



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN**

**EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DEL
MEZCLADO EN UN PRODUCTO GRANULAR (SAL-ÁCIDO
CÍTRICO) DE USO ALIMENTARIO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

CONCEPCIÓN BEATRIZ ARGÜELLES OVIEDO

ASESOR: IA. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA

CUAUTILÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. EN C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Evaluación de las variables de operación del mezclado en un producto granular (sal-ácido-citríco) de uso alimentario

Que presenta la pasante: Concepción Beatriz Argüelles Oviedo
Con número de cuenta: 300291193 para obtener el Título de: Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 17 de febrero de 2014.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	IA. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
VOCAL	Dra. Elsa Gutiérrez Cortez	
SECRETARIO	Dra. María del Carmen Valderrama Bravo	
1er. SUPLENTE	M.N.H. Frida Rosalía Cornejo García	
2do. SUPLENTE	Dr. Omar Reyes Martínez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HHA/iac

DEDICATORIA

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”.

Albert Einstein

Para mis dos Familias Oviedo Cordova y Argüelles Zapata, por hacerme un ser humano integro que nunca ha dudado que la educación y responsabilidad, son de las armas más importantes en la vida y los cimientos que también les daré a mis hijos.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada a la vida por enseñarme que todo se puede aún poco a poquito y a Dios por llenar cada segundo de vida y cada respirar con esperanza, amor, asombro, alegría e ilusión.

A mis padres y abuelitos por ser un ejemplo de vida, por enseñarme que todo sueño se logra y que siempre estarán ahí cuando uno los necesite, además de agradecerles todo su apoyo en los momentos más hermosos hasta el momento y también en los más dolorosos que conlleva ser y vivir.

A mi hermana sé que siempre estas y estarás, siempre como la compañía y la amiga incondicional.

A mi ahora familia por hacerme ser un ser humano inmensamente feliz y capaz de entregar hasta lo impensable de amor, gracias Ximena e Ian por escogerme como mama y a mi compañero de vida Antonio por ser esa parte de paz y congruencia que tanto anhelaba.

Gracias a mi gran familia por hacerme una persona con valores y un espíritu libre, que con sus enseñanzas de cada platica y vivencia me hacen amar todos los roles del ser mujer.

A la UNAM, profesores y amigos que en este pequeño andar he disfrutado y de los cuales guardo grandes remembranzas.

RESUMEN

El mezclado es una operación manejada en todo proceso de transformación de un alimento sin embargo no se le ha dado la importancia debida; desde 1967 algunos investigadores dieron los primeros pasos en la investigación de los parámetros responsables (mecanismos de mezclado convectivo, corte y difusión) y características de las partículas, que afectan directamente en la dispersión de un material en el seno del otro hasta cubrir aspectos deseados para la formulación final u homogeneidad ideal de la mezcla. Debido a que los alimentos tienen características físicas y químicas únicas para cada materia prima, es aquí donde estas últimas adquieren una gran importancia en el resultado final de la mezcla. Debido a la importancia a nivel de conservación y sabor agregado al alimento se realizó el estudio de una mezcla de un producto granular de uso alimentario a base de sal y ácido cítrico, evaluando las condiciones de operación de mezclado de tiempo (2, 4, 6 min.), velocidad de rotación (109.40 y 115.59 rpm), diámetro de partícula (gruesos y finos) y consumo de energía del mezclador en el momento del mezclado. Se empleó un mezclador en V, este constó de un cuerpo móvil dividido en dos brazos de acero, accionado con un interruptor para su giro en 360° con una capacidad de carga para cada brazo de: 5195.42 cm³. Se determinó la humedad de los materiales obteniéndose valores más altos para el ácido cítrico (0.34%) en comparación de la sal (0.02%). El tamaño se evaluó por medio de tamizado y se obtuvieron los Sauter medios, 0.016 in para la sal que fue el material de mayor tamaño y 0.011 in para el ácido cítrico. Se separó el material como grueso y fino utilizando la malla 40; la forma de las partículas se determinó por microscopio siendo rectangular y pardusca el ácido cítrico y traslúcida y prismática la sal. La cohesividad se realizó por tolvas resultando más cohesivo el ácido cítrico. Para determinar la homogeneidad del material mezclado se utilizó el índice de mezclado (análisis del grado de uniformidad de la mezcla por medio del muestreo de las desviaciones de las composiciones de las muestras puntuales respecto a la media de la mezcla global) por medio de los datos de colorimetría a partir de ΔE y conductividad. Así mismo se evaluó el consumo de energía necesario para la mezcla. Los resultados mostraron que en la velocidad de 115.59 rpm, en los dos tamaños de partícula, existe un mezclado y desmezclado debido a que en minuto 2 el IM=0.91, posteriormente aumenta 0.70 veces en minuto 4 y en el minuto 6 decae en 0.041 veces el valor de IM final, este mismo comportamiento se observa en la velocidad de 109.40 rpm en los dos brazos. Se calculó el ΔE en las mezclas, existe un comportamiento de presencia no homogénea de ácido cítrico en las diferentes posiciones y los dos brazos. En la velocidad de 115.59 rpm los ΔE son cercanos a el valor medio ($\Delta E=25$), la velocidad de 109.40 rpm con finos, se obtuvieron los valores más altos de $\Delta E > 25$. Para el consumo de energía los gruesos son los que tienen resultados de consumo de energía menores (3.80kW/h) a velocidad de 109.40 rpm. En conclusión, para este tipo de materiales se recomienda el control de humedad relativa, preparación de la materia prima, velocidades bajas menores a 115.59 rpm, control en el momento de colocación del material en los diferentes brazos y utilización de partículas con diferencias poco significativas de tamaño y diámetro; con ello se obtendrá una mezcla homogénea en relación al componente minoritario.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	4
ÍNDICE	5
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	14
1.1. Materia prima	14
1.1.1. Ácido cítrico	14
1.1.1.1. Producción y consumo de ácido cítrico	16
1.1.2. Sal	19
1.1.2.1. Producción y consumo de sal	22
1.2. MEZCLADO DE SÓLIDOS	23
1.2.1. Teoría de mezclado de sólidos	23
1.2.2. Mecanismos presentes en el mezclado de polvos	25
1.2.3. Evaluación de eficiencia del mezclado	28
1.2.4. FENÓMENOS QUE EVITAN EL MEZCLADO DE SÓLIDOS	32
1.2.4.1. Segregación	32
1.2.4.2. Aglomeración	33
1.2.5. EQUIPOS DE MEZCLADO	34
1.2.5.1. Mezcladores de cintas	35
1.2.5.2. Mezcladores de tornillo interno	36
1.2.5.3. Volantes de impacto	37
1.2.5.4. Mezcladores de volteo	38
1.2.5.5. Características del mezclador en "V"	39
1.2.6. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS POLVOS	40
1.2.6.1. Cohesividad	40
1.2.6.2. Tamaño	40
1.2.6.3. Contenido de humedad	41
1.2.6.4. Diámetro	42
1.2.6.5. Forma	43
1.2.6.6. Conductividad	44
1.2.6.7. Colorimetría	48
1.2.6.8. Microscopía	50
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	52
2.1. Problema	52
2.2. Hipótesis	52
2.3. Objetivo general	53
2.4. Objetivo particular 1	53
2.5. Objetivo particular 2	53
2.6. Objetivo particular 3	53
2.7. CUADRO METODOLÓGICO	54
2.8. ACTIVIDADES PRELIMILARES	55
2.8.1. Volumen de llenado del mezclador V	55
2.8.2. Niveles de variación para la velocidad de rotación	55
2.8.3. Curva patrón para conductividad de sal	55
2.8.4. Patrón de colorimetría	57

