



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SEIS SIGMA COMO UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA
GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD DEL VALOR DE CAL DISPONIBLE EN LOS DEPARTAMENTOS
DE DESPACHOS Y PRODUCCIÓN EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CAL VIVA MOLIDA**

Carlos Eduardo Cano San José

Asesorado por el Msc. Ing. José Antonio Medrano García

Guatemala, agosto de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SEIS SIGMA COMO UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA
GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD DEL VALOR DE CAL DISPONIBLE EN LOS DEPARTAMENTOS
DE DESPACHOS Y PRODUCCIÓN EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CAL VIVA MOLIDA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS EDUARDO CANO SAN JOSÉ
ASESORADO POR EL MSC. ING. JOSÉ ANTONIO MEDRANO GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

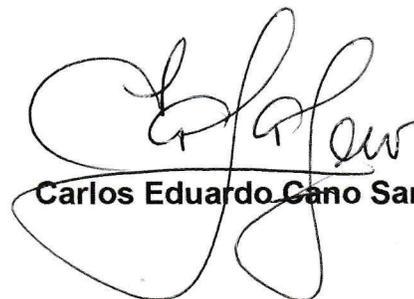
DECANO	Ing. Julio González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Francisco Espinoza Smith
SECRETARIO	Ing. Francisco González López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SEIS SIGMA COMO UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD DEL VALOR DE CAL DISPONIBLE EN LOS DEPARTAMENTOS DE DESPACHOS Y PRODUCCIÓN EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CAL VIVA MOLIDA

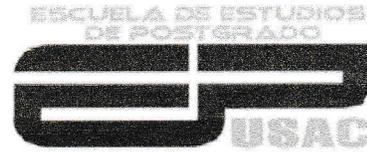
Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 11 de octubre de 2013.



Carlos Eduardo Cano San José



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 2418-8000 Ext. 86226

AGS-MGIPP-0022-2014

Guatemala, 21 de mayo de 2014.

Director
Víctor Manuel Monzón
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Carlos Eduardo Cano San José** carné número **89-12188**, quien optó la modalidad del **“PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO”**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Gestión Industrial**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

“Id y enseñad a todos”

MSc. Ing. José Antonio Medrano García
Asesor(a)

César Akú Castillo MSc.
INGENIERO INDUSTRIAL
COLEGIADO No. 4,073

MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo
Coordinador de Área
Gestión y Servicios

José Antonio Medrano García
Ingeniero Químico
Colegiado No. 618

Mayra Virginia Castillo Montes
Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
/la



Ref.EIQ.TG.135.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería del estudiante, **CARIOS EDUARDO CANO SAN JOSÉ**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en GESTIÓN INDUSTRIAL** titulado "DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SEIS SIGMA COMO UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD DEL VALOR DE CAL DISPONIBLE EN LOS DEPARTAMENTOS DE DESPACHOS Y PRODUCCIÓN EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CAL VIVA MOLIDA". Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, julio de 2014

Cc: Archivo
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala
VMMV/ale





DTG. 376.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SEIS SIGMA COMO UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD DEL VALOR DE CAL DISPONIBLE EN LOS DEPARTAMENTOS DE DESPACHOS Y PRODUCCIÓN DE CAL VIVA MOLINA**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Eduardo Cano San José**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 5 de agosto de 2014



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** En quien encuentro la motivación y ayuda necesaria para vencer los obstáculos.
- Mi madre** Irma San José, que siempre hizo todo lo posible porque llegara a cumplir mis sueños, por su amor incondicional y su permanente fe en mi persona.
- Mi esposa** Silvia Morales de Cano, amada compañera y madre de mis tesoros, por su paciencia y comprensión, quién sacrificó su tiempo para que pudiera cumplir con mi sueño, lo que me inspiró para ser mejor cada día.
- Mis hijos** Amanda y Carlos Emilio Cano Morales, tesoros que completan mi vida, me recuerdan lo bella que es la vida y por quienes me esfuerzo para cumplir mis metas.
- Mi hermana** Karla Cano, por su constante seguimiento, motivación y apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Que puso a mi alcance el conocimiento.

**Facultad de
Ingeniería**

Primera forjadora de mi pensamiento crítico.

Colegio Don Bosco

Donde desarrollé los cimientos necesarios para
mi crecimiento académico.

**Cohorte 10 de la
Maestría de Gestión
Industrial**

Por su acompañamiento y apoyo durante
nuestros estudios.

Cementos Progreso, S. A.

Por su apoyo en la realización de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	01
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	17
5. NECESIDADES A CUBRIR	19
6. ALCANCES	21
7. MARCO TEÓRICO	23
7.1. Cal viva	23
7.2. Cal hidratada	23
7.3. Usos de la cal viva y su importancia en la industria	24
7.3.1. Uso de la cal en la industria azucarera	25
7.4. Propiedades físicas y químicas de la cal viva	25
7.4.1. Granulometría.....	26

7.4.2.	Cal disponible y reactividad.....	28
7.5.	Proceso de calcinación	28
7.6.	Fabricación de la cal viva	29
7.7.	Factores que afectan la calidad de la cal viva.....	31
7.8.	Proceso de molienda.....	32
7.9.	Circuito abierto de molienda.....	33
7.10.	Circuito cerrado de molienda	34
7.11.	Separadores de partículas	34
7.12.	Muestreo y análisis de la cal viva	35
7.12.1.	Muestra representativa.....	37
7.12.2.	Preparación de la muestra	38
7.13.	Filosofías de calidad.....	38
7.13.1.	La filosofía de Demming.....	38
7.13.2.	La filosofía de Juran	39
7.13.3.	La filosofía de Kaoru Ishikawa.....	40
7.14.	Historia de Seis Sigma	41
7.15.	Definición de Seis Sigma	42
7.15.1.	Zonas de impacto de Seis Sigma.....	46
7.15.2.	DMAIC.....	47
7.15.2.1.	Definir.....	47
7.15.2.2.	Medir	48
7.15.2.3.	Analizar	49
7.15.2.4.	Implementar mejora	49
7.15.2.5.	Controlar	50
7.16.	Herramientas para solución de problemas.....	50
7.16.1.	Tormenta de ideas	50
7.16.2.	Diagrama de Ishikawa	52
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	55

9.	METODOLOGÍA	59
9.1.	Tipo de estudio	59
9.2.	Diseño de la investigación	59
9.3.	Variables e indicadores	60
9.3.1.	Operacionalización de las variables	60
9.3.1.1.	Cal disponible	61
9.3.1.2.	Tiempo de almacenamiento	62
9.4.	Plan de muestreo	62
9.5.	Metodología.....	63
10.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	67
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	69
13.	BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Área debajo de la curva normal	43
2.	Variación normal de la media de un proceso	44
3.	Diagrama de pescado	53

TABLAS

I.	Resultados de cal disponible de las muestras de cal viva molida tomadas en el circuito de molienda y en despachos	10
II.	Variables e indicadores	60
III.	Presupuesto de la investigación.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
gr	Gramos
μ	Micras o micrones
mm	Milímetro
CaO	Óxido de calcio
%	Porcentaje
Q	Quetzales
U	Unidades

GLOSARIO

Alcalinidad	Propiedad de las sustancias de ceder iones hidróxido en soluciones alcalinas, es lo contrario a la acidez.
<i>Batch</i> de producción	Proceso de producción intermitente, en el cual se procesa toda la masa necesaria para fabricar un lote a la vez.
Capacidad del proceso	Aptitud de un proceso para producir productos dentro de los límites de especificaciones de calidad.
Circuito de producción	Puede formar parte de una línea de producción, es un proceso cíclico que se repite hasta que se cumpla con alguna característica deseada en el material o producto procesado.
Desviación estándar	Es una medición que nos indica la media de la distancia entre los datos y su media aritmética y nos sirve para comprender su dispersión.
Elevador de cangilones	Mecanismo empleado para el transporte vertical de materiales a granel.

Estacionalidad	Es la variación periódica y predecible de la demanda de un producto en un periodo menor a un año.
Faja transportadora	Sistema de transporte continuo formado por una banda continua que se mueve entre dos cilindros o ejes. Es utilizada para transportar sólidos a granel entre dos puntos, usualmente dentro de una línea de producción.
Filtro de mangas	Dispositivo empleado para la separación de partículas sólidas suspendidas en una corriente gaseosa.
Granulometría	Es la medición de los tamaños de las partículas o granos que componen un material.
Hogar	Lugar donde se enciende el fuego. En la industria se identifica con este término la parte del equipo donde hay una llama encendida.
Ingenio	Instalación industrial donde se procesa caña de azúcar para obtener principalmente azúcar.
Línea de producción	Sucesivas etapas, procesos o pasos dentro de la producción de un determinado producto.

Media	Es el resultado de dividir la suma de todos los datos de una serie entre el número de datos de la misma.
Mediana	Es el valor que ocupa el lugar central de todos los datos cuando están ordenados de menor a mayor.
Micras	Es la milésima parte de un milímetro.
Moda	En una serie de datos, es el valor que tiene mayor frecuencia absoluta.
Molino	Equipo utilizado para la reducción de tamaño de un material, normalmente de consistencia granular para llevarlo a una harina.
Muestreador	Equipo utilizado para la toma de una muestra, puede ser manual o automático.
Población	En estadística es el conjunto de elementos de referencia sobre los cuales se efectuara alguna observación o se desea tener alguna conclusión. Normalmente es demasiado grande como para abarcarla en su totalidad. También se le denomina universo.
Silo	Construcción diseñada para almacenar sólidos a granel.

Tamiz	Es un malla metálica conformada por filamentos que se entrecruzan entre si dejando espacios cuadrados del mismo tamaño. Son utilizados para medir la finura de materiales según el tamaño de la abertura de la malla.
Transporte a granel	Bienes que se transportan sin empacar ni embalar en grandes cantidades.
Valor Z	El valor z de un valor x de un conjunto de datos, es la distancia a la que se encuentra x por encima o por debajo de la media de ese conjunto de datos, medida en unidades de la desviación estándar.
Variable dependiente	Es aquella variable cuyos valores dependen de los valores que tome otra variable, por lo regular son las variables de respuesta que se observan en un estudio y que podrían estar influidas por los valores de las variables independientes.
Variable independiente	Es aquella cuyo valor no depende de otra variable. Es aquella característica o propiedad que se supone ser la causa de un fenómeno estudiado. En investigación experimental se llama así a la variable que el investigador manipula.

RESUMEN

El presente diseño de investigación presenta el plan para determinar las causas de las variaciones en la calidad de la cal viva molida en los Departamentos de Producción y Despachos de una planta industrial de fabricación de cal, basados en la metodología Seis Sigma.

El trabajo de investigación se sustenta en un marco teórico incluye la definición de la cal como material en la industria y en la construcción, generalidades sobre la fabricación de cal, la preparación para su uso en la industria, la molienda, sus características físicas y químicas, así como una descripción de las filosofías de calidad que apoyan el desarrollo de este estudio, una descripción de la metodología Seis Sigma y las herramientas usadas en la en la fase de análisis de la metodología.

El plan de trabajo detalla la forma en la que se hará la recolección de la información sobre los procesos de producción de cal viva molida y de despacho a granel, cómo se llevará a cabo la fase de análisis de la información, la forma en que se realizará la correlación de los datos en busca de las causas de las variaciones, así como de la interrelación entre ellos y la forma como se aplicará el método Seis Sigma al proceso de producción de cal viva molida.

Las variables de trabajo serán: la cal disponible (una medición de la reactividad de la cal viva molida) en el área de despachos, como variable dependiente y, como variables independientes, la cal viva molida en el área de producción y el tiempo de almacenamiento previo al despacho.

Por último, se presenta el cronograma propuesto para las cuatro fases del plan y la factibilidad del estudio a realizar.

INTRODUCCIÓN

Dentro del desarrollo de los negocios se da la oportunidad de atender nuevos mercados, en algunos casos, se presenta la necesidad de utilizar equipos existentes para la fabricación de nuevos productos, los cuales deberán ser ajustados mientras se logra una estabilidad en el cumplimiento de los requisitos pactados con el cliente.

En el caso planteado en este trabajo de investigación, hay una diferencia en el resultado del análisis de reactividad de la cal despachada y la producida. Esta situación implica sobrecostos en el proceso de fabricación y de despachos ya que el producto sobre el cual se presentan estas diferencias es reprocesado para garantizar la calidad que llega al cliente.

Debido a la necesidad de eliminar estos sobrecostos y para no poner en riesgo el incumplimiento a lo pactado con el cliente, se necesita llevar el proceso de producción a un nivel de control que asegure el cumplimiento de los requisitos con el cliente, para lo cual se plantea el uso de Seis Sigma como metodología de análisis.

