reductora.

Se habla de revisión de las rpm, porque no necesariamente las máquinas se descalibran antes de la frecuencia establecida, pero si es necesario la revisión de esta variable y su control para que no se presenten problemas en la dosificación.

Implementar un control estadístico del proceso fácil de utilizar y al que se tenga fácil acceso:

La necesidad de que los operadores del sistema conocieran de las especificaciones de la dosificación y los límites naturales de control del proceso llevan a realizar las bases para la implementación de un control estadístico de proceso, con la ayuda del programa EXCEL y aprovechando la presencia de un computador a la disposición directa de los operadores.

La determinación de las variables apropiadas sobre las cuales se debe aplicar el control, así como también los puntos del proceso de producción en los que debe establecerse el mismo, requirió una evaluación previa sin la que no se hubiesen podido realizar los gráficos de control estadístico.

Con ayuda de la gráfica los operadores pueden observar el comportamiento de la dosificación de cada máquina y del sistema completo, lo que permite, después de tomar la muestra y sustituir los datos en la hoja, tomar medidas correctivas si es necesario, en búsqueda del mejoramiento continuo. El control se basa en la representación de gráficos de control de lecturas individuales y el cálculo de la capacidad de cada máquina (Cp y Cpk).

5.2 Implantación

Todas las alternativas anteriores fueron tomadas para darle solución al problema. Una vez elaborada la metodología estándar, y corregidas las instrucciones de calibración se comenzaron a utilizar; para por último comenzar con la implantación del control estadístico de proceso.

En las Figuras 18 y 19 se muestran los gráficos de control para las dos máquinas. Estos gráficos representan la dosificación siguiendo la metodología de control nueva.

En las Figuras 18 y 19 se observa que los límites de control se encuentran dentro de los límites de especificaciones en ambas máquinas, lo que indica que el proceso tiene una variabilidad menor a la exigida por las especificaciones, lo que hace que el proceso sea potencialmente capaz de cumplir con las especificaciones, es por esto que los valores de Cp sobrepasan a la unidad.

Por otra parte, se nota en dichas figuras que la media del proceso presenta una mínima desviación con respecto al valor nominal (120 g AP-4/100 kg harina), lo que indica que el proceso está centrado. Por esta razón se obtuvieron valores de Cpk mayores a la unidad.

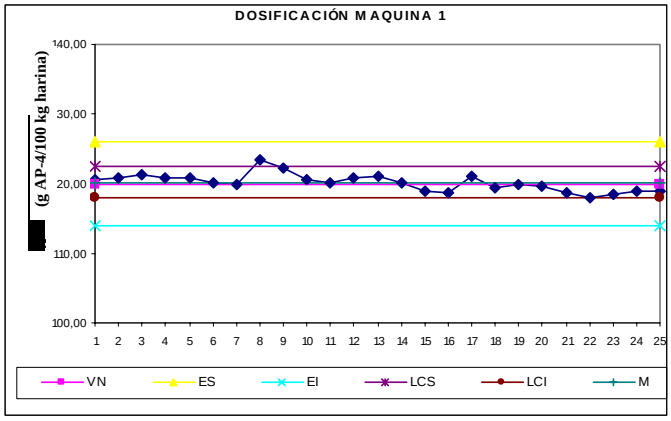


Figura 18. Lecturas individuales de la dosificación de la máquina 1.

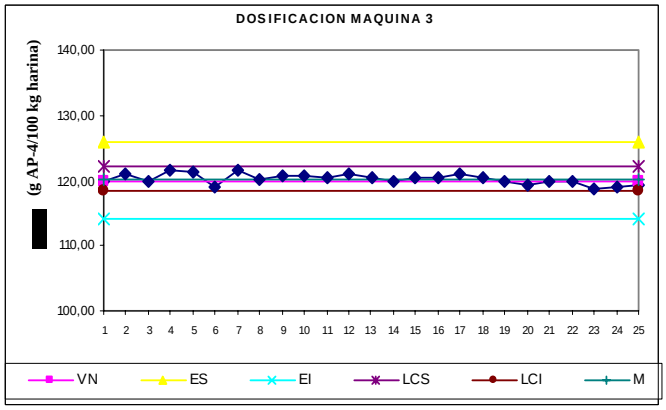


Figura 19. Lecturas individuales de la dosificación de la máquina 3.