2.9.	OBJETIVOS PARTICULARES	58
2.9.1.	Objetivo particular 1	58
2.9.2.	Objetivo particular 2	59
2.9.3.	Objetivo particular 3	61
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		67
3.1.1.	Volumen de llenado en el mezclador V	67
3.1.2.	Niveles de variación para la velocidad de rotación	67
3.1.3.	Curva patrón para conductividad de sal	68
3.1.4.	Patrón de colorimetría	70
3.2.	RESULTADOS DE OBJETIVOS PARTICULARES	71
3.2.1.	RESULTADOS DEL OBJETIVO PARTICULAR 1	71
3.2.2.	RESULTADOS DE OBJETIVO PARTICULAR 2	72
3.2.2.1.	Humedad sal y ácido cítrico	72
3.2.2.2.	Tamaño sal y ácido cítrico	72
3.2.2.3.	Diámetro Sauter medio de sal y ácido cítrico	73
3.2.2.4.	Forma de sal y ácido cítrico	75
3.2.2.5.	Cohesividad de sal y ácido cítrico	75
3.2.3.	RESULTADOS DEL OBJETIVO PARTICULAR 3	76
3.2.3.1.	Resultados de IM de mezcla sal/ácido cítrico	76
3.2.3.2.	Resultados para diferencia de color de la mezcla sal y ácido cítrico	81
3.2.3.3.	Resultados consumo de energía en el mezclado de sal y ácido cítrico	85
CONCLUSIONES		87
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		89

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Características generales del ácido cítrico.	14
Tabla 2.	Usos del ácido cítrico en la industria alimentaria.	18
Tabla 3.	Producción mundial de sal 2011.	23
Tabla 4.	Serie Tyler no rigurosa utilizada para el tamizado de sal.	58
Tabla 5.	Diámetros de tolvas de cristal para prueba de cohesividad.	60
Tabla 6.	Concentración de ácido cítrico de las muestras puntuales.	62
Tabla 7.	Resultados de calculo $(x_i - \bar{x})^2$	63
Tabla 8.	Diseño factorial de múltiples niveles utilizado para análisis estadístico por medio de programa Minitab 16 para datos de IM.	65
Tabla 9.	Diseño factorial de múltiples niveles utilizado para análisis estadístico por medio de programa Minitab 16 para datos de ΔE .	65
Tabla 10.	Diseño factorial de múltiples niveles utilizado para análisis estadístico por medio de programa Minitab 16 para datos de consumo de energía.	66
Tabla 11.	Valores promedio de 30 repeticiones de los 3 niveles de variación de velocidad para el mezclador en V.	67
Tabla 12.	Ecuaciones de la regresión lineal para cada ensayo del grafico de concentración de sal vs conductividad eléctrica de solución.	69
Tabla 13.	Resultados de prueba ANOVA aplicada a los datos de concentración de sal vs conductividad eléctrica de solución.	69
Tabla 14.	Valores promedio L^* , a^* y b^* , para sal sin ácido cítrico.	70
Tabla 15.	Valores de humedad por Termobalanza de materias primas.	72
Tabla 16.	Resultados de diámetro Sauter Medio para ácido cítrico y sal respectivamente.	74
Tabla 17.	Resultados de paso por diámetro de tolvas de cristal de sal y ácido cítrico.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Consumo de ácido cítrico por destino en área industrial.	17
Figura 2.	Curva de la cinética presente durante el mezclado de sólidos mostrando los mecanismos preponderantes en la operación.	28
Figura 3.	Mezclador de cintas.	36
Figura 4.	Mezclador de tornillo interno.	36
Figura 5.	Mezclador de impacto.	37
Figura 6.	Mezclador en "V".	39
Figura 7.	Puente de Whestatone para mediciones de resistencias.	46
Figura 8.	Espacio de color CIE L*a*b*.	49
Figura 9.	Imagen de tolvas utilizadas en prueba de fluidez de materias primas.	60
Figura 10.	Mezclador en "V" utilizado en experimentación.	61
Figura 11.	Bayoneta de muestreo.	62
Figura 12.	Gráfico de resultados de la concentración de sal vs conductividad.	68
Figura 13.	Gráfico diferencial D_{pi} vs x_i de sal.	71
Figura 14.	Curva comparativa de distribución diferencial de sal y ácido cítrico.	73
Figura 15.	Gráficos de los resultados calculados de Índice de Mezclado promedio.	77
Figura 16.	Resultados del análisis factorial para el IM de la mezcla de sal y ácido cítrico, en el efecto principal de las medias de velocidad, diámetro, brazo y tiempo.	79
Figura 17.	Resultados del análisis factorial para el IM de la mezcla de sal y ácido cítrico, en las interacciones de las variables de velocidad, diámetro, brazo y tiempo.	80
Figura 18.	Gráficos de resultados de ΔE a diferentes condiciones de operación del mezclado de sal-ácido cítrico.	82
Figura 19.	Resultados del análisis factorial para el ΔE de la mezcla de sal y ácido cítrico, en los efectos principales sobre la media de las variables de velocidad, diámetro, brazo, tiempo y posición.	84
Figura 20.	Gráficos de resultados de consumo de energía en mezclado de sal-ácido cítrico a diferentes condiciones de operación.	85
Figura 21.	Resultados del análisis factorial para el consumo de energía durante el mezclado de sal y ácido cítrico en un mezclador en V.	86

INTRODUCCIÓN

El mezclado de sólidos es aquella operación unitaria determinante, en el procesado de alimentos en la que, a partir de uno o más componentes, dispersando uno en el seno del otro, se obtiene un producto final más o menos uniforme (Perry, 1984; McCabe, 1995); en años posteriores Ruíz.(1986), estableció en sus trabajos que en un sistema de partículas pulverulentas existe una mezcla ordenada dada la naturaleza de los materiales utilizados ya que la propiedad de tamaño y cohesividad propias de las partículas favorecerán una adhesión de partículas finas a partículas más grandes por lo tanto en base a esta definición ahora una mezcla homogénea se forma cuando el peso de las partículas finas adheridas por unidad de área a las partículas más grandes es constante. Esta operación a pesar de ser muy frecuente en la industria, es quizás una de las operaciones unitarias menos estudiadas. El mezclado no tiene efecto conservador en los alimentos, es frecuente que las mezclas tengan que satisfacer los requerimientos legales acerca de la composición química final; además de utilizarse como ayuda en el proceso de elaboración para modificar comestibilidad, evitar interacciones químicas no deseadas o en la calidad de los alimentos (Brennan, 1980; Aguado, 2003).