Al realizar una comparación estadística entre los resultados obtenidos en el 2012 a la fecha en las áreas de producción y despachos y, al analizar los procesos de liberación actuales, se buscarán las causas de la diferencia y se harán recomendaciones sobre los ajustes necesarios en los procesos de gestión de calidad para asegurar que se cumpla con los requisitos del cliente y se eviten los rechazos de producto en despachos.

Por medio de la observación de los análisis históricos y su comparación para determinar si pertenecen a la misma población, se confirmará su relación y se podrá definir los niveles de cal disponible esperados en producción para que cumpla con los requerimientos especificados por el cliente. El resultado quedará documentado en el informe final.

En el capítulo 1 se documentará el diagnóstico inicial de la planta de producción de cal viva molida.

En el capítulo 2 se recopilará información documental sobre el proceso de producción y la metodología Seis Sigma.

En el capítulo 3 se indicará la situación propuesta luego de la aplicación de la metodología Seis Sigma.

En el capítulo 4 se describirá la forma de aplicar la metodología Seis Sigma, indicando la recopilación de información, su análisis detallado de manera que se establezcan las relaciones entre las variables en los departamentos de producción y de despacho, las necesidades de mejora y el plan recomendado para la mejora del control del proceso.

En los capítulos 5, 6 y 7 se presentarán los resultados del estudio, la discusión de los resultados obtenidos y las conclusiones del estudio.

1. ANTECEDENTES

La planta de cal se inauguró en 1990 con el arranque de un horno vertical junto con una hidratadora de cal. Se buscó en ese momento, atender la demanda de cal hidratada para construcción.

Para el 2005, se inauguró un segundo horno, duplicando la capacidad instalada de producción de cal viva, además de arrancar una segunda hidratadora, pero con la capacidad suficiente para utilizar la cal viva de los dos hornos de cal existentes en ese momento. El arranque de esta nueva hidratadora permitió dejar de utilizar la línea 1 de hidratación, la cual quedó disponible por cualquier necesidad futura. Junto con la expansión se ampliaron las oportunidades de atender a nuevos mercados, presentando a los ingenios de Guatemala el hidróxido de calcio. Con este producto se logró atender a la mayoría de los ingenios del país e iniciar la atención a un nuevo sector del mercado, el sector industria.

Para el 2010, dentro de la búsqueda de nuevos mercados, se encontró una oportunidad de despachar producto a un ingenio de México quienes requirieron cal viva molida, una presentación diferente a la utilizada por los ingenios en Guatemala donde regularmente se utiliza cal hidratada. Para poder producir la cal viva molida, durante el 2010, se hicieron las modificaciones necesarias para utilizar el molino del circuito de hidratación de la línea 1, puesta en marcha en 1990, que no se utilizaba desde el arranque en el 2005 de la hidratadora No. 2.

Con esta modificación se amplió el portafolio de productos, agregando la presentación de cal viva molida, aparte de la cal hidratada que era el producto regular de la planta.

La cal viva es el compuesto alcalino más ampliamente usado y a la vez el más barato. En los países industrializados los principales usos de la cal son la producción de acero y la construcción. En la unión europea, por ejemplo, el 74 % de la producción de cal viva se utiliza en ambas industrias (Oates, 1998).

Analizando las ventas de la empresa, en Guatemala se consume cal hidratada principalmente en los sectores de construcción e industria, aunque más ampliamente en el sector de la construcción debido al bajo nivel de industrialización del país. En las industrias regularmente se utiliza cal viva dentro de sus procesos, principalmente para la remoción de impurezas, por lo que es un reactivo ampliamente utilizado y del cual se necesita la mayor pureza posible.

Según los equipos y procesos propios de cada industria, así será el requerimiento en cuanto a la granulometría o tamaño de partícula de la cal viva. La cal viva puede presentarse entonces en una variedad de tamaños, cuyos rangos varían desde cal viva molida, hasta cal viva en terrón. El estándar C51 de la ASTM muestra una clasificación dependiendo del tamaño de partícula.

El tamaño de partícula requerido de la cal viva determina su proceso de fabricación y por lo tanto tiene una influencia importante en su costo final, además de tener cierto grado de influencia en otras características como su tiempo de reacción (esta característica de la cal depende de la superficie del polvo), por lo que son variables que se deben tomar en cuenta al momento seleccionar la presentación requerida.

El consumo en el mercado guatemalteco ha sido principalmente de cal viva triturada (hasta 6,5 milímetros) y en terrón (entre 10 y 50 milímetros), por lo que no se había desarrollado otras presentaciones, como la cal viva molida, que requiere del uso de otro tipo de equipos en su fabricación.

El número de clientes en el sector industria se ha logrado ampliar al llevar cal viva a otros países del área, como Centro América, el Caribe y México, lo que ha llevado a la necesidad de adaptarse a nuevos requerimientos. Uno de los clientes nuevos en el sur de México solicitó cal viva molida, con una finura de 70 % pasando el tamiz No. 200, por lo que luego de revisar las instalaciones dentro de planta, se planificó la fabricación de cal viva molida aprovechando los equipos sin uso que se tienen en la línea 1 de producción de cal hidratada, ya que eran necesarias pocas modificaciones para aprovechar el sistema de molienda instalado dentro de ese circuito.

Estas modificaciones se llevaron a cabo entre junio de 2011 y febrero de 2012. Debido a que el producto se despacharía a granel, la modificación necesaria era la instalación de un sistema de transporte neumático hacia las tolvas de despacho y la conexión del circuito de molienda con este nuevo sistema de transporte. En marzo de 2012 se inició el despacho de cal viva molida, sin embargo, debido a la estacionalidad en el uso de la cal de este cliente, solo se le despacho producto durante el mes de marzo de ese año.

Los despachos se reanudaron en noviembre del 2012, pero con problemas de incumplimiento en la calidad requerida. Estos incumplimientos eran detectados antes de que el producto saliera de planta, durante el proceso de llenado del transporte a granel, por lo que los principales problemas que se tenían eran retrasos en las entregas y la necesidad de reprocesar el material no conforme otras áreas de la misma planta.

El proceso de producción de la cal viva molida es relativamente simple ya que únicamente se efectúa una disminución del tamaño de partícula utilizando un molino de bolas. La cal viva triturada, producto de los hornos de cal, se almacena en un silo de metal, sellado al ambiente. Debajo de este silo de metal existe una faja con un motor de velocidad variable, controlado localmente, con el cual se extrae la cal que se va a alimentar al molino.

Después de pasar por tres transportadores helicoidales, la cal viva triturada es alimentada al molino de bolas. La descarga del molino de bolas es transportada por medio de un transportador helicoidal y un elevador, hacia el separador de partículas, donde se ajusta la finura del producto. Este separador cuenta con dos descargas, la primera denominada de material grueso, que regresa al molino junto con la alimentación fresca precisamente porque el tamaño de partícula no cumple con los requisitos pactados con el cliente; y el producto del circuito, que cumple con la finura pactada, el cual es transportado por un sistema neumático de transporte hacia la tolva sobre la báscula de despacho a granel.

El molino de bolas es ventilado por un filtro de mangas para su correcto funcionamiento. El polvo que atrapa, se descarga en el elevador del circuito, el cual, como ya se mencionó, transporta el material hacia el separador de partículas. La tolva que recibe el producto del circuito de molienda tiene capacidad para almacenar el material correspondiente al llenado del transporte a granel, por lo tanto, la cal viva molida únicamente se produce según se programan los despachos, para tener el material previo a que se presente el transportista designado para el traslado final al cliente.

El sistema de control de calidad interno define una periodicidad de muestreos en cada proceso productivo, buscando principalmente asegurar que

el producto que sale de planta cumpla con las especificaciones pactadas con el cliente, a saber:

- Cal disponible con un mínimo de 83 %
- Finura en el tamiz No. 200 con un mínimo de 75 %

De esa manera, en el caso de la producción de cal viva molida, se toman las siguientes muestras para su posterior análisis en el laboratorio químico de la planta de cal (Plan de Calidad, producción de cal, SAC-SM-UG-FO-11, rev. 03-05-13):

- Cal viva triturada en la alimentación al circuito de molienda, en el área de producción.
- Cal viva molida en la descarga del circuito de molienda, en el área de producción.
- Cal viva molida en el transporte a granel, en el área de despachos.

Cada muestra es analizada en el laboratorio químico y los resultados de las variables controladas son comparados contra los parámetros establecidos en el mismo plan de calidad. Cuando una variable cumple con los parámetros de calidad, se dice que la muestra se libera para continuar al siguiente proceso. Aunque la liberación del producto dentro del circuito de molienda se efectúa con la muestra de la descarga del circuito, la liberación del producto al cliente se efectúa con la muestra que se toma en el despacho a granel.

El producto debe cumplir con un mínimo de 83 % en el valor de cal disponible (*Available Lime*) la cual se analiza según el estándar ASTM C25. Este método mide el óxido de calcio que está disponible para reaccionar del total contenido en la muestra. Este es un indicador de la reactividad de la cal,

sobre todo para ser usada en procesos industriales donde se requieren bajos tiempos de reacción. Entre más alta es la cal disponible, mayor es la reactividad.

Hay varios factores que afectan la calidad de la cal viva, desde su composición química, la temperatura dentro del horno, el tiempo de retención dentro del horno, la concentración de CO₂ dentro del horno y su atmósfera, el tamaño de la piedra caliza y el tipo del horno, el tipo de combustible usado, hasta el precalentamiento de la caliza y enfriamiento de la cal viva (Hassibi, 2013), por lo tanto, hay una probabilidad alta de que algún factor fuera de su valor normal provoque una disminución de la cal disponible en la cal viva producida y que luego, es la materia prima en el circuito de molienda.

Debido al diseño de las instalaciones para producción de cal viva molida, la producción se realiza por medio de *batches*, en cantidad suficiente para despachar un viaje a granel. Por la capacidad de producción del molino ha quedado definido en el plan de calidad que se tomen 4 muestras por cada *batch* producido.

Adjunto se incluye en la tabla I los análisis efectuados entre el 15 de noviembre de 2012 y el 17 de mayo de 2013. En los datos del Laboratorio de Control de Calidad se puede observar que hay tendencia a obtener menores valores de cal disponible en las muestras del área de despachos comparadas con los resultados obtenidos de las muestras del área de producción de cal viva molida, sin embargo, la diferencia entre los valores de cal disponible de las muestras tomadas en ambos procesos para un mismo lote de cal viva molida no es constante, sino que es variable.

Los rechazos ocurren cuando la cal disponible en despachos está por debajo del valor indicado en el plan de calidad, lo cual implica que el transporte a granel deberá ser vaciado y un nuevo *batch* debe ser fabricado. Esto genera principalmente los siguientes problemas:

- Incumplimiento en el tiempo de entrega al cliente, lo cual presenta mayores complicaciones debido a que es una exportación, sujeta a los trámites correspondientes en aduanas.
- Reproceso de la cal viva molida no conforme, rechazada en el proceso de despacho, utilizando el mismo transporte a granel, el material es trasladado hacia un sistema de descarga de pipas para sólidos, donde se trasiega el material hacia un silo de cal viva triturada, para su reproceso en la fabricación de cal hidratada.
- El chofer del transporte también debe cumplir con ciertas normas de descanso para viajes largos, por lo que su programa de viaje se ve interrumpido y el Departamento de Asignación de Transportes debe trabajar en definir otro programa debido al retraso en planta, y tomando en cuenta la nueva hora a la que debe llegar a aduana con México.

Este tipo de problemas no se han dado en otros procesos y productos donde hay una mejor correlación entre lo que se analiza al momento de fabricarlo y lo que se obtiene al momento de despacharlo.

Otras investigaciones respecto de la calidad de la cal viva y como puede variar entre departamentos no se encuentran disponibles, por lo menos en el alcance de la revisión bibliográfica de esta investigación. Una de las razones es que este proceso es nuevo en esta empresa, que a pesar de tener un alto nivel

de tecnología, no lo había implementado al no ser necesario debido a la falta de demanda de esta presentación del producto, además, al momento de realizar este diseño de investigación, no cuenta con competencia dentro del país que tenga un nivel similar de tecnológica, es decir, no hay otra empresa que se conozca que tenga la capacidad de producir esta presentación de cal viva.

Esto último es evidente debido a que la fabricación industrial de cal bajo normas no es lo común en Guatemala, donde solo la marca fabricada en esta planta incluye en su empaque el cumplimiento de Normas ASTM o COGUANOR, es decir, la mayor parte de fabricantes de cal en Guatemala lo hacen de manera artesanal y no cuentan con los medios o controles, ni con los equipos necesarios para fabricar un producto de las características indicadas anteriormente ni para cumplir con una norma internacional.

En cuanto a la aplicación de la metodología Seis Sigma, si se pueden encontrar trabajos de investigación para el grado de licenciatura y para el grado de maestría, en una variada gama de industrias y procesos, incluso administrativos.