Tabla 13. Control estadístico de la dosificación de aditivos a la harina panadera.

	Máquina 1	Máquina 3
Valor nominal	120,00	120,00
Límite superior especificaciones	126,00	126,00
Límite inferior especificaciones	114,00	114,00
Media	120,15	120,25
Desviación estándar	1,27	0,79
Cp	1,57	2,53
Cpk = Cp*(1-k)	1,54	2,43
k = 2*(vn-media)/lse-lie	0,02	0,04
Límite inferior de control	117,93	118,31
Límite superior de control	122,37	122,19

Si se toma en consideración los valores de Cp y Cpk del diagnóstico, los cuales eran menores a la unidad, recordando que para que un proceso sea considerado capaz Cp y Cpk deben ser mayores a uno (1), y se analizan los valores de capacidades de la Tabla 13, los cuales exceden significativamente a la unidad, se evidencian los grandes cambios y el hecho de haber llevado un proceso no capaz a uno capaz de cumplir con las especificaciones.

El control estadístico de procesos no solo ayudó al cambio en la capacidad al mostrar el comportamiento de la dosificación de cada máquina tomando acciones para mejorarlo, sino también tuvo un efecto sobre la cultura de los operadores del sistema donde se les demuestra que son ellos los que controlan el proceso, los que participan en la búsqueda de soluciones y en los logros alcanzados.

En la teoría de control estadístico de procesos, se sugiere que es importante desarrollar criterios de medición relativos a las variables claves, para lo cual se debe contar con equipos adecuadamente calibrados [6]. En este sentido también es muy importante contar con normas y procedimientos escritos acerca de la forma en que deben realizarse estos ensayos. Estas dos sugerencias son previstas en las alternativas de solución.

6. CONCLUSIONES

En cuanto a la situación inicial del proceso, se determinó que no existía un procedimiento estandarizado del control del sistema de dosificación de aditivo. Durante el diagnóstico, los valores de capacidad real correspondientes a la dosificación de cada máquina son Cpk1=0,09 y Cpk3=0,08. Las variables críticas que causan influencia sobre la dosificación de aditivo a la harina panadera son el flujo de harina, la densidad del aditivo, el flujo de aditivo y la calibración de las máquinas dosificadoras. Las curvas de calibración del flujo de aditivo en función del porcentaje de dosificación resultaron líneas rectas con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,99 para todas las poleas. Existe una relación lineal entre el flujo másico máximo de las máquinas dosificadoras y la densidad de aditivo con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,98 para ambas máquinas. En relación al tiempo de respuesta del sistema, se determinó que el cambio de la dosificación era paralelo al cambio en la carga de harina. Se comprobó por medio de un análisis de regresión lineal la dependencia entre flujo másico de aditivo y la carga de harina, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,997 y 0,999 para la maquina 1 y la maquina 3 respectivamente. Las alternativas de solución para el problema fueron la elaboración de una metodología estándar para el control de la dosificación de aditivos, la corrección de las instrucciones de trabajo de calibración y la implantación de un control estadístico del proceso. La implantación de las bases de un control estadístico del proceso ayudó a incrementar la capacidad real del proceso hasta tener un proceso capaz de cumplir con las especificaciones, obteniéndose como valores máximos de capacidades reales del proceso Cpk1=1,57 y Cpk3=2,43 para las máquinas 1 y 3 respectivamente.

REFERENCIAS

[1] Association of Operative Millers (2000). Curso de molinería por correspondencia.
[2] Normas Generales para la elaboración de harina de trigo. Norma 217-2001. Comisión Venezolana De Normas Industriales (COVENIN).
[3] Molinería y panadería digital (2003). (On line). Disponible en http:// www.molineriaypanaderiadigital.com
[4] MONTGOMERY, Douglas (1991). Control estadístico de la calidad. Grupo editorial Iberoamericana. México.
[5] MONTGOMERY, Douglas (1991). Diseño y análisis de experimentos. Grupo editorial Iberoamericana. México.
[6] Normas venezolanas COVENIN ISO-9000:2000. Sistemas de gestión de la calidad. 2002. Comisión Venezolana De Normas Industriales (COVENIN).