Existen en la industria de alimentos diferentes ingredientes encargados de aumentar la vida útil del producto y modificar características propias del alimento; en este grupo se tiene a la sal desde los inicios de las grandes civilizaciones en Europa y Asia, inclusive se denominó a una ruta comercial con su nombre debido a su importancia alcanzada y uso como moneda de cambio; su uso fue como agente conservador del alimento utilizándolo principalmente para salmueras y de uso común para mejorar el sabor del alimento, (Laszlo, 2001). En la actualidad su importancia aún es significativa teniendo una producción de 81, 510, 000 Ton/año (FDA, 2011b) a nivel mundial siendo la Unión Europea el principal productor. Sin embargo, a pesar de su disminución de consumo por la población a nivel mundial sigue siendo uno de los aditivos más utilizados en alimentos procesados.

Otro de los aditivos utilizados en los alimentos como antioxidante, regulador de pH, acidulante, etc., es el ácido cítrico siendo el primer ácido tricarboxílico

presente en frutos cítricos; este fue el primer ácido aislado sintéticamente en 1860 y en 1893 por cultivos de *Penicillium* a partir de sacarosa molecular; sin embargo hasta la primera guerra mundial tuvo su auge industrial (FDA, 2012a). Debido a la importancia de la industria de bebidas este ácido juega un papel muy importante de comercialización y producción a nivel mundial, actualmente representa un mercado de 750,000 Ton/año, siendo México el país con el mayor consumo de tales bebidas y su utilización en diferentes productos alimenticios. Es por esto que su estudio es de sumo interés.

La mezcla de sólidos se inicia con las partículas en estado de equilibrio espacial bajo solo la fuerza de gravedad, consecuentemente se tiene una expansión de la cama del sólido, bajo diferentes fuerzas, provocando un movimiento interparticular. La conducta dinámica de las partículas durante el mezclado tiene lugar mediante tres tipos de mecanismos: transporte de producto o grupo de partículas de un punto a otro (convección), movimiento aleatorio de partículas individuales (difusión) y mediante cizallamiento o corte, dentro del equipo (Hiroaki, 2006).

Los equipos utilizados para esta operación, son muy variados, son recipientes dentro de los cuales se colocan los polvos, sujetos a una acción mecánica generada por un motor y con un mecanismo de descarga ya sea mecánico o neumático, en la actualidad debido a las normatividades de procesos inocuos deben estar estructurados de acero inoxidable o materiales aceptados por las normas existentes para la región. Las características del equipo que intervienen en el mezclado final, son la geometría, dimensiones, formas de agitadores, dimensiones y formación de los accesos, terminación de las superficies, etc. Dentro de los más importantes se tienen, los mezcladores de cintas, mezcladores de tornillo interno, volantes de impacto y mezcladores de volteo; en esta última categoría, en la industria el equipo más utilizado para mezclas finas de polvos con eficiencias altas es el mezclador en "V" o de doble cono, este gira alrededor de un eje horizontal, con una velocidad alcanzada de hasta 100 rpm, formado por dos cilindros unidos en V, se cierra y los sólidos se voltean durante 5-20 minutos, este equipo está caracterizado por la FDA como un mezclador de tipo difusivo (McCabe, 1995; Lemieux, 2007).

La fuerza de las interacciones mecánicas y químicas de las partículas que interactúan dentro del equipo para un mezclado de las mismas, depende de la composición, humedad, características mecánicas de superficie, historia de la partícula, tamaño, cohesividad y forma además de la manera en la cual la geometría de las partículas interactúa para la formación de estructuras estables (Lindley, 1991; Juliano, 2006).

Como consecuencia del movimiento de las partículas y sus características de tamaño y cohesividad, puede producirse el fenómeno de segregación (mezcla y desmezclado tienen lugar simultáneamente) (Aguado, 2003). Bodhisattwa y col. (2006) establecieron que a mayor cohesividad en un material pulverulento existirán menores valores de homogeneidad en la mezcla, ya que independientemente del tamaño de partícula existente la cohesión propia del material creará enlaces químicos que delimitarán el resultado de la operación. Apoyando lo anterior los trabajos anteriores de Bridawater y Bagster fueron, los pioneros en identificar los parámetros dominantes responsables, concluyeron que el tamaño de las partículas es el parámetro con mayor dominancia para la presencia de éste fenómeno en la mezcla; aunado con las investigaciones descritas se ha dado una mayor importancia a las condiciones de vibración por el equipo, densidad y forma (Lindley, 1991; Anjani, 2009; Roskilly, 2010). El fenómeno de aglomeración (fuerzas de atracción inter partculares son suficientemente poderosas entre sí para que las partículas individuales se reagrupen), también está definido por las características de las materias primas, Rondet y col. (2010) establecieron el contenido de agua presente en la mezcla como la principal causante de la formación de conglomerados; además de reportar el tiempo de mezclado, velocidad de mezclado, tipo de mezclador y nivel de llenado como posibles variables en el efecto del fenómeno de aglomeración (Roskilly, 2010).

El grado de uniformidad final de la mezcla depende del equilibrio alcanzado entre los mecanismos que favorecen o dificultan el mezclado, que depende a su vez del tipo de mezcladora, de las condiciones durante su funcionamiento y de la composición de los alimentos (Aguado, 2003). Para su evaluación, se realiza el análisis de un número de muestras puntuales de cada brazo (en el caso del

mezclador en V), simultáneamente en tiempo y velocidad establecidos, posteriormente se calculan las proporciones de cada componente de la mezcla posteriormente con los resultados obtenidos se obtiene la desviación estándar de los ensayos realizados de la mezcla a estudiar; se realiza el cálculo por medio de modelos matemáticos establecidos por diferentes trabajos empíricos (utilizando datos de mezcla ideal y mezclado cero) (Lemieux, 2007). Este cálculo se denomina Índice de Mezclado (IM) y es considerado una medida confiable del comportamiento de la mezcla de los componentes; se ocupan diferentes ecuaciones de IM, para la utilización de cada una, es necesario considerar el equipo utilizado y las condiciones de operación utilizadas en la medición, un valor cercano a 1 de IM indica una buena mezcla, complementado con los tiempos requeridos y la carga de energía necesaria para la obtención de una mezcla homogénea (Hiroaki, 2006).