En los trabajos que se mencionan a continuación se aplicó la metodología de Seis Sigma a procesos específicos para mejorar indicadores de eficiencia y de calidad en las empresas respectivas, lo cual reafirma la utilidad de la herramienta seleccionada para el desarrollo del presente diseño de investigación, en donde se utilizará la metodología para encontrar las variables críticas que afectan el nivel de la variable cal disponible en la cal viva molida en los procesos de producción y despacho y su interrelación.

En el trabajo de licenciatura de Milton García (2013, p. 7) el objetivo es que a través de la aplicación de la metodología Seis Sigma al proceso de

gestión de desechos sólidos de una empresa de servicio técnico, se mejore su productividad, mejorando con ello la satisfacción de los clientes.

En el trabajo de Maestría de Susana Díaz Medrano (2008, p. 4) el objetivo incluye varios aspectos necesarios para la sostenibilidad de una empresa al rediseñar el proceso de facturación para incrementar la percepción de satisfacción de los clientes, reducir el tiempo de ejecución del proceso y disminuir los costos de la no calidad.

En el trabajo de Ana Aguirre (2010, p. 29) se busca mejorar la capacidad de proceso de una variable específica en el proceso de aplicación de pintura de una ensambladora de vehículos, partiendo de que por la baja capacidad del proceso se afecta los resultados de la empresa además de afectar a la empresa como proveedora de pintura, lo que pone en riesgo su sostenibilidad.

Un ejemplo de la aplicación de la metodología en una industria se presenta en el trabajo de licenciatura de Guillermo Mata (2009, p. XIII) donde su objetivo es introducir la metodología dentro de la empresa, una industria de fabricación de perfiles de hierro, y por medio de ella, buscar oportunidades para el aseguramiento de la calidad.

Como puede verse, aun en diferentes tipos de empresas y procesos, la metodología Seis Sigma es utilizada para mejorar los procesos y el aseguramiento de la calidad para aportar positivamente a la sostenibilidad de las empresas, mejorando la satisfacción de los clientes.

A continuación en la tabla I se pueden observar los resultados de cal disponible de las muestras de cal viva (tomadas en el circuito de molienda y en

despachos), los cuales se incluirán al tener la previa autorización de parte de la empresa de molienda de cal viva.

Tabla I. Resultados de cal disponible de las muestras de cal viva molida tomadas en el circuito de molienda y en despachos

Fecha	Hora	Cal Disponible Molino	Cal Disponible "Pipa"	Fecha	Hora	Cal Disponible Molino	Cal Disponible "Pipa"
15/11/2012	12:00			16/02/2013	18:00		
	14:00				20:00		
	16:00				22:00		
	18:00				00:00		
21/11/2012	04:00			19/02/2013	02:00		
	06:00				04:00		
	08:00				06:00		
	10:00				08:00		
24/11/2012	18:00			24/02/2013	06:00		
	20:00				08:00		
	22:00				10:00		
	00:00				12:00		
29/11/2012	10:00			26/02/2013	10:00		
	12:00				12:00		
	14:00				14:00		
	16:00				16:00		
01/12/2012	16:00			03/03/2013	04:00		
	18:00				06:00		
	20:00				08:00		
	22:00				10:00		
05/12/2012	04:00			06/03/2013	08:00		
	06:00				10:00		
	08:00				12:00		
	10:00				14:00		
10/12/2012	04:00			09/03/2013	12:00		
	06:00				14:00		
	08:00				16:00		
	10:00				18:00		
13/12/2012	10:00			12/03/2013	10:00		
	12:00				12:00		
	14:00				14:00		
	16:00				16:00		
20/12/2012	04:00			18/03/2013	06:00		
	06:00				08:00		
	08:00				10:00		
	10:00				12:00		
21/12/2012	04:00			20/03/2013	14:00		
	06:00				16:00		
	08:00				18:00		
	10:00				20:00		
26/12/2012	12:00			25/03/2013	20:00		
	14:00				10:00		
	16:00				12:00		
	18:00				14:00		
27/12/2012	18:00				16:00		
	20:00			30/03/2013	04:00		
	22:00				06:00		
	00:00				08:00		
02/01/2013	06:00			03/04/2013	10:00		
	08:00				12:00		
	10:00				14:00		
	12:00				16:00		
04/01/2013	14:00			07/04/2013	12:00		
	16:00				14:00		
	18:00				16:00		
	20:00				18:00		
09/01/2013	10:00			09/04/2013	08:00		
	12:00				10:00		
	14:00				12:00		
	16:00				14:00		
13/01/2013	04:00			13/04/2013	14:00		
	06:00				16:00		
	08:00				18:00		
	10:00				20:00		
17/01/2013	08:00			16/04/2013	04:00		
	10:00				06:00		
	12:00				08:00		
	14:00				10:00		
25/01/2013	12:00			21/04/2013	10:00		
	14:00				12:00		
	16:00				14:00		
	18:00				16:00		
29/01/2013	08:00			25/04/2013	04:00		
	10:00				06:00		
	12:00				08:00		
	14:00				10:00		
03/02/2013	14:00			02/05/2013	08:00		
	16:00				10:00		
	18:00				12:00		
	20:00				14:00		
06/02/2013	04:00			09/05/2013	12:00		
	06:00				14:00		
	08:00				16:00		
	10:00				18:00		
10/02/2013	10:00			17/05/2013	08:00		
	12:00				10:00		
	14:00				12:00		
	16:00				14:00		
12/02/2013	06:00						
	08:00						
	10:00						
	12:00						

Fuente: elaboración propia, reportes del Departamento de Control de Calidad.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de la planta de fabricación de cal se prepara el producto en diferentes presentaciones, según la utilización que los clientes le den a la cal viva, se puede despachar en terrón, triturada o molida.

El plan de calidad de la empresa define las variables críticas del proceso de producción de cal viva, no solo físicas sino también químicas, y los valores de liberación o rechazo del producto analizado. Dentro de las variables físicas se encuentra el tamaño de partícula y dentro de las variables químicas la cal disponible.

Durante el proceso de fabricación se toman muestras del producto a intervalos de tiempo establecidos y son analizadas en el laboratorio químico para confirmar el cumplimiento de las variables definidas en el plan de calidad. Sobre la base de los resultados de estos análisis el operador de la planta de cal toma la decisión de descargar el producto hacia la tolva de despacho a granel, principalmente al cumplir con el valor mínimo de la variable crítica de liberación, la cal disponible.

Como parte del control de calidad en el área de despachos, se analiza una muestra de la cal viva molida antes de que salga de planta, la cual es tomada luego de llenar el transporte a granel en el cual se despachará. Este muestreo también está definido dentro plan de calidad.

Aunque se entiende que debido a los procesos de muestreo el valor de la cal disponible reportado por el laboratorio químico en el proceso de molienda no

será idéntico al valor reportado en el área de despachos aun cuando fuera un mismo lote de producción, asumiendo que pertenecen a la misma población, se entiende que la variación debería ser mínima, sin embargo, en el 25 % de los lotes fabricados esta diferencia ha sido tal, que aun cuando en el proceso de molienda se libera el producto, en el área de despachos se rechaza el lote.

Sabiendo que ambas muestras pertenecen al mismo lote de producción, el análisis de causa indica que esta situación puede darse debido a dos circunstancias, una degradación del producto en el proceso de transporte desde el área de molienda hacia la tolva de despacho, o si el muestreo en alguno de los dos puntos no fuera representativo del producto.

El manejo de estos lotes rechazados tiene implicaciones negativas en varios departamentos y en los costos del producto:

- Implican el vaciado del transporte para su reproceso dentro de la planta de cal, con lo cual se incumple con el tiempo planificado de despacho, provocando retrasos en la entrega de producto al cliente, además de incumplir con la planificación de tiempos del transportista, lo cual, además de incidir en un sobre costo en la contratación del transporte, incide en los tiempos de descanso del chofer y puede poner en riesgo su salud y seguridad en ruta.
- El lote rechazado implica un sobre costo en el consumo de energía en la fabricación de lote mismo.
- Se tienen sobre costos por la necesidad de realizar análisis fuera de presupuesto en el laboratorio químico.

Por lo tanto, el problema identificado es el valor de cal disponible en despachos menor al valor obtenido en las muestras tomadas en producción para mismos lotes de cal viva molida, siendo la pregunta de investigación, la siguiente:

- ¿Cuál es el valor de cal disponible de la cal viva molida en el área de producción necesaria para que se cumpla con el valor mínimo de cal disponible del mismo lote en el área de despachos?

Para ello se debe investigar sobre los siguientes cuestionamientos:

- ¿Existe una relación entre el valor de la cal disponible medida en producción y la cal disponible medida en el mismo lote en el área de despachos?
- ¿Existe una variación del nivel de cal disponible en relación con el tiempo de almacenamiento del lote de producción de cal viva molida en despachos?
- ¿Cuál es el proceso de liberación de la materia prima utilizada en la producción de cal viva molida según el plan de calidad?
- ¿Se puede contar en el proceso de molienda de cal con un método que busque asegurar el cumplimiento de los requisitos del cliente?

El análisis se delimitará al proceso de fabricación de cal viva molida, desde la alimentación al molino hasta la carga del producto en el transporte a granel, luego de pasar por la tolva de despacho. Además de utilizar datos de la producción diaria, se analizarán los datos históricos desde el inicio de la fabricación y despacho de este producto.

3. JUSTIFICACIÓN

La línea de investigación que sigue este trabajo es la implementación de un sistema de confiabilidad para el sistema de calidad de la empresa en estudio. Se busca asegurar el cumplimiento de la calidad requerida por el cliente para la cal viva molida al encontrar las razones de la diferencia que existe entre los resultados de las muestras de despachos y producción aplicando la herramienta estadística Seis Sigma, lo que hace aplicables los conocimientos adquiridos en la Maestría de Gestión Industrial en el trabajo diario de un ingeniero químico dentro de un proceso productivo.

Debido a la existencia de esta diferencia entre las muestras de despachos y producción, las consecuencias listadas en la sección de antecedentes tienen repercusiones en los costos de la operación. El hecho de que el 25 % de los despachos se tengan que reprocesar incrementa los costos de operación precisamente en un 25 %, lo que provoca que la empresa no esté obteniendo el nivel de ganancias esperado para este producto y consecuentemente, afecte negativamente su estado de resultados.

Por otro lado, el retraso en la entrega del producto no solo se refiere al corrimiento en la hora de entrega, sino que el panorama empeora al corroborar que para llegar al cliente, debe pasar por una frontera, que tiene un horario normal de oficina y cuyo trámite para internación se demora entre 5 y 6 horas. Si el transportista no llega con suficiente anticipación para llevar a cabo todo el trámite, corre el riesgo de tener que esperar hasta el siguiente día hábil, lo que pone en riesgo incluso el abastecimiento de producto al cliente, si la situación

se diera en un viernes, tendría que esperar hasta el lunes siguiente para pasar la frontera.

Otra consecuencia que se busca eliminar, es la referente al tiempo de trabajo de los pilotos transportistas, no solo por el tiempo que deben permanecer varados en planta esperando el despacho del producto, sino por los cambios en los programas de viajes, que los afectan directamente, al tener que cambiar los horarios de viaje para lograr llegar a tiempo a la frontera para poder efectuar el trámite de internación correspondiente.

La empresa saldrá beneficiada al tener una herramienta que permita caracterizar los cambios de calidad del producto a medida que avanza en los procesos siguientes y que permita definir como prever esta disminución en la calidad sin correr el riesgo de que le llegue al cliente producto fuera de especificación o se generen los problemas ya mencionados por el rechazo de lotes.

La metodología a utilizar es experimental ya que el proceso que se va a investigar es prácticamente nuevo y aún no se tienen la suficiente cantidad de datos para hacer un análisis estadístico de los mismos. Además se utilizarán los datos obtenidos hasta el momento para buscar la razón de la diferencia de resultados entre ambos puntos de muestreo.

4. OBJETIVOS

General

Determinar el valor de cal disponible en producción que asegure el cumplimiento mínimo requerido por el cliente en las muestras tomadas en los despachos.

Específicos

1. Determinar la relación entre la cal disponible medida en el área de producción y la del área de despachos para un mismo lote de cal viva molida.
2. Establecer el proceso de liberación de materia prima para la producción de cal viva molida.
3. Determinar la variación del nivel de cal disponible en relación al tiempo de almacenamiento en despachos.
4. Establecer un procedimiento de aplicación del método Seis Sigma al proceso de molienda de cal con el fin de asegurar el cumplimiento de los requisitos del cliente.

5. NECESIDADES A CUBRIR

La empresa necesita garantizar la entrega a tiempo de todos sus productos cumpliendo con todos los estándares de calidad acordados con todos sus clientes de manera que se asegure mantener una alta satisfacción de sus clientes, lo que asegura una relación a largo plazo con ellos.