En la industria de alimentos se utilizan diferentes técnicas de valoración de la calidad de mezclado final, para este fin se ocupan diversos métodos que ayudan a detectar los porcentajes a los cuales llegan las partículas después de las condiciones establecidas de mezclado y que en muchas ocasiones deben de cumplir con normativas y cantidad de ingredientes para un fin deseado (sabor, propiedades de textura, antimicrobianas, etc.), al final del proceso industrial, estas técnicas están basadas en características químicas como lo es el grado de conductividad eléctrica debida a la salinidad de una solución, en esta se utiliza un equipo generador de corriente alterna en una celda que mide los cambios en la corriente debido a la diferencia en la concentración de solutos y técnicas metodológicas en base a características físicas como lo es el color para tal evaluación se utilizan equipos basados en métodos colorimétricos que se ocupan de la medición de coordenadas de color físico (L^*, a^*, b^*), comparando la diferencia de color (ΔE) establecida en base a un patrón.

El mezclado es una operación unitaria que afecta a los procesos tecnológicos de alimentos debido a que influye directamente en la obtención de un producto final deseado con diferentes características tanto de textura (modificación de comestibilidad), vida de anaquel, costos de materias primas o requerimientos

sanitarios, ya que cada materia prima constituyente de un sistema alimenticio aportara diferentes características físicas y químicas que deben de compaginar para conformar una estructura única homogénea.

El conocimiento de los parámetros de tiempo de mezclado, velocidad de rotación y diámetro de partícula inicial, son de utilidad debido a que estas influyen directamente en la uniformidad final de la mezcla del alimento dentro del equipo de mezclado, en el área de alimentos es casi inexistente la investigación acerca de estas variables y operación, presente en todo proceso industrial en cualquier ramo de productos para consumo humano o animal, ya que se da por hecho que los componentes se mezclan en algún momento, no se verifica si tal operación tiene el grado de uniformidad o proporción de ingrediente inmerso en el sistema deseado para cada producto. Sin embargo la interacción que se da y mecanismos presentes deben de tomar la importancia debida ya que el estudio adecuado en esta operación significa un ahorro importante, en costos tanto de materiales, tiempos hombre y energéticos para el proceso. Por esa razón este trabajo realizó el estudio de las variables de operación durante el mezclado de una mezcla de sal-ácido cítrico para la conservación de alimentos en estado pulveriento, tomando en cuenta su amplia utilidad en la industria actual de alimentos.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Materia prima

1.1.1. Ácido cítrico

El ácido cítrico es un ácido carboxílico presente en la naturaleza detectable a los sentidos por su olor acre desagradable, sabor agrío y picante; es uno de los aditivos más utilizados por la industria alimentaria. Se obtiene por fermentación de distintas materias primas, especialmente la melaza de caña de azúcar, está presente en los frutos cítricos (limón: 6-7%); este es soluble en agua debido a la formación de puentes de hidrógeno, ya que este ácido posee enlaces O-H ó N-H que son una forma de atracción fuerte entre moléculas y hacen que esta sustancia tenga puntos de ebullición altos en comparación con los compuestos (ejemplos: ácido acético y ácido fórmico) de peso molecular similar (Morrison, 1998).

El descubrimiento del ácido cítrico se atribuye al alquimista islámico Jabir Ibn Hayyan en el siglo octavo después de Cristo. Los eruditos medievales en Europa conocían la naturaleza ácida de los zumos de limón y de lima; tal conocimiento se registra en la enciclopedia *Speculum Majus*, en el siglo XIII, recopilado por Vincent de Beauvais. El ácido cítrico fue el primer ácido aislado en 1784 por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele, que lo cristalizó a partir del jugo de limón. La producción de ácido cítrico a nivel industrial comenzó en 1860, basado en la industria italiana de los cítricos.

En 1893, Wehmer descubrió que cultivos de *Penicillium* podían producir ácido cítrico a partir de la sacarosa molecular. Sin embargo, la producción microbiana del ácido cítrico no llegó a ser industrialmente importante hasta la primera guerra mundial que interrumpió las exportaciones italianas de limones. En 1917, el químico americano James Currie y Claudio Colán descubrieron que ciertos cultivos de *Aspergillus niger* podían ser productores eficientes de ácido cítrico, y Pfizer comenzó la producción a escala industrial usando esta técnica dos años más tarde (FDA, 2012a).

En el organismo humano el ácido cítrico ingerido se incorpora al metabolismo normal, degradándose totalmente y produciendo energía en una proporción comparable a los azúcares. Es perfectamente inocuo a cualquier dosis concebiblemente presente en un alimento.

Este ácido se agrega a los alimentos procesados como conservador, ya que retarda la descomposición del alimento inhibiendo o impidiendo el crecimiento de bacterias, hongos y otros microorganismos. También se utiliza como acidulante para reducción de pH, saborizante, promotor de reacciones de curado en los cárnicos, secuestrador, modificador de la viscosidad, coagulante de la leche, inhibidor de las reacciones de oscurecimiento, hidrolizante de la sacarosa y del almidón, promotor de la gelificación de las pectinas e inhibidor de la cristalización de la sacarosa (FDA, 2012a).

El ácido cítrico y sus sales se pueden emplear en prácticamente cualquier tipo de producto alimentario elaborado. El ácido cítrico es un componente esencial de la mayoría de las bebidas refrescantes, (excepto las de cola, que contienen ácido fosfórico) a las que confiere su acidez, del mismo modo que el que se encuentra presente en muchas frutas, produce la acidez de sus zumos, potenciando también el sabor a fruta. Con el mismo fin se utiliza en los caramelos, en pastelería, helados, etc. Es también un aditivo especialmente eficaz para evitar el oscurecimiento enzimático que se produce rápidamente en las superficies cortadas de algunas frutas y vegetales. También se utiliza en la elaboración de pan, conservas de pescado y crustáceos frescos y congelados entre otros alimentos. Los citratos sódico o potásico se utilizan como estabilizantes de la leche esterilizada o UHT (FDA, 2012a).

En la Tabla 1 se presentan las características generales del ácido cítrico.

Tabla 1. Características generales del ácido cítrico.