La situación planteada en este trabajo pone en riesgo la relación a largo plazo y lealtad de un cliente importante para la empresa ya que es el primer cliente al que se le entrega este producto como solución a sus requerimientos, lo que pone en peligro que el producto no sea aceptado por otros clientes potenciales. Además de la relación con el cliente, la empresa necesita tener herramientas y procedimientos para asegurarse que todos los productos cumplan con los requerimientos de calidad desde el principio de su fabricación, algo que será reforzado al aplicar herramientas como Seis Sigma a la fabricación de este producto.

La solución planteada, es básicamente la aplicación de Seis Sigma junto con la estadística necesaria para detectar las situaciones que evitan el cumplimiento de los requisitos de calidad. Es nueva para la empresa, ya que hasta el momento, solo se han utilizado herramientas estadísticas de manera puntual y no con un proceso completo como lo hace Seis Sigma, abarcando no solo a los equipos sino también al personal operativo y gerencial.

A través de la aplicación del método Seis Sigma, se buscarán las causas de la diferencia en los resultados de calidad de ambos puntos de muestreo, aplicando las herramientas listadas más adelante para determinar el grado de

diferenciación de las muestras y su relación con otras variables, como el tiempo de almacenaje. Luego de encontrar estas diferencias y sus causas y relaciones, se presentarán las recomendaciones y ajustes en los requisitos de calidad necesarios para asegurar el cumplimiento de la calidad de la cal viva molida.

6. ALCANCES

Aunque es un problema nuevo que se presentó con el sistema modificado de producción de cal viva molida, el alcance de la investigación aparte de describir las variables involucradas en el fenómeno y como están relacionadas, buscará describir las causas que generan las desviaciones de los valores esperados y en qué condiciones de operación se manifiesta.

El problema se analizará dentro de los siguientes límites o fronteras, desde la alimentación al molino 1 de cal viva, hasta el área de despacho a granel para cal viva molida de la planta de cal situada en el kilómetro 46,5 de la carretera Jacobo Arbenz Guzmán, Sanarate, El Progreso.

Para el análisis de la relación entre la cal disponible de la cal viva molida en las muestras de despachos y producción se utilizarán los reportes del Laboratorio Químico correspondientes al período comprendido entre el 15 de noviembre del 2012 y el 17 de mayo del 2013, donde se incluye la información del resultado del análisis, las fechas y horas de la toma de cada muestra.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Cal viva

Tomando como referencia el trabajo de Oates (1998), la cal es llamada *quicklime* en inglés, y es el producto de la disociación térmica de la caliza (*limestone* en inglés). Su principal componente es el óxido de calcio (CaO) y su calidad depende de muchos factores, principalmente de sus características físicas, de su reactividad con el agua y de la composición química de la caliza que fue utilizada como materia prima.

7.2. Cal hidratada

Igualmente Oates (1998) describe a la cal hidratada como el término utilizado para describir el hidróxido de calcio en polvo, producido de la reacción de la cal viva con agua en exceso en cantidad controlada. Estequiométricamente, el hidróxido de calcio contiene aproximadamente 28 % en peso de agua junto con el óxido de calcio, sin embargo, este producto es esencialmente seco, ya que contiene menos de 1 % de agua sin reaccionar, es decir, el contenido de agua residual o superficial es bajo.

El resultado de la hidratación no debe ser confundido con la cal apagada, nombre que recibe la cal hidratada, pero que se refiere a la producción de una dispersión de hidróxido de calcio en agua, también llamada “lechada”, es decir, con una cantidad elevada de agua residual, y que por lo regular, varía según el usuario final.

7.3. Usos de la cal viva y su importancia en la industria

Para principios de los 80's Boynton (1980) indicaba que la cal viva era el alcalino más barato en la industria y el segundo químico en uso, detrás del ácido sulfúrico.

Oates (1998) refiere que la cal viva y la cal hidratada son utilizadas en una gran cantidad de industrias y sectores productivos y que mundialmente, la industria que más cal demanda es la producción de acero. Algo muy interesante de su recopilación de información sobre la cal, indica que el tamaño del mercado en cada país depende principalmente de su grado de industrialización, por lo que se puede decir, que entre más cal se utilice en un país, más avanzado industrialmente estará.

Igualmente Boynton (1980) lista algunos procesos industriales en donde se emplea la cal, como lo son los procesos de neutralización, coagulación, alcalinización, deshidratación, hidrolización y absorción, por lo que habrá varios sectores de la industria en donde se utilice la cal. En el sector de la construcción se aplica como material cementante y plastificante, algo muy común en Guatemala, donde se usa para repellos y acabados finos. En el sector agrícola se utiliza para proveer de calcio y magnesio a las plantas y neutralización de suelos y, en la construcción de carreteras para la estabilización de suelos y como material de relleno para el asfalto.

En la mayoría de las funciones en la industria se puede emplear indistintamente la cal viva o la cal hidratada, sin embargo, para ciertos propósitos, hay preferencias generales de un tipo sobre el otro.

La cal viva debido a su estado anhidro (baja cantidad de agua residual), es más concentrada que la cal hidratada, sin embargo, en la mayoría de los casos, la cal viva debe ser “apagada” por el consumidor para formar una lechada antes de ser utilizada en sus procesos. Este tratamiento representa un paso extra para el consumidor y una inversión en equipos especializados. La cal viva, además, por su alta reactividad, representa riesgos a la salud de los operadores que están en contacto con ella, por lo que, como lo menciona Boynton (1998), en cada proceso donde se utilice, habrá una decisión económica o una evaluación de riesgos, que definirá específicamente la forma en la que se adquiera la cal.

7.3.1. Uso de la cal en la industria azucarera

Tal como lo describe Fuentes (2006) en su trabajo de graduación, la cal es utilizada en el proceso de purificación del jugo de caña, justo después de que es extraído de la caña en los molinos. En esta etapa, el jugo obtenido es transportado a tanques de alcalinización donde se le dosifica una lechada de cal para neutralizarlo, es decir, llevarlo a un pH de 7. Este es un proceso por *batch*, y la cantidad de cal utilizada será la necesaria para llegar la solución al pH deseado.

7.4. Propiedades físicas y químicas de la cal viva

A continuación se presentan dos propiedades: una física que es la granulometría y la química, la cal disponible, las cuales definen la calidad de la cal viva para el usuario final.

7.4.1. Granulometría

La granulometría de la cal depende del equipo con el cual es producida, ya sea en hornos horizontales o verticales . Es normal que los hornos verticales utilicen caliza de mayor tamaño que los hornos horizontales, por lo que producen cal viva que debe ser triturada para su uso posterior.

Los hornos verticales producen entonces cal viva en terrón de entre 40 hasta 125 milímetros, mientras que los hornos rotativos, que son alimentados con calizas trituradas finas, producen cal viva de hasta 50 milímetros.

Según Oates (1998), los hornos verticales requieren de caliza que haya sido tamizada, es decir, su tamaño de partícula sea controlado de manera que la partícula más grande sea 2 veces el tamaño inferior o incluso 3 veces, estando el tamaño mayor entre 75 y 150 milímetros. Una particularidad de los hornos horizontales, es que no pueden operar de manera estable con polvos finos, por lo que previo a su ingreso al horno, la caliza es tamizada para extraer las partículas menores al tamaño menor de piedra definido, por ejemplo, por debajo de 40 milímetros.

En el caso de los hornos horizontales (rotativos) se pueden aceptar tamaños de partículas desde polvos finos hasta de 50 milímetros.

Además de las características propias del tamaño de la cal en la salida de los hornos debido al tamaño de la caliza que se utiliza para su fabricación, hay una restricción en cuanto al tamaño de la cal según el proceso en el que se utilice, por ejemplo, en ciertos procesos dentro de la fabricación del acero se prefiere la cal viva entre 10 y 40 milímetros. Otras restricciones del tamaño de partícula en la cal viva, vienen dadas por el sistema de transporte utilizado por

el cliente. En el caso en el que el proceso utilice sistemas neumáticos de transporte, el rango preferido de tamaños sería más fino, por ejemplo, hasta un máximo de 20 milímetros.

Estas restricciones para la comercialización de la cal requieren de instalaciones adecuadas que incluyan equipos de tamizaje (cribas, zarandas), equipos de trituración, equipos de transporte y almacenamiento.

Otros procesos requieren de granulometrías más finas en la cal viva, por lo que puede ser necesario contar con equipos de molienda para cumplir con este requisito. Oates (1998) menciona que para estabilización de suelos la cal puede tener una finura de 98 % en el tamiz de 4 milímetros, mientras que en otras aplicaciones especiales la restricción de finura puede ser el 99 % pasando el tamiz de 50 micras.

Boynton (1980, p. 213, 214), explica las razones para el uso de una cal viva más fina, “ya que la efectividad de la cal como producto alcalino, depende tanto de su solubilidad como de la velocidad de disolución”. Una de las propiedades físicas que tiene influencia sobre esta solubilidad es el tamaño de partícula. Además menciona que como regla general, mientras el diámetro promedio de las partículas de cal disminuye, su solubilidad se incrementa, y que esto se debe principalmente a que su área superficial aumenta.

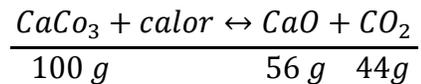
En la planta de cal se cuenta con hornos verticales que producen cal viva entre 40 y 125 milímetros, mientras que la cal viva en estudio es la producida por un molino de bolas, con una finura del 70 % pasando el tamiz de 200 micras.

7.4.2. Cal disponible y reactividad

Representa el contenido de cal libre (óxido de calcio, CaO) en la cal viva o cal hidratada, que es el constituyente activo de la cal y que está disponible para reaccionar con otros compuestos. Provee un medio para evaluar la concentración de la cal que será aprovechada dentro del proceso de aplicación.

7.5. Proceso de calcinación

La palabra calcinación se refiere al proceso de descomposición térmica de la caliza en óxido de calcio y dióxido de carbono.



Oates (1998, p. 143) menciona que para una caliza en particular, las siguientes variables son las principales responsables de la variación en la velocidad de disociación de la caliza en la reacción de calcinación:

- Características de la caliza
- Distribución granulométrica de las partículas de caliza
- La forma de las partículas
- El perfil de temperaturas en la zona de calcinación del horno
- La velocidad de intercambio de calor entre los gases del horno y las partículas.

Debido a lo anterior, se puede concluir que cada caliza tendrá un comportamiento determinado y se recomienda correr pruebas e calcinación para confirmar los rangos esperados de operación de hornos.

Algunos estudios se han realizado en la Facultad de Ingeniería, asesorados por el Ing. Químico César García del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para determinar el comportamiento de las calizas en el proceso de calcinación, entre los que se pueden mencionar el trabajo del Ing. Manuel de León (1990), sobre el grado de disociación logrado en una caliza determinada a una temperatura de 750 °C, el de la Inga. Verónica López (1996), donde se encontró que a pesar de variar los tiempos de calcinación la temperatura óptima para la disociación es de 850 °C, entre otros.

Teóricamente, Oates (1998) indica que para que se lleve a cabo la calcinación se debe llevar la piedra a una temperatura de 900 °C y luego proveer el calor necesario para la disociación, sin embargo, indica que este requerimiento de calor puede ser menor al aprovechar el calor dentro de un horno, por lo que la cantidad final de calor requerida será menor que el cálculo teórico, lo cual concuerda con las observaciones de la Inga. López (1996).

En este sentido, la mejor transferencia de calor entre los gases de combustión y los sólidos se da en los hornos con cama empacada, es decir, en hornos verticales, donde todo el gas debe pasar a través de la cama de material y, por ende está en contacto permanente con la caliza a disociar, mientras que en los hornos rotativos, el intercambio de calor es menos eficiente principalmente debido a las pérdidas por radiación, ya que el gas solo está en contacto con una cara de la cama de caliza que se forma dentro del horno.

7.6. Fabricación de la cal viva

La producción de determinada calidad de cal viva requiere de la selección y disponibilidad de una apropiada calidad de la caliza, y del horno y combustible

a utilizar, además de un control adecuado de los parámetros de operación del horno para asegurar una calidad consistente y que cumpla con las especificaciones.

Los hornos utilizados en la planta de cal son los de flujo paralelo regenerativo. Su principal característica es que consiste en dos hogares verticales interconectados formando una “H”. Cargas parciales de caliza se realizan alternadamente a cada hogar, de la misma manera que se extrae de manera continua cal viva, logrando mantener un nivel constante de cama dentro del horno.

Mientras la piedra baja por la cama desde el punto de alimentación hacia la mesa de descarga, baja hacia la zona de precalentamiento, pasando por las lanzas de combustible hacia la zona de calcinación. A partir de allí, la cal viva formada pasa a la zona de enfriamiento.