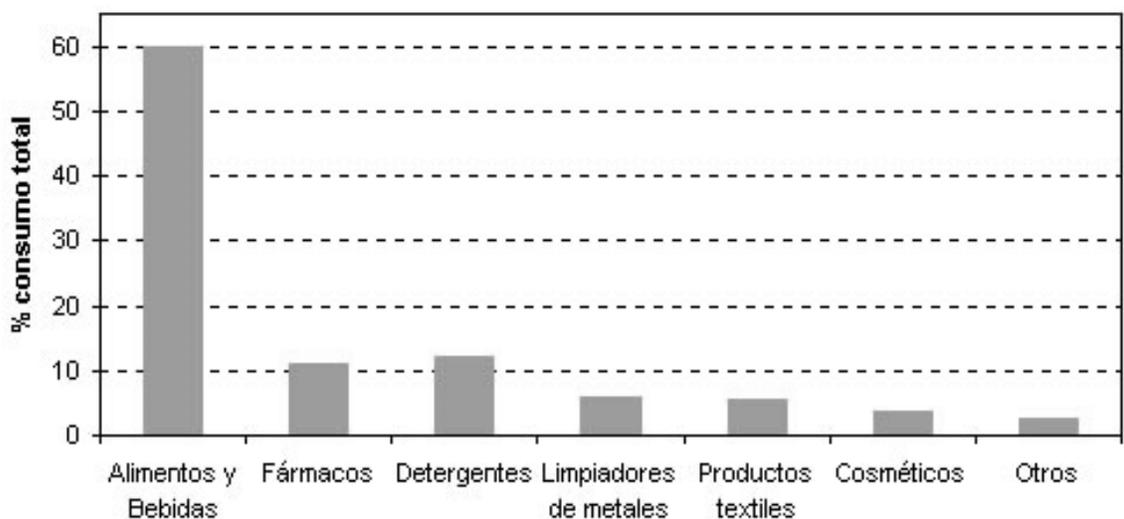
Formula	$C_6H_8O_7$
Peso molecular (g/mol)	192.13
Apariencia	cristales blancos
Sabor	sabor ácido
Olor	sin olor
Solubilidad (g/100 mL a 25 °C)	en agua : 162 en etanol: 59 en éter : 0.75
Punto de fusión:	153 °C

Fuente: www.fda.org.mx.com 2012a

1.1.1.1. Producción y consumo de ácido cítrico

La producción de ácido cítrico ha crecido notablemente en el presente siglo. En 1950, alcanzaba las 50,000 Ton/año. Posteriormente, se registró una importante expansión debido al desarrollo del proceso de fermentación sumergida, mucho más económico. En 2012, la capacidad instalada mundial fue de 750,000 Ton/año, con una producción real de 550,000 Ton/año. El ácido cítrico es un producto cambiario que se fabrica en más de 20 países. La Unión Europea, Estados Unidos y China reúnen el 88% del total mundial. China produce proporcionalmente menor volumen de ácido cítrico de alta calidad, es decir, purificado y refinado. Sin embargo, su capacidad de elaboración del producto crudo representa el 24% del total mundial. La Unión Europea incrementó su elaboración ubicándose primera en el catálogo mundial debido, fundamentalmente, a su uso como materia prima para la fabricación de detergentes biodegradables. Se estima que la demanda de Estados Unidos, en el último quinquenio, creció según una tasa cercana al 7% anual. Este crecimiento se relaciona con la expansión de la industria de alimentos y bebidas (FDA, 2012a).

En la Figura 1 se compara el consumo del ácido cítrico en diferentes áreas de la industria:



(www.alimentosargentinos.gov.ar, 2012)

Figura 1. Consumo de ácido cítrico por destino en área industrial.

Como se puede observar en la Figura 1 la industria de alimentos y bebidas tiene la mayor utilización del ácido cítrico, este uso es justificado probablemente a que esta materia prima ha sido útil en épocas antiguas y aún modernas; por lo tanto ha ido evolucionando con los diferentes procesos utilizados para el alargamiento de vida de anaquel, en la Tabla 2 se describen algunos usos en la industria alimentaria. En la industria de los detergentes se ha implementado en procesos actuales como agente biodegradable para el ambiente.

Tabla 2. Usos del ácido cítrico en la industria alimentaria.

Sector	Uso
Bebidas	Saborizante y regulador del pH; incrementa la efectividad de los conservantes antimicrobianos
Dulces y Conservas	Acidulante y regulador del pH para lograr una óptima gelificación
Caramelos	Acidulante y regulador del pH con el objetivo de alcanzar la máxima dureza de los geles
Verduras Procesadas	En combinación con ácido ascórbico, previene la oxidación
Alimentos Congelados	Ayuda a la acción de los antioxidantes; inactiva enzimas previniendo pardeamientos indeseables; inhibe el deterioro del sabor y el color
Frutas y Hortalizas Enlatadas	Disminuye el pH; al actuar como quelante, previene la oxidación enzimática y la degradación del color, resalta el sabor.
Aceites y Grasas	Previene la oxidación
Confitería y Repostería	Se utiliza como acidulante, resaltador de sabores y para optimizar las características de los geles
Quesos Pasteurizados y Procesados	En forma de sal, como emulsificante y texturizante
Lácteos	Estabilizante en cremas batidas
Productos de la Pesca	Para bajar el pH en presencia de otros conservantes o antioxidantes
Carnes	Se utiliza como auxiliar del procesado y modificador de textura

Fuente: www.fda.org.mx.com, 2012a

Como se observa en la Tabla 2, los usos que se dan al ácido cítrico abarcan a todas las ramas de productos que integran la industria de alimentos para cumplir con condiciones de inocuidad y legislaciones presentes en lugares de producción y consumo.

1.1.2. Sal

La sal común, corresponde a la sal denominada cloruro sódico (o cloruro de sodio), cuya fórmula química es NaCl. Existen cuatro tipos de sal, según su procedencia: la sal marina y la de manantial, que se obtienen por evaporación, la sal gema que procede de la extracción minera de una roca mineral denominada halita y la sal vegetal que se obtiene por concentración, al hervir una planta gramínea que crece en el desierto de Kalahari (Brisay, 1975).

Es un soluto con bajo peso molecular, este es seleccionado según sus características de solubilidad, eficiencia, sabor, compatibilidad, pH, costo y regulaciones; es utilizado para la disminución de la actividad de agua en un alimento y por consiguiente evitar la invasión de bacterias patógenas.

La sal es la única roca comestible por el hombre y es posiblemente el condimento más antiguo empleado por el ser humano, su importancia para la vida es tal que ha marcado el desarrollo de la historia en muchas ocasiones, moviendo las economías, siendo objeto de impuestos, monopolios, guerras, etc. (Toussaint-Samat, 1997; Laszlo, 2001) se ha llegado a considerar un tipo de moneda.