La operación del horno consiste en dos etapas similares: en la primera el combustible es inyectado en el primer hogar por medio de las lanzas y se quema al entrar en contacto con el aire de combustión inyectado en el mismo hogar. El calor liberado es absorbido parcialmente para la calcinación de la caliza del hogar 1.

En la base de cada hogar se inyecta aire para el enfriamiento de la cal viva fabricada. Este aire de enfriamiento junto con los gases de combustión y el dióxido de carbono producto de la calcinación del primer hogar pasan a través de la interconexión (llamada canal) hacia el segundo hogar. Ya en el segundo hogar, los gases provenientes del primero se mezclan con el aire de enfriamiento del segundo hogar subiendo a través de la cama de material hacia

arriba y afuera del horno, precalentando la piedra del segundo hogar en la zona de precalentamiento.

Luego de 12 minutos (este tiempo puede variar entre 8 y 15 minutos según los parámetros de operación de cada horno) da inicio a la segunda etapa. El flujo de combustible y aire hacia el primer hogar termina y ocurre una “reversión”, sucediendo el mismo proceso pero en los hogares opuestos.

7.7. Factores que afectan la calidad de la cal viva

Primeramente se dirá que la calidad de la cal viva se determina principalmente por su grado de reactividad, es decir, por su facilidad para reaccionar en el tiempo. Lógicamente, el grado de reactividad está ligado directamente con la cantidad de CaO presente en la cal viva, por lo que se concluye que a mayor pureza de la caliza, se pueden obtener mayores niveles de reactividad.

Esta observación es reafirmada por (Baziotis, 2011, p. 191), donde en línea con la pureza de la piedra, menciona que contenidos altos de MgO disminuyen la reactividad de la cal ya que el $MgCO_3$ (carbonato de magnesio) se descompone a menores temperaturas que el $CaCO_3$ (carbonato de calcio), por lo que los contenidos de MgO presentes en la cal viva final son producto de un sobrecalentamiento debido a que se exponen a temperaturas mucho mayores a la de su calcinación, concluyendo que “la presencia de este óxido sobrecalentado muestra una relación inversamente proporcional con el nivel de reactividad de la cal analizada”.

Baziotis (2011) también menciona que dentro de los factores que afectan el grado de reactividad de la cal para un mismo contenido de óxido de calcio, se

han encontrado dos factores principales, el tiempo de retención dentro del horno y la temperatura de calcinación dentro del horno. Otros factores como el grado de calcinación y la densidad de la cal viva producida por un horno también determinan la reactividad de la cal, sin embargo, son un resultado de los dos factores mencionados inicialmente.

En conclusión, (Baziotis. 2011, p. 190, 191) indica que “para una composición química determinada, se busca la mayor porosidad posible ya que esto aumenta el área superficial que estará en contacto con los compuestos a los que se exponga, lo que ayuda a mejorar la reactividad de la cal”. O de otro modo, para un contenido de óxido de calcio determinado, el que tenga la menor densidad será la cal viva con mayor reactividad.

7.8. Proceso de molienda

La molienda es una operación unitaria que puede ser llevada a cabo en diferentes tipos de equipos. El objetivo principal es la reducción del tamaño de partícula de la materia prima debido a requerimientos físicos en etapas posteriores ya sea dentro de una línea de producción o por requerimientos del usuario final.

En el caso de la planta de cal se utiliza un molino tubular con bolas de acero como medio de molturación con una capacidad de producción de 3,50 toneladas por hora. Dentro de este proceso también es importante la participación de otros componentes internos del molino, como las placas protectoras del casco del molino.

Los elementos molturadores tienen diferentes tamaños según el material que ayudan a moler dentro del molino, es decir, se deberá escoger el tamaño

de los elementos con base en el tamaño de los materiales que se alimentarán dentro del molino y el tamaño de estos cuerpos moledores deberá ir disminuyendo según la reducción de tamaño esperada. Se dice entonces que el molino es el corazón de un circuito de molienda ya que dentro de él se lleva a cabo el proceso de reducción de tamaño.

En el Manual de molinos para la industria del cemento, parte B, (Bürki, 1995) se detalla como sucede la molienda dentro del molino y como entran en juego también las partes internas del mismo, que provocan un movimiento de tipo catarata o de tipo cascada en los elementos molturadores para mejorar el proceso de reducción de tamaño, generando fuerzas de impacto para la reducción primaria de tamaño y de fricción para la reducción final.

En el Manual de molinos para la industria de cemento, parte C, (Breitshmid, 1993) hace una revisión de los principales tipos de circuitos de molienda utilizados.

7.9. Circuito abierto de molienda

En este tipo de circuitos el producto final se obtiene directamente de la salida del molino, por lo que el diseño de la carga de bola es crítico para poder obtener desde el primer paso por el molino, la finura requerida por el cliente.

Un cambio en el diseño de la carga de bola no solo es una tarea compleja, sino que demanda de cierta cantidad de tiempo (dependiendo del tamaño del molino) durante el cual el molino no estará en producción. Debido a lo anterior, estos circuitos son ineficientes ya que por lo regular, se debe sobre moler gran parte del material para lograr llegar al requerimiento de finura en un solo paso por el molino.

7.10. Circuito cerrado de molienda

En los circuitos de molienda cerrados se utiliza algún equipo para regular el tamaño de partícula del producto final de la molienda, es decir, el producto final del circuito no sale directamente del molino, sino que se obtiene de otro equipo que controla la finura del producto en un proceso de selección de partículas, en donde el material que cumple con la finura pasa al producto final y el material que no cumple con la finura es retornado al molino para que se siga reduciendo de tamaño.

Estos equipos para el control de finura son llamados separadores de partículas y regularmente operan con corrientes de aire. Estos equipos ayudan a hacer más eficiente el consumo de energía, ya que se vuelve a moler solo el material grueso resultante del paso por el molino.

En estos circuitos, las posibilidades de regular la finura del producto final son amplias y en la mayoría de los casos, pueden hacerse ajustes con el circuito en operación. Como lo confirma Breitshmid (1993), en estos circuitos se tiene un menor consumo de energía que los equivalentes circuitos abiertos para una misma finura.

En el caso de la planta de cal, se cuenta con un circuito cerrado de molienda, utilizando un separador de partículas dinámico para el control de la finura del producto final.

7.11. Separadores de partículas

Los separadores de partículas ejecutan su función como resultado de una suma de fuerzas sobre cada partícula que procesan. Zeller (1995) explica que

dentro del separador se aplican fuerzas centrifugas y de arrastre de aire a la corriente de entrada al separador de manera que el balance con el peso de cada partícula es lo que define si la misma irá a la fracción gruesa o al producto final.

Los separadores son una evolución de los ciclones, los cuales tienen una eficiencia de separación de partículas definida según sus dimensiones. Al agregar elementos móviles dentro de un ciclón se ha logrado mejorar esta eficiencia y sobre todo, llegar a tener un nivel de ajuste según las necesidades de cada circuito. Debido a esto, la mayoría de separadores externamente tienen la forma de un ciclón, aunque los separadores de última generación pueden llegar a ser muy complejos.

En el caso de la planta de cal, se cuenta con un separador dinámico de tipo *Whirlwind*, con un ventilador de velocidad variable. Este ventilador es el responsable de las fuerzas centrifugas y de arrastre de aire a las que es expuesta la corriente de cal viva producto del molino. Es importante mencionar que este ventilador también define la cantidad de material que puede manejar, es decir, a mayor velocidad se pueden manejar mayores flujos de materiales, por lo que es una limitante del nivel de producción del circuito de molienda en general.

7.12. Muestreo y análisis de la cal viva

Del libro de Oates (1998, p. 403 - 424) se obtuvieron los siguientes conceptos básicos relacionados con el proceso de muestreo.

- Incremento: “es la cantidad de material tomada en una sola aplicación u operación del equipo de muestreo”, es decir, que en una interrupción de

la corriente de producción se tomará el equivalente al volumen del equipo utilizado.

- Muestra: “es la cantidad de material tomada de manera aleatoria o de acuerdo a un plan de muestreo para obtener una cantidad mayor de material. Puede consistir de uno o varios incrementos”, por lo regular, la cantidad de muestra a tomar dependerá del tamaño de la corriente a muestrear, por lo que en determinadas circunstancias, serán necesarios varios incrementos para ajustar el tamaño de muestra necesario. En otras ocasiones, se tomará en cuenta que para la representatividad de la muestra, se tendrá que llegar a una cantidad de muestra tomada en determinado tiempo de manera que se cubra un período de producción determinado, sobre el cual se calculó la cantidad de muestra a extraer.
- Muestra puntual: “es la muestra tomada en una misma ocasión o tiempo y en un mismo lugar o punto de muestreo. Puede consistir de un incremento o al combinar dos o más incrementos tomados consecutivamente”, en este caso no se necesita conocer la composición o características de un periodo determinado, sino su estado en el momento del muestreo.
- Muestra compuesta: “es la mezcla de muestras puntuales tomadas en diferentes tiempos o lugares, de una cantidad de material mayor. Es producida al mezclar vigorosamente las muestras combinadas, y de ser necesario, dividiendo la mezcla resultante utilizando técnicas aprobadas”, este procedimiento se utilizará cuando se habla de representatividad en periodos más prolongados y muchas veces se usará como testigo para guardar un tiempo de terminado.

- Muestra de laboratorio: “es la muestra preparada al mezclar de manera vigorosa, y de ser necesario, la subdivisión de la cantidad total de una muestra puntual o compuesta. La muestra de laboratorio puede ser reducida de tamaño de ser necesario”, lo que es lo más común que suceda debido al tamaño definido en las normas para el análisis final, es decir, si una muestra se determina que es representativa al tomar 1 200 gramos de la corriente de producción, para el análisis solo serán necesarios 5 gramos de la misma. De allí que las normas regularmente indican la manera de extraer esta cantidad necesaria para análisis de la muestra representativa en estudio.

7.12.1. Muestra representativa

Es importante entender los principios del muestreo y las precauciones necesarias para obtener una muestra representativa de laboratorio, las Normas Británicas BS 5309 (1976) indican:

- Adoptar un procedimiento probado para la toma de incrementos
- Asegurar que cada incremento es de la cantidad adecuada
- Tomar un número adecuado de incrementos

Antes de diseñar el procedimiento de muestreo, el objetivo debe ser claramente definido, por ejemplo:

- Muestra puntual para control de proceso.
- Muestra puntual, para establecer si el contenido de un camión está dentro de las especificaciones.
- Muestra compuesta para establecer la calidad promedio del producto dentro del periodo de determinada semana.

7.12.2. Preparación de la muestra

La preparación de una muestra para su medición y análisis en el laboratorio regularmente requerirá dos o más de las siguientes operaciones según Oates (1998):

- Mezcla de muestras puntuales o muestras compuestas
- Toma de una muestra más pequeña
- División de la muestra para producir dos o más sub-muestras equivalentes
- Reducir el tamaño de partícula por trituración o molienda

7.13. Filosofías de calidad

La búsqueda por la calidad en los procesos empresariales ha tenido aportes en el tiempo de personas que han logrado llevar a la práctica sus pensamientos, ya sea como filosofías para la mejora de los procesos y empresas, o como herramientas para apoyar esa mejora. A continuación se enumeran las siguientes.

7.13.1. La filosofía de Demming

Debido a sus valiosos aportes al desarrollo del Japón de la Segunda Guerra Mundial, la Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros (JUSE) instituyó en su honor el premio Demming, el cual es el mayor reconocimiento a la calidad en el país asiático.

Demming cambió los paradigmas de la época sobre la calidad, bajo los cuales todos pensaban que la calidad tenía un alto costo. Demostró que los costos decrecen por la menor cantidad de errores cometidos, la disminución de las demoras y la mejor utilización de los recursos. Introdujo en el Japón el ciclo de Shewhart de la mejora continua, que en ese país es conocido como el ciclo de Demming (PHVA), planear, hacer, verificar y actuar.

Demming propuso 14 enunciados para desarrollar prácticas administrativas eficaces para llevar la administración de una empresa a la excelencia de la calidad, los cuales son enumerados en el libro “Administración y Control de la Calidad” (Evans, 2008, p. 95 – 106).

En resumen, Demming transmitió principalmente las ideas del liderazgo de la alta dirección, la importancia de las relaciones entre clientes y proveedores y la mejora continua de los procesos, también indicó que la variación es la razón de la mala calidad, (Evans 2008, p. 94) indica que “La filosofía de Demming se centra en la mejora continua en la calidad de productos y servicios reduciendo la incertidumbre y la variabilidad en los proceso de diseño manufactura y servicio, bajo el liderazgo de los directores”.