La ubicación de depósitos de sal tuvo especial relevancia en los emplazamientos definitivos de los asentamientos humanos primitivos, debido a que su consumo no sólo es una necesidad humana, sino que permite además conservar los alimentos. Una de las primeras culturas en las que se ha documentado el uso y extracción de la sal es China (desde el siglo XXVII a.C.) (Flad, 2005). Durante el Imperio romano se crearon en Europa rutas específicas para facilitar el mercadeo de sal entre diversas regiones; en Roma tiene origen una ruta destinada al transporte de sal denominada vía salaria.

Con el paso de los siglos, era tal la importancia del mercado de la sal que algunos gobiernos europeos lo convirtieron en un monopolio estatal e incluso cobraron impuestos.

En América las culturas precolombinas comerciaban igualmente con la sal, y se sabe que los Mayas la empleaban como moneda (McKillop, 1995). Durante

la conquista de América, los centros de producción de sal se convirtieron en uno de los objetivos primordiales a dominar. La Colonización europea de América en el norte tuvo la intención de apresar y generar nuevas fuentes de elaboración de sal. Las actividades pesqueras hicieron que la demanda de sal creciera en América y que fuese necesario buscar nuevos mercados para ampliar el comercio del pescado en salazón. Durante la independencia de los Estados Unidos la sal tuvo un papel fundamental a la hora de controlar las tropas de las "colonias rebeldes".

El valor que tuvo en la antigüedad ha dejado de ser tal en la actualidad debido a la disminución de su demanda mundial para el consumo humano, en parte debido a la mejora en su producción (Weinberger, 1996). Pero al mismo tiempo, en el periodo que va desde el siglo XVII al XX, los partidarios contra el consumo excesivo de la sal fueron creciendo, debido a que se le ha atribuido un factor importante en la presencia de hipertensión arterial, una de las principales causas de muerte actualmente en México (Lara y col., 2004). La situación acerca de los beneficios y males del consumo excesivo de sal se fueron clarificando en el siglo XX cuando en el año 1994 el COMA (Committee on medical aspects of food policy, 1994) recomienda por persona una dosis diaria de 6 g.

El consumo mundial de sal en la alimentación se fue reduciendo durante el siglo XIX debido a las mejoras en los sistemas de refrigeración y congelación de alimentos, que relegaron a un segundo plano el uso de sal en la conservación de ciertos productos (Kurlansky, 1998). A pesar de esta reducción en el consumo per cápita, el consumo global ha ido creciendo siempre con el crecimiento de la población, así como la aparición de nuevas necesidades y aplicaciones de la sal como es el caso del empleo de la sal en el deshielo de carreteras y calles urbanas. En cada vez más países se comercializa como un alimento funcional al que se le añade yodo para prevenir enfermedades locales como el bocio, o flúor para evitar las caries (James, 1987).

En la actualidad, en una base seca, la sal pura debe contener un mínimo de cloruro de sodio del 99.6%, alcalinidad como Na_2CO_3 de 300 ppm máximo, un máximo de materia insoluble en agua de 300 ppm, un máximo de sulfato como Na_2CO_4 de 3000 ppm, un máximo de Fe de 10 ppm, un máximo de Cu de 2 ppm, un máximo de As de 1 ppm, un máximo de Pb de 2 ppm, un máximo de Ca de 100 ppm, un máximo de Mg de 100 ppm, un máximo de aditivos antiaglomerantes de 15 ppm y un máximo del 0.2% de humedad (NOM-040-SSA1-1993).

La sal está compuesta de redes de iones de Cl^- y Na^+ en cristales que poseen una estructura en forma de sistema cúbico. El cloruro sódico (NaCl) posee el mismo número de átomos de cloro que de sodio y el enlace químico que los une está clasificado como iónico. La estructura cristalina formada por los dos iones posee menos energía que los iones separados, y ésta es una garantía de estabilidad.

La sal pura posee cerca de 60.66% de peso de cloro elemental y un 39.34% de sodio (a veces aparece aproximado como un 60-40). La sal posee entre sus propiedades físicas, una solubilidad de 35.7 g/100 ml a 0 °C. La sal posee, una solubilidad final diferente en función del tamaño de su cristal. La velocidad de solubilización hace que las diferentes sales se apliquen en diferentes instantes de la preparación de los alimentos. El punto de ebullición de los líquidos (disolvente) se incrementa al disolver sal en ellos, de la misma forma el punto de congelación se reduce, y es por esta razón por la que los alimentos cocinados en salmueras se hacen en menos tiempo. La sal pura no posee propiedades higroscópicas, y en caso de poseer estas propiedades físicas son debidas a la presencia de trazas de cloruro de magnesio o de otras impurezas (Hervé, 1995).

La sal pura es inodora, a veces se aromatiza con ciertas especias para lograr un mejor efecto de condimentación o de salazón. De la misma forma los cristales de sal son incoloros, la presencia de colores en algunos casos se debe a la presencia de algunas trazas de algunos minerales en las redes cristalinas de la sal. Los granos de sal miden entre 0.7 mm y 3.2 mm de diámetro. En el caso de la “sal gorda” o “sal de deshielo” puede llegar a los 18 mm.

El empleo de la sal a los alimentos proporciona un sabor salado pero además debe tenerse en cuenta la capacidad de reforzador de otros aromas y sabores. Empleado como condimento en algunos alimentos puede mitigar ligeramente el sabor ácido (McGee, 2004).

1.1.2.1. Producción y consumo de sal

Las fuentes mundiales de sal son prácticamente inagotables. La sal contenida en los océanos es muy grande. En el año 2007 se llegaron a producir en el mundo cerca de un total de 250 millones de toneladas de sal. El mayor productor mundial de sal es China con cerca de 56 millones de toneladas de producción seguido por E.U.A (incluyendo Puerto Rico) con cerca de 43.8 millones de toneladas. China es el mayor productor desde hace una década, antes lo era E.U.A. En Europa el mayor productor es Alemania con 18 millones de toneladas, España produce 3.9 millones de toneladas de sal. En América del Sur el mayor productor es Brasil con 7 millones de toneladas, seguido de Chile con 6 millones. Las estimaciones del Departamento de Interior de E.U.A, muestran que la producción mundial de sal está disminuyendo en lo que va de siglo XXI y que de la misma forma no hay substitutos de la sal a precios razonables (Department of the Interior E.U.A., 2006).

La producción mundial de sal entre 1986 y 1996 experimentó un incremento de aproximadamente 70 millones de toneladas es decir un aumento del 57.6%. E.U.A, China, Canadá y Alemania concentran el 47% de la producción mundial. El crecimiento está correlacionado con el crecimiento de la población en el mundo.

En la Tabla 3 se muestra la producción mundial distribuida en los diferentes continentes:

Tabla 3. Producción mundial de sal 2011.

PRODUCCIÓN MUNDIAL SAL (x10 ³ t)	2007	2008	2009	2010	2011
Alemania	13 394	13 841	16 872	16 611	14 441
Francia	6 140	6 000	6 000	6 100	6 000
Países Bajos	6 177	6 200	5 967	5 982	6 866
Reino Unido (e)	5 800	5 800	5 800	6 666	6 700
España	4 144	4 303	4 201	4 451	4 504
Polonia	4 308	4 108	4 006	4 631	4 415
Italia	2 214	2 334	3 471	4 007	2 912
Total UE	48 810	49 498	52 575	55 263	52 911
México	8 032	8 809	7 445	8 634	9 361
Brasil	6 986	7 000	6 800	7 030	7 000
Chile	4 404	6 431	8 382	7 695	9 966
Argentina	2 358	1 900	1 477	1 527	1 500
Colombia	576	632	611	428	422
Venezuela (e)	350	350	350	350	350
Total Iberoamérica	22 706	25 122	25 065	25 664	28 599

Fuente: www.fda.org.mx 2011(b)

En la Tabla 3 se observa que desde el 2007 el mercado de producción de sal es dirigido por la Unión Europea, siendo de particular interés debido al uso que se ha dado para diferentes áreas en la industria de transformación, aunado con esto, a pesar de que en la actualidad existe una medicina preventiva por medio del control de la dieta, lo que se observa es que la utilización de sal inclusive ha aumentado con el paso del tiempo tanto para la Unión Europea como para Iberoamérica. Aproximadamente la mitad de la producción mundial de sal proviene de las salinas marítimas y el resto de la extracción minera, en algunos países la extracción minera puede suponer casi un 90% como es el caso de E.U.A (Kiple, 2000).

1.2. MEZCLADO DE SÓLIDOS

1.2.1. Teoría de mezclado de sólidos

El mezclado de alimentos es una operación unitaria que tiene la finalidad de lograr que dos o más componentes formen un producto final uniforme, esta mezcla tiene lugar debido a la agitación, deslizamiento centrífugo e impacto, presentes en un equipo (Fellows, 1994).

Esta operación tiene como objetivo principal lograr que los componentes tengan diferentes propiedades funcionales o características organolépticas deseables y con ello lograr modificar la comestibilidad o calidad de los alimentos.

Por lo general, cuando tenemos materiales con características fisicoquímicas muy parecidas entre sí se puede llegar a formar una mezcla perfecta en la que los componentes de las muestras están en proporciones cuya probabilidad estadística de existencia es la misma que la de una dispersión al azar de los componentes originales. Sin embargo en la industria alimentaria, es común que estas mezclas o dispersiones tengan el grado óptimo de mezcla dependiendo en que se vaya a utilizar y muchas de las veces en la satisfacción de los requerimientos legales acerca de la composición (Lindley, 1991).

El mezclado de sólidos es una operación unitaria con una importancia enorme debido a que la mayoría de industrias la ocupan en sus diferentes procesos ya que con ella se incrementa la diversidad de productos en las industrias alimentarias, farmacéuticas, plásticas y químicas, estas dependen de la acción del mezclado en equipos en seco o equipos de contacto (ej. encapsulación, aglomeración) (Massol-Chaudeur y col., 2002).

Los alimentos secos que son cotidianamente mezclados en la industria incluyen la sal, azúcar, saborizantes, conservantes, colorantes, cereales, leche en polvo, frutas y vegetales en polvo por mencionar solo algunos. El mezclado de ingredientes alimenticios es un proceso extensivo utilizado para la preparación de alimentos para animales, fertilizantes, bebidas, insecticidas y alimentos empacados.

El estudio de la operación de mezclado tiene precedentes desde 1943 por Lacey (Lindley, 1991) que reportó y patentó diferentes métodos de medición y comportamiento del mezclado en diferentes equipos; sin embargo estos al ser estudiados y comprobados tuvieron la desventaja de no ser aplicables para la mayoría de los equipos. Un proceso de mezcla satisfactorio produce una mezcla uniforme, en un mínimo de tiempo con un bajo costo.

En todo proceso de mezclado se tienen diferencias significativas en las propiedades de los materiales como lo son en la distribución de tamaño, densidad, forma, y características de superficie (cargas electrostáticas), lo anterior hace del mezclado una operación con alta dificultad. Adicionalmente a lo anterior se suman

otros factores que afectan aún más la operación de mezclado los cuales son: características de flujo, ángulo de reposo, friabilidad, aglomeración y la presencia de fuerzas cohesivas o adhesivas de las partículas, estas dos últimas dependen significativamente del contenido de humedad y tamaño del material utilizado (Lindley, 1991).

El mezclado de partículas de distinta naturaleza sólo puede hacerse movilizandole tales partículas sólidas desde fuera, confiriéndoles una energía cinética momentánea.

1.2.2. Mecanismos presentes en el mezclado de polvos

El mezclado de sólidos se inicia con las partículas en estado de equilibrio espacial bajo solo la fuerza de gravedad, consecuentemente se tiene una expansión de la cama del sólido, bajo diferentes fuerzas, provocando un movimiento interparticular.

Los equipos de mezclado de sólidos actúan de dos maneras diferentes. En unos el material es empujado por aletas o paletas, en tanto en otros es levantado hasta cierta altura, desde donde cae, en parte como fina lluvia y en parte rodando sobre sí mismo.

Para que se logre lo anterior deben de existir tres principios básicos estudiados por Reynolds en 1885, que aún hoy son totalmente válidos (Helman, 1984):

- I. Para que haya movimiento interparticular debe aumentarse el volumen del lecho.
- II. El movimiento se produce a lo largo de fallas del lecho.
- III. Para que haya movimiento de partículas y desplazamiento interparticular, la expansión del lecho no debe ser ilimitada.

Por lo anteriormente mencionado es que los mezcladores no se deben de llenar hasta su límite (se debe aumentar el volumen del lecho), debe de ser un sistema cerrado para que la expansión del lecho no sea ilimitada y finalmente la tendencia

del lecho a moverse por falla se incrementará dando energía cinética al mismo desde fuera (Helman, 1984).

Las interacciones tanto químicas como mecánicas presentes en el mezclado de polvos en alimentos dependen principalmente de su composición, contenido de humedad, propiedades mecánicas de superficie, historia de la partícula (desde su lugar de producción hasta su almacenamiento), tamaño y forma de las partículas, y la manera en la cual interactúan las diferentes geometrías de las partículas para formar estructuras estables. Por consiguiente, las fuerzas entre partículas como las de entrelazamiento mecánico, las uniones químicas, las fuerzas de Van der Waals y las fuerzas electrostáticas, se vencen (Juliano y col., 2006).