7.13.2. La filosofía de Juran

Las recomendaciones de Juran respecto de la calidad se centran en tres procesos principales: la planificación, el control y la mejora (Evans, 2008). Respecto de la planificación, se entendían varios procesos relacionados entre sí, que inician con el conocimiento del cliente, la identificación de sus necesidades, y que llevan a la definición de los procesos necesarios para cumplir con tales necesidades.

Dentro de la planificación se incluye el involucramiento de todos los empleados para conocer las necesidades de los clientes y la definición de metas que conlleven al cumplimiento de las mismas. El control se da en la etapa operativa, y se incluyen todas las actividades necesarias definidas para la medición de indicadores de los procesos, donde se determinan las desviaciones de calidad que llevan a un desperdicio de recursos, y en la etapa de mejora, se busca disminuir esa brecha de calidad y por ende, disminuir los desperdicios innecesarios. Para esta mejora Juran proponía todo un procedimiento detallado que abarcaba desde la identificación de las causas y de las actividades a mejorar, hasta la prueba de las soluciones propuestas.

Juran (1999) indica en su manual de calidad, que se pueden distinguir dos clases de costos de la calidad, uno dentro de la organización, que afecta directamente a los costos de producción y que están influenciados principalmente por el reproceso de materiales o actividades, y uno que tiene que pagar el cliente por deficiencias en el producto o servicio y que finalmente afectan los ingresos de las empresas por pérdidas de ventas nuevas. Sobre esta base se pueden razonar y comunicar de mejor manera los esfuerzos por la mejora de la calidad dentro de las empresas.

7.13.3. La filosofía de Kaoru Ishikawa

Kaoru Ishikawa fue ganador del premio Demming a la calidad en 1952. Fue uno de los pioneros de la revolución de la calidad en Japón. Dos de los principales puntos de su filosofía son el trabajo en equipo y el concepto del cliente.

En cuanto al trabajo en equipo, buscó llevar el control de calidad a todos los niveles de la organización, incluyendo a los supervisores y a los operarios

de manera que todos pudieran aplicar las herramientas de calidad. Recomendaba una permanente capacitación de la fuerza laboral ya que todos eran necesarios para resolver problemas y siempre busco que se promoviera la participación de todos los empleados, de manera que ya no se dependiera tanto de los profesionales y del Departamento de Calidad para la mejora de procesos (Evans, 2008).

En cuanto al concepto de cliente, Ishikawa creía que la calidad empieza con el cliente, por lo que conocer sus necesidades y entenderlas era la base de la mejora de los procesos. Promovía el uso de herramientas simples como la mejor manera de solucionar problemas, además de utilizarlas para recabar información real y presentarla de manera simple.

7.14. Historia de Seis Sigma

Evans (2008) y Allen (2006) indican que el movimiento Seis Sigma nació en Motorola, una compañía que en los años 80 tenía serios problemas de calidad que afectaban el rendimiento de la misma. Inicialmente se hizo un análisis de la causa de tantas pérdidas, concluyendo que el mal desempeño se debía a unidades que no pasaban las pruebas finales y que tenían que regresar al inicio del ciclo de trabajo. Siendo que la mayoría de los clientes que dejaban de comprar los productos Motorola consumían productos de Japón, un grupo de ejecutivos fueron enviados al Japón para explorar los métodos de operación y el nivel de calidad de sus productos.

En resumen encontraron que los japoneses mantenían programas de involucramiento de toda la fuerza laboral en la mejora de sus operaciones enfocados en mejorar el servicio al cliente y que tenían un enfoque en tener diseños sencillos en sus productos. Estos hallazgos fueron la base del

desarrollo del programa *Six Sigma* en Motorola, como lo menciona (Larson, 2003).

En una revisión de los inicios de Seis Sigma en Motorola que presenta Allen (2006), comenta que aproximadamente el 10 % de los ingenieros de la compañía contaban con un entrenamiento en diseño experimental debido a las operaciones propias de la empresa, lo que a mediados de los 80 dio paso a la creación de la Academia Seis Sigma cuyo presidente Mikel Harry innovó en el modo de instruir a las personas basados en casos de estudio. Es a través de esta academia que difundió el concepto de Seis Sigma a otras compañías importantes, como Allied Signal, Texas Instruments y General Electric, que al aplicar los conocimientos adquiridos en la academia lograron mejoras significativas en sus ventas y ganancias.

7.15. Definición de Seis Sigma

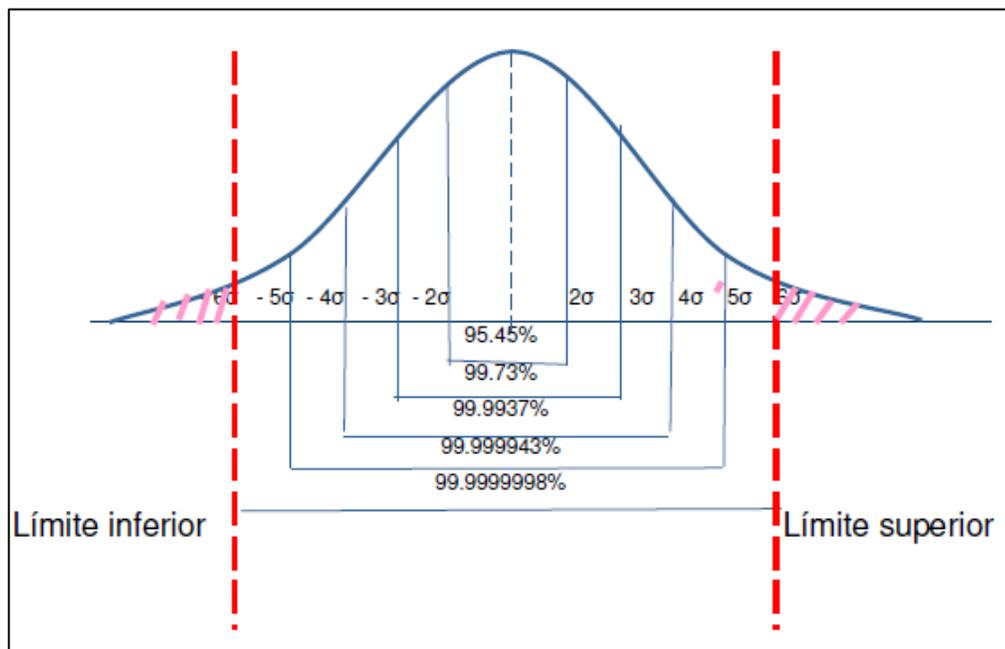
Estadísticamente el nombre “Seis Sigma” se deriva de la letra griega Sigma “ σ ” la cual es utilizada en estadística para representar la desviación estándar de un conjunto de datos. Por lo general, muchos procesos tienden a distribuirse normalmente lo cual origina gráficamente una curva simétrica con forma de campana conocida como campana de Gauss, la cual tiene un eje de simetría donde coinciden las tres medidas de tendencia central: media aritmética, moda y mediana (ver figura 1).

El área debajo de la gráfica es igual a 1 (o 100 %). Debido a que la media es la misma que la moda, el punto más alto de la campana es la media. Debido a que la mediana es la misma que la media, el 50 % de los valores están debajo de la media y 50 % están arriba de la media.

Si sobre esta gráfica de campana se colocan los límites de un gráfico de control se puede ver que existen valores que quedan dentro de ella; es decir entre el límite superior y el límite inferior, y otros que quedan fuera de la campana (fuera de los límites). Estos últimos representan la probabilidad de que ocurra un error.

La figura 1 ilustra el porcentaje de los valores que quedan dentro de los límites de control a una distancia de n desviaciones estándar de la media.

Figura 1. **Área debajo de la curva normal**



Fuente: Breyfogle (1999).

Según estudios realizados por Six Sigma Research Institute, Motorola University, la mayoría de los procesos varían 1,5 desviaciones estándar de la media debido a causas aleatorias, tales como el material utilizado, la persona,

(Calvillo, 2006), hace una recopilación de lo que significa la capacidad de proceso Seis Sigma, la cual se muestra a continuación:

Se dice que un proceso tiene capacidad Seis Sigma cuando tiene los siguientes índices de capacidad:

σ Capacidad = 6

CP = 2

CP_k = 1,5

σ nivel = 4,5

DPM = 3,4

En dónde:

- σ Capacidad = para este caso es 6 σ y está definida de la siguiente forma:

$$\sigma \text{ Capacidad} = 0.8406 * \sqrt{29.37 - 2.221 * \ln(\text{DPM})}$$

- CP: es un índice que representa la capacidad potencial del proceso y se define así:

$$CP = \frac{\sigma \text{ Capacidad}}{3} = \frac{6}{3} = 2$$

- CP_k: es un índice de capacidad del proceso y representa la proporción de tolerancias naturales entre el centro del proceso y la especificación más cercana. Este índice se define como:

$$CP_k = \frac{\sigma \text{ nivel}}{3} = \frac{4.5}{3} = 1.5$$

- σ nivel: indica el número de desviaciones estándar entre el centro de un proceso y la especificación más cercana. Según la variación de 1,5 de la media en los procesos, el σ nivel sería:

$$\sigma \text{ nivel} = 6 - 1.5 = 4.5$$

- DPM: significa defectos por millón. En la figura 1, los defectos por millón están representados por el área que queda fuera de los límites. Al despejar de la ecuación de σ Capacidad :

$$\text{DPM} = 3.4$$

Es decir, para un nivel de capacidad de proceso de 6 sigmas, se espera una cantidad de 3,4 defectos por millón de eventos, lo cual nos muestra el nivel de mejora que se puede tener en los procesos analizados si se logra una meta como la propuesta por la metodología a aplicar en este trabajo.

7.15.1. Zonas de impacto de Seis Sigma

Básicamente se puede decir que Seis Sigma abarca tres sectores: los clientes, la cultura de la organización y la capacidad de los procesos. Recalca la aplicación de herramientas estadísticas y métodos para realizar proyectos que tengan como resultado mejoras dramáticas, medibles y de alto impacto a la organización. Existen varios métodos para desarrollar proyectos seis sigma, aunque estos básicamente tienen las mismas tareas a desarrollar.

7.15.2. DMAIC

Este es uno de los métodos más utilizados para el desarrollo de proyectos de Seis Sigma. El nombre de este método representa las siglas de: definir, medir, analizar, implementar, mejorar y controlar. Para su aplicación en la planta de cal, se tomará el modelo presentado por Evans (2008), que se resume a continuación.

7.15.2.1. Definir

Esta es una de las etapas más importantes, debido a que con una clara definición el desarrollo del proyecto, este irá en buena dirección y se logrará alcanzar los objetivos y metas. En esta parte del proyecto deberá quedar especificado el problema en términos operativos, es decir, claramente definido con métricas específicas de manera que no haya dudas o ambigüedades en los pasos subsiguientes, Evans le denomina a esto definir el alcance del proyecto.

Para Evans también se deben identificar los clientes y sus necesidades, así como las características críticas del producto, que son el punto de partida para entender el desempeño actual, y poder calcular los beneficios del proyecto al resolver el problema.

Otra parte importante de la definición del proyecto es la formación del equipo del proyecto (Allen, 2006).

7.15.2.2. Medir

Seis sigma se ha caracterizado de otras técnicas por su base en las mediciones, ya considera importante las mediciones por las siguientes razones:

- La percepción y la intuición no siempre es el reflejo real de las cosas.
- Se deben entender los procesos para conocerlos y poder identificar donde están las áreas de oportunidad; así mismo determinar si el proceso es estable o predecible y la variación del mismo, además sirve para saber el desempeño.
- Para conocer al cliente y entenderlo, para saber si está satisfecho con el producto o no.
- Para poder documentar y comprobar la mejora.

En resumen, este es el proceso de descubrir la información relevante necesaria para identificar los problemas y poder resolverlos. Se basa en la definición de una función en la que ilustra la relación entre el proceso y el valor del cliente:

$$Y = f(X)$$

Donde Y es un parámetro crítico de calidad y X representa un conjunto de variables críticas que influyen en Y (Evans, 2008, pág. 511).

Esta relación ayuda a definir los experimentos que pueden ser necesarios para confirmar como las variables críticas afectan a las variables de salida.

7.15.2.3. Analizar

Como resultado de la etapa de medir, se generan datos del proceso, clientes, etc. Ahora estos se deben interpretar para luego implementar una mejora. En esta etapa, el equipo debe enfocarse en definir porque ocurren los defectos, errores o la excesiva variación, es decir, se debe buscar definir las “causas origen” (Evans 2008, pág. 512). En esta etapa es donde se utiliza la estadística a fondo para lograr obtener conclusiones razonables y bien sustentadas.

7.15.2.4. Implementar mejora

En esta etapa se tiene un análisis de toda la información, ya se ha llegado a conocer mejor el proceso, los clientes, etc. Se conoce bien el problema y sus causas, entonces ya se tienen ideas de que hacer para mejorar; sin embargo, se debe recordar que no se puede confiar en la intuición o percepción, se debe probar si son correctas y producirán un resultado que solucione el problema.

Esta es una etapa en la que se necesita de la creatividad del equipo ya que algunas soluciones no serán obvias, por lo que en algunos casos será necesario el uso de herramientas adecuadas para el trabajo en equipo y buscar obtener todas las recomendaciones posibles, antes de pasar a una evaluación de las mismas para seleccionar las que tengan mayor posibilidad de éxito. Como se mencionó anteriormente, esta etapa debe incluir la prueba de la solución propuesta y la confirmación y medición o cuantificación de su impacto positivo sobre los parámetros críticos de calidad (Evans, 2008, pág. 513).

7.15.2.5. Controlar

Para asegurar que el proyecto generará los beneficios estimados a lo largo de un tiempo, es necesario controlar. En esta etapa se analiza y evalúa el desempeño actual y su relación con el desempeño inicial. Además esta es la etapa donde se cuantifican las ganancias en el largo plazo.

Su enfoque debe ser hacia la conservación de las mejoras implementando los cambios o herramientas que sean necesarios y que pueden incluir el establecimiento de normas y procedimientos nuevos, así como la capacitación del personal (Evans, 2008, pág. 514).

7.16. Herramientas para solución de problemas

Para los diferentes pasos de la metodología Seis Sigma, se recomienda el uso de diferentes herramientas para la solución de problemas. A continuación se describen las que se van a utilizar para la solución del problema propuesto en este trabajo de investigación.

7.16.1. Tormenta de ideas

Es utilizada para generar nuevas ideas o para mejorar el funcionamiento de un equipo. Debido a que cada equipo es diferente, una sesión de tormenta de ideas debe ser flexible. A continuación se presenta un procedimiento para llevar a cabo una tormenta de ideas que se basó en el presentado en *Implementing Six Sigma* (Breyfogle 1999), y se adaptó según la experiencia en el uso de la herramienta en otras oportunidades dentro de la planta de cal:

- Se recomienda que el facilitador o líder de la reunión haya tenido experiencia previa en la conducción de reuniones de lluvia de ideas.
- De preferencia se debe tener un cuarto apartado para la reunión, y el mobiliario debe ser colocado de manera que se favorezca la discusión
- El problema a discutir debe ser escrito de manera que todos lo puedan ver, y debe ser escrito de manera simple.
- El moderador deberá indicar a los participantes que no se permite juzgar ideas propuestas, a la vez que debe promover la generación de ideas.
- En cada ronda, cada participante debe proponer una idea, este proceso continúe hasta que ya nadie tiene ideas que proponer. Se debe tener a una persona que documente todas las ideas y que pueda recopilarlas por conceptos.
- Durante la sesión se puede permitir un ambiente relajado pero con respeto.
- Se debe promover todo tipo de ideas, el proponer ideas poco ortodoxas motiva a otros a proponer otras ideas.
- El moderador se debe preocupar por la cantidad de ideas en este paso, no por la calidad.
- Puede buscarse reunir ideas similares o una combinación de varias ideas en una sola. Se pueden modificar según las sugerencias de otros.
- Posteriormente se deberá ordenar las ideas y agruparlas según categorías.
- Se debe correr una votación para identificar las ideas que se crea generan mayor valor.
- Antes de la votación se puede generar una discusión sobre algunas ideas que necesiten clarificación.
- Las ideas con mayores votos son realizadas. Se deben analizar y reagrupar para combinarlas y se puede hacer otra ronda de votación para determinar la idea prevaleciente.

Dependiendo del ánimo o duración de la sesión, se puede dividir en dos fechas.

7.16.2. Diagrama de Ishikawa

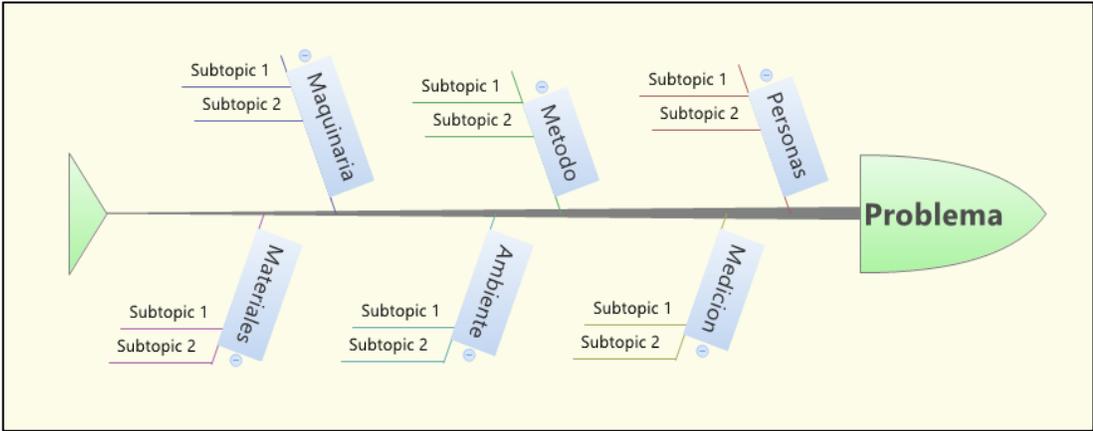
Propuesto inicialmente por Karoru Ishikawa, es una técnica usada para recopilar de manera ordenada y categorizada en una reunión de lluvia de ideas, la percepción de los miembros de un equipo sobre las posibles causas de un problema determinado. Breyfogle (1999) indica que se recomienda considerar seis áreas para categorizar las posibles causas: materiales, maquinaria, métodos, personal, medición y ambiente, para facilitar y ordenar las causas propuestas en el equipo.

Al realizar una reunión de lluvia de ideas, el diagrama ayuda al coordinador de la reunión del equipo, a presentar de manera fácil y ordenada las posibles causas identificadas por el equipo de un problema determinado. Después de esta recopilación inicial de causas probables, se debe hacer una selección de las principales causas a confirmar por medio de un acuerdo con el equipo para definir los siguientes a realizar para solucionar el problema desde su causa raíz.

Algunas actividades servirán para confirmar o desechar algunas de las causas identificadas, lo que ayudará a enfocarse cada vez más en la solución definitiva del problema.

Un diagrama usual del diagrama de Ishikawa es mostrado en la figura 3, donde puede apreciarse porque se le conoce también como diagrama de pescado.

Figura 3. Diagrama de pescado



Fuente: <http://www.xmind.net/>.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. DIAGNÓSTICO Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA PLANTA DE MOLIENDA DE CAL VIVA

2. MARCO TEÓRICO
 - 2.1. Cal viva
 - 2.2. Cal hidratada
 - 2.3. Uso de la cal viva y su importancia en la industria
 - 2.4. Propiedades físicas y químicas de la cal viva
 - 2.5. Proceso de calcinación
 - 2.6. Fabricación de la cal viva
 - 2.7. Factores que afectan la calidad de la cal viva
 - 2.8. Proceso de molienda
 - 2.9. Circuito abierto de molienda
 - 2.10. Circuito cerrado de molienda
 - 2.11. Separadores de partículas
 - 2.12. Muestreo y análisis de la cal viva

- 2.13. Filosofías de calidad
 - 2.13.1. Filosofía de Demming
 - 2.13.2. Filosofía de Juran
 - 2.13.3. Filosofía de Kaoru Ishikawa
- 2.14. Historia de Seis Sigma
- 2.15. Definición de Seis Sigma
 - 2.15.1. Zonas de impacto de Seis Sigma
 - 2.15.2. DMAIC
- 2.16. Herramientas para solución de problemas
 - 2.16.1. Tormenta de ideas
 - 2.16.2. Diagrama de Ishikawa

3. SITUACIÓN PROPUESTA

4. APLICACIÓN DE SEIS SIGMA

- 4.1. Definir
 - 4.1.1. Cal disponible
 - 4.1.2. Equipo de trabajo
 - 4.1.3. Recursos
- 4.2. Medir
 - 4.2.1. Cal disponible en despachos
 - 4.2.2. Cal disponible en producción
- 4.3. Analizar
 - 4.3.1. Análisis de correlación entre la cal disponible en despachos y la cal disponible en producción
 - 4.3.2. Análisis de correlación de la cal disponible con el tiempo de almacenamiento
 - 4.3.3. Recomendaciones de mejora
- 4.4. Implementar mejora

- 4.4.1. Plan de implementación
- 4.4.2. Medición posterior a la mejora
- 4.5. Controlar
 - 4.5.1. Definición de controles

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

Por medio de un estudio correlacional se buscará encontrar las diferencias entre los datos de cal disponible de despachos y producción, tratando de confirmar si pertenecen a una misma población de datos o si son dos poblaciones diferentes.

Entendiendo por la descripción del proceso, que la principal variable que puede diferenciar a ambas poblaciones de datos es, el tiempo de fabricación y el de despacho, o sea, el tiempo de almacenamiento, de confirmarse la diferencia entre ambas poblaciones de datos, se realizará un estudio correlacional que busque encontrar la influencia del tiempo de almacenamiento en el valor de cal disponible en la muestra tomada en despachos.

Esta relación encontrada ayudará a definir el tiempo de almacenamiento recomendado para evitar la degradación del producto (disminución de su valor de cal disponible), por lo que se podrá programar la fabricación del producto cumpliendo con las especificaciones pactadas con el cliente.

9.2. Diseño de la investigación

El estudio que se plantea es una investigación cuantitativa ya que se buscará describir en base a relaciones las causas de la diferencia en la medición de una misma variable en dos puntos diferentes de la planta de fabricación de cal.

No solo se analizarán las relaciones entre ambas variables, sino que se buscará determinar si existe una relación entre la cal disponible medida en despachos y el tiempo de almacenamiento. Además se realizarán cálculos estadísticos buscando comparar las poblaciones de resultados en ambos puntos de la planta y poder determinar si pertenecen al mismo universo o son poblaciones diferentes.

9.3. Variables e indicadores

Las variables e indicadores definidos para la investigación son las siguientes:

Tabla II. **Variables e indicadores**

Variable	Tipo de variable	Indicador	Unidades
Variable dependiente: reactividad de la cal viva molienda en despachos	Contínuo	Cal disponible	%
Variable independiente: reactividad de la cal viva molida en producción	Contínuo	Cal disponible	%
Variable independiente: tiempo de almacenamiento por <i>batch</i>	Contínuo	Tiempo	Horas

Fuente: elaboración propia.

9.3.1. Operacionalización de las variables

A continuación se presenta la definición de las variables a utilizar para este trabajo de investigación, la cal disponible que es la dependiente que define

la reactividad de la cal viva, y el tiempo de almacenamiento previo al despacho que representa la variable independiente.

9.3.1.1. Cal disponible

Es una variable importante para la industria que utiliza cal viva como materia prima ya que indica indirectamente el grado de reactividad de la misma y por lo tanto, el aprovechamiento de la misma en el proceso donde se utilizará. Los valores más cercanos al 100 % son indicadores de la más alta reactividad. Su valor se ve influenciado por los niveles de impurezas presentes en la materia prima utilizada para su fabricación, es decir, por las impurezas contenidas en la caliza y el combustible.

Los niveles de cal disponible requeridos en la cal viva por las diferentes industrias oscilan entre un 80 % y un 90 %. Valores de cal disponible por debajo de 80 %, indican una alta cantidad de impurezas que se convierten en desperdicio que debe ser limpiado de los procesos donde se utilice, por lo que una cal con este nivel de cal disponible no es atractiva para la industria. Contadas excepciones se encuentran donde se aceptan valores bajos de cal disponible, donde los beneficios de su uso son mayores que los problemas de utilizarlo como materia prima, como su costo o su disponibilidad en un mercado cercano.

Su medición se realiza en un laboratorio químico según el estándar norteamericano ASTM (C25, 1999).

9.3.1.2. Tiempo de almacenamiento

Debido a la propensión natural de la cal viva de recarbonatarse, una de las probables causas por las cuales puede variar la cal disponible en despachos, es el tiempo en el que el material permanece almacenado previo a su despacho. Este tiempo de almacenamiento es variable y depende de la programación de producción y la disponibilidad de materia prima para la fabricación. Puede ser corto cuando se despacha justo al terminar su fabricación o tan largo como 7 días.

9.4. Plan de muestreo

Las muestras obtenidas durante la producción de la cal viva molida, son puntuales, tomadas cada dos horas de operación del molino. Se obtiene con un muestreador manual en un punto donde se corta la corriente del producto de manera que se obtenga una muestra representativa, además de tomar la cantidad necesaria para su homogenización en el laboratorio químico, previo a obtener la cantidad requerida para su análisis. Lo normal es tener cuatro muestras para un lote de producción.