Los problemas asociados en la producción de una mezcla homogénea y consistente están estrechamente vinculados con las propiedades moleculares de las partículas. Las partículas sólidas no tienen movilidad intrínseca, de hecho, permanecen en sus posiciones relativas debido a fuerzas interparticulares y la fuerza de gravedad.

Los diferentes tipos de mezclado de polvos, pueden ser divididos en dos grandes grupos: a) los formados al azar y b) los formados por mecanismos diferentes al azar. El segundo grupo puede ser subdividido en los que se forman por mecanismo de tipo ordenado y los que se forman por mecanismos de tipo no al azar.

Hersey (Ruíz, 1986) define el mezclado al azar como el que se puede llevar a cabo con partículas que tengan peso y tamaños semejantes con poca o prácticamente ningún efecto superficial, y que además no presenten ningún tipo de interacción o cohesión partícula-partícula para obtener los mejores resultados. Sin embargo no puede ser utilizado este concepto de una manera práctica para todos los sistemas particulados, especialmente para sistemas donde existan interacciones y cohesión entre las partículas.

El mezclado al azar es un proceso estadístico en donde el lecho de las partículas es repetidamente separado y recombinado hasta que exista una oportunidad semejante para que cualquier partícula individual se encuentre en cualquier punto

en la mezcla a cualquier tiempo y que mantenga el azar (no segregación ni aglomeración) después que el mezclado ha terminado. En la práctica una mezcla de polvos raramente, si no es que nunca, tendrá tal condición, lo que se denomina un azar verdadero, Williams le llamó a este proceso de mezclado incompleto “no al azar”, esta teoría acepta que la probabilidad de encontrar cualquier partícula en la mezcla no es la misma (Ruíz, 1986).

El mismo autor define el concepto de mezcla ordenada; esta se forma cuando un componente fino tiene suficiente cohesividad intrínseca debido a fuerzas electrostáticas, de Van der Waals y/o fuerzas de tensión superficial para adherirse a la superficie de un componente mayor. Las propiedades cohesivas y otros fenómenos superficiales hacen que el mezclado de las partículas finas tienda a ser ordenado más que una operación al azar. La mezcla ordenada se definió como la adhesión de partículas finas a partículas más gruesas. Un sistema homogéneo se forma cuando el peso de las partículas finas adheridas por unidad de área a las partículas más grandes es constante (Ruíz, 1986).

Debido a la complejidad de la conducta dinámica de las partículas sólidas durante el proceso de mezcla, se utiliza la descripción de los principales mecanismos presentes en el momento de tal proceso:

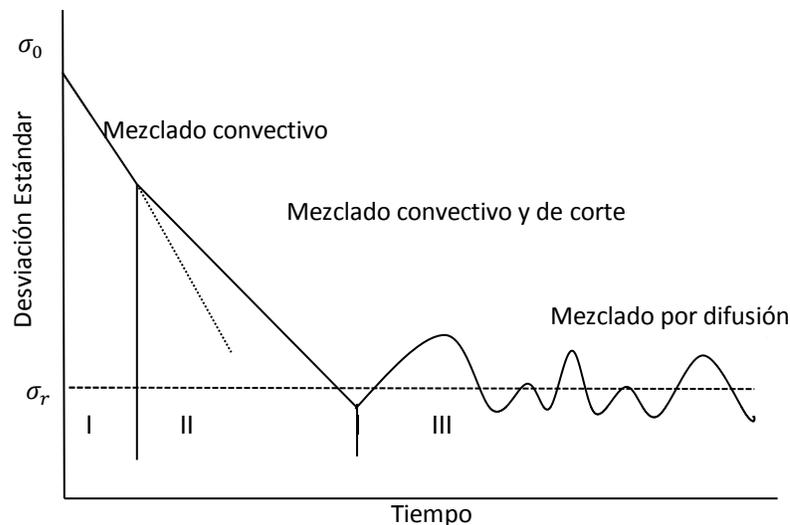
Mezclado convectivo. El transporte de producto o grupos de partículas de un punto a otro (flujo rotacional) de los sólidos es usualmente causado por el movimiento rotacional del recipiente de mezcla. El flujo rotacional da lugar a la mezcla convectiva y contribuye principalmente en la mezcla macroscópica del volumen de gruesos de la mezcla. Aunque la participación de este mecanismo es alta dentro del mezclado su participación en el mezclado microscópico es muy pobre. El mezclado convectivo es beneficioso en las operaciones batch.

Mezclado por corte o cizalla. Este mecanismo es inducido en el momento en el cual las partículas sólidas tienen cambios en sus velocidades originando la formación de planos de resbalamiento dentro de la masa como resultado de la mezcla de grupos de partículas.

Mezclado por difusión. Es causada por el movimiento de partículas al azar; la transmisión de éstas partículas individuales tiene lugar de un punto a otro, producida por la distribución de las partículas sobre una superficie acabada de crear, es esencial para la homogenización microscópica de la mezcla y el nivel de participación de este mecanismo es baja en comparación con el convectivo y de corte dentro de la mezcla (Brenan, 1980; Hiroaki, 2006).

La mayoría de los aparatos de mezcla utilizan los tres mecanismos, aunque un tipo particular de mecanismo pueda predominar en un aparato particular. La mezcla por cizalladura se considera en ocasiones como parte de un mecanismo convectivo (Brenan, 1980; Perry, 1984).

La Figura 2 ejemplifica, los mecanismos preponderantes durante la operación del mezclado.



Fuente: Hiroaki, 2006

Figura 2. Curva de la cinética presente durante el mezclado de sólidos mostrando los mecanismos preponderantes en la operación.

1.2.3. Evaluación de eficiencia de mezclado

El funcionamiento de un mezclador industrial se caracteriza de acuerdo con el tiempo que se requiere, gasto, poder, trabajo y las propiedades del producto final. En la industria de los alimentos es frecuente que las mezclas hayan de satisfacer

unos determinados requerimientos legales acerca de la composición, por lo que resulta conveniente utilizar algún método de control de la operación de mezclado.

El grado de la mezcla final depende del equilibrio alcanzado entre los mecanismos que favorecen o dificultan el mezclado, que dependen a su vez del tipo de mezcladora, de las condiciones durante su funcionamiento y de la composición de los alimentos. Por lo general, se alcanzan mezclas más uniformes con aquellos productos cuyo tamaño, forma y densidad son similares. Diferencias notables en estas características pueden incluso impedir su mezcla. El grado de uniformidad de un producto mezclado, medido por el análisis de un número de muestras puntuales, es una medida válida de la eficacia del