El lote de producción se almacena en la tolva 22-613-TL5 hasta su despacho. Durante el despacho, se toman dos muestras puntuales con un muestreador manual, con las cuales se prepara una muestra compuesta del lote despachado, con la cantidad necesaria para su homogenización en el laboratorio químico, previo a obtener la cantidad requerida para su análisis.

9.5. Metodología

- Fase 1: recopilación de información

Para registrar los datos se utilizará la tabla I, de este documento. En el caso de la producción de cal viva molida, se registrará la fecha y hora en la que se tomó cada muestra puntual. En el caso del despacho, se registrará la fecha y hora en la que se tomó la muestra compuesta. En ambos casos, se registrará el valor de cal disponible medido por el laboratorio para cada muestra analizada. Se anota en la tabla para cada lote fabricado, habrá un máximo de cuatro valores de cal disponible de las muestras del material producido, y un valor de cal disponible de la muestra tomada durante su despacho.

El registro se hará manualmente por los operadores de control de cal y los encargados de despacho a granel de cal. Para su análisis posterior, se registraran los valores en una hoja de Excel. Dentro del análisis de la información se revisará la capacidad del proceso en ambos departamentos utilizando la herramienta pública Excel, determinando los puntos fuera de control y buscar las causas asignables para hacer el análisis de la información de los puntos que estén dentro de control.

- Fase 2: análisis de datos, esta fase se divide en dos partes, las cuales se desglosan a continuación.

- Fase 2.1

Para determinar si las dos poblaciones de datos pertenecen a un mismo universo, se hará una comparación de medias de cada una. Para esto, se tiene el número de datos de cada población, se calcula la media de la cal disponible de cada una y su desviación estándar, se buscará confirmar si son equivalentes a las medias del mismo universo de datos, es decir, si la diferencia de las medias del universo de cada población es cero.

Con estos datos se puede utilizar la siguiente fórmula (Montgomery, 2003):

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

En donde:

\bar{X}_i = media de la población i

μ_i = media del universo i

σ_i = desviación estándar de la población i

n_i = número de datos de la población i

Con esta fórmula se obtiene el valor de Z equivalente para una población normal, por lo que se podrá comparar contra el valor de referencia según el grado de significancia que se desee en el análisis. En el caso de que se desee un grado de significancia de 0,05, el valor Z a comparar sería 1,645.

- Fase 2.2

Será importante determinar cómo se ve afectado el valor de cal disponible por el tiempo en el que un lote se despacha posterior a su fabricación. Para esto, se agruparán los valores de cal disponible de mismos lotes según el tiempo transcurrido entre su fabricación y su despacho, agrupándose en las siguientes clases de frecuencias:

- Entre 1 y 2 horas
- Entre 2 y 4 horas
- Entre 4 y 8 horas
- Entre 8 y 24 horas
- Más de 24 horas

Cada clase de frecuencia será una nueva población de datos, a los cuales se les deberá realizar la misma prueba de comparación de medias. Se espera confirmar que a medida que disminuya el tiempo de almacenamiento, la prueba de medias será positiva, es decir, se confirmaría que ambas poblaciones pertenecen al mismo universo. De ser este el caso, también se esperaría que haya un tiempo de almacenamiento a partir del cual ya no pertenezcan al mismo universo, tiempo que ya no sería recomendable almacenar el producto, siendo recomendable mantenerse en el tiempo anterior donde aún se mantenían como pertenecientes al mismo universo.

Si la confirmación de las medias de la población es independiente del tiempo, es decir, se confirma que ambas poblaciones pertenecen al mismo universo a tiempos de almacenamiento mayores, se podrá concluir que no hay dependencia del tiempo en la diferencia encontrada en la cal disponible medida en producción y despacho.

- Fase 3: análisis de correlación

Este análisis se llevará a cabo si se encuentra que existe una diferencia entre las poblaciones analizadas en la fase 2.2, es decir, se confirma una degradación de la cal disponible conforme varía el tiempo de almacenamiento. La correlación entre la cal disponible y el tiempo se buscará con el apoyo de Excel de manera que se encuentre el tipo de correlación que reporte el mayor coeficiente posible de entre los tipos de correlación con que cuenta el programa de Excel.

- Fase 4: procedimiento para aplicación del método Seis Sigma al proceso de producción de cal viva molida

Determinada la información necesaria para el análisis de los datos, se deberá de aplicar el método DMAIC para dejar establecido el procedimiento recomendado para mejorar el proceso de producción de cal viva molida en busca del cumplimiento de los requisitos del cliente, no solo definiendo las metas del proyecto, el equipo de gente involucrado, sino también identificando las etapas del proceso a mejorar.

10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ID	Task Name	Duration	Start	Finish	Prev	April	May	June	July	August	Septemb
						Apr	May	June	July	August	Sep
1	Cronograma de Tesis	81 days	Fri 16/05/14	Fri 06/09/14							
2	Fase I: Recopilacion de informacion	20 days	Fri 16/05/14	Thu 12/06/14							
3	Revisión resultados cal disponible entre 15/11/12 y 17/05/14	7 days	Fri 16/05/14	Mon 26/05/14							
4	Analizar datos fuera de control	7 days	Tue 27/05/14	Wed 04/06/14	3						
5	Organizar la información por departamento y por batch	3 days	Thu 05/06/14	Mon 09/06/14	4						
6	Calcular el tiempo de almacenamiento de cada batch	3 days	Tue 10/06/14	Thu 12/06/14	5						
7											
8	Fase II: Analisis de informacion	10 days	Tue 10/06/14	Mon 23/06/14							
9	Analizar tendencias de los datos en despachos en relacion a los datos en produccion	7 days	Tue 10/06/14	Wed 18/06/14	5						
10	Confirmar si ambas poblaciones son parte del mismo universo	3 days	Thu 19/06/14	Mon 23/06/14	9						
11	Confirmar relacion entre tiempo de almacenamiento y cal disponible en despachos	3 days	Fri 13/06/14	Tue 17/06/14	0						
12											
13	Fase III: Analisis de correlacion	10 days	Thu 19/06/14	Wed 02/07/14							
14	Establecer la relacion entre los resultados en ambos puntos de muestreo	7 days	Thu 19/06/14	Fri 27/06/14	9						
15	Conclusiones y Recomendaciones del analisis	3 days	Mon 30/06/14	Wed 02/07/14	14						
16											
17	Fase IV: Procedimiento de aplicacion de Sais Sigma al proceso de molienda de cal viva	47 days	Thu 03/07/14	Fri 05/09/14							
18	Definición del proyecto, incluyendo metas y equipo	7 days	Thu 03/07/14	Fri 11/07/14	15						
19	Determinar la situación actual, requisitos del cliente y grado de cumplimiento	14 days	Mon 14/07/14	Thu 31/07/14	18						
20	Determinar el diagrama del proceso	4 days	Fri 01/08/14	Wed 06/08/14	19						
21	Analizar datos del proceso y causas de desviaciones	14 days	Thu 07/08/14	Tue 26/08/14	20						
22	Determinar plan de acción recomendado	4 days	Wed 27/08/14	Mon 01/09/14	21						
23	Definir proceso de mejora continua	4 days	Tue 02/09/14	Fri 05/09/14	22						

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Debido a que la presente investigación se realizará en el área de trabajo del investigador, se cuenta con acceso a toda la información relevante para la ejecución de la misma. Otros recursos como sistemas de información y aplicaciones de computadoras personales son herramientas con las cuales se desempeña el trabajo diario dentro de esta planta, por lo que no hay restricción en su uso.

Debido a que la información del estudio ya fue recopilada en las bases de datos del laboratorio químico de la empresa, así como los análisis y muestreos que se usarán para ampliar la información ya recabada serán los incluidos dentro del control de calidad ya definido y operando de la planta de cal, no habrá un gasto extra a cubrir. No hay necesidad de realizar análisis fuera del control de calidad regular de la planta, ni tampoco en el uso de recurso humano calificado para el muestreo, preparación y análisis de las muestras, por la misma razón.

Los gastos de papelería y tiempo para la realización de este trabajo de investigación, correrán por cuenta del investigador. En cuanto a los gastos por traslados, no se tomarán en cuenta, ya que la investigación se realizará en lugar de trabajo del investigador, por lo que no se incurrirá en gastos fuera del presupuesto normal del investigador.

Tabla III. **Presupuesto de la investigación**

Descripción	Unidad	Costo unitario (Q)	Unidades	Costo total (Q)
Toma de muestras				
• Recipientes	U	25,00	6	150,00
• Colectores manuales de muestra	U	225,00	2	450,00
Análisis de cal disponible				
• Reactivos	L	1 200,00	2	2 400,00
• HH hombre	hora	35,00	160	5 100,00
Materiales de oficina				
• Hojas	Resma	35,00	2	70,00
• Tinta	U	550,00	1	550,00
• Lápices y lapiceros	U	12,50	24	300,00
Pago asesoría				2 500,00
Imprevistos				2 00000
Total				13 520,00

Fuente: elaboración propia.

El presupuesto es razonablemente bajo comparado con los beneficios obtenidos al asegurar el cumplimiento de las especificaciones de un cliente en otro país. Por todo lo anterior, se concluye la factibilidad del estudio a realizar.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, T. T. (2006). *Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma*. London: Springer-Verlag.
2. Alvarado, A. M. (2010). *Aplicación de metodología Seis Sigma para mejorar la capacidad de proceso de la variable nivelación vertical en la aplicación de pintura (fondos) de una ensambladora de vehículos*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
3. Association, N. L. (s.f.). Recuperado el 22 de enero de 2014 de: http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/lime-essential-chemical.pdf.
4. Baziotis, I. (junio de 2011). Physico-chemical properties of different carbonate rocks: Are they highly enough to control lime reactivity? *International Journey of Chemistry*, 3(2). Obtenido de www.ccsenet.org/ijc.
5. Boynton, R. S. (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone* (2nd ed.) John Wiley & Sons.
6. Breitschmid, K. (1993). Sistemas de Molienda de Cemento. *Manual de Molinos para la Industria del Cemento, Parte C*.

7. Breyfogle, F. W. (1999). *Implementing Six Sigma, Smarter solutions using statistical methods*. John Wiley & sons, Inc.
8. BS5309, B. S. (1976). *Methods for sampling chemical products. Introduction and general principles*.
9. Bürki, M. (1995). Molinos Tubulares. *Manual de Molinos para la Industria del Cemento, Parte B*.
10. Calvillo, A. D. (2006). *Modelo para la implementación y aplicación de Seis Sigma, en base a una industria de acero*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Guatemala: Escuela de Mecánica Industrial.
11. C25, A. S. (1999). *Standard test methods for chemical analysis of limestone, quicklime, and hydrated lime*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. Obtenido de www.astm.org.
12. Evans, J. R. (2008). *Administración y control de la calidad (7ª. ed.)*. (F. S. Frago, Trad.) México, D. F.: Cengage Learning Editores, S. A. de C. V.
13. Fuentes Navarro, S. E. (octubre de 2006). Optimización del proceso de fabricación del azúcar blanca para mejorar la calidad en el Ingenio Santa Teresa, S. A. (USAC, Ed.) *Facultad de Ingeniería*.
14. Hassibi, M. (2013). */content/articles/archived-articles*. Recuperado el 13 de junio de 2013, de www.cheresources.com.

15. Juran, J. M. (1999). *Juran's Quality Handbook* (5th. ed.). USA: McGraw-Hill.
16. Larson, A. (2003). *Six Sigma Demystified*. New York, USA: Amacom.
17. Leon, M. d. (1990). Estudio del grado de conversión e caliza dolomítica comercial con alto grado de dolomitización a cal viva, a diferentes temperaturas y tiempos de procesamiento para una presión atmosférica de 640 mm. Hg. *Tesis, Facultad de Ingeniería, USAC*.
18. Lopez, V. (1996). Estudio del grado de conversión de caliza dolomítica con diferentes contenidos de carbonato de magnesio a cal viva mediante el procesamiento a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación. *Tesis, Facultad de Ingeniería, USAC*.
19. Medrano, S. D. (2008). *Aplicación del método Seis Sigma en la mejora del proceso de facturación en la agencia Morelia Norte de la comisión federal de electricidad*. Facultad de Contaduría y Ciencias Administrativas, División de Postgrado. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
20. Montgomery, D. C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (3ª. ed.). New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
21. Oates, J. A. (1998). *Lime and Limestone, Chemistry and Technology, Production and Uses*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

22. Reyes, M. E. (2013). *Diseño de la investigación de la metodología Seis Sigma en el proceso de Servicio al Cliente y la Gestión de desechos sólidos para mejorar la Productividad de una empresa de servicio técnico y venta de equipo eléctrico*. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
23. SAC, S. d. (02 de 09 de 2013). Plan de Calidad de la Fabricación de Cemento y Cal. doi:SAC-SM-UG-FO-11.
24. Zeller, W. (1995). Separadores. *Manual de Molinos para la Industria del Cemento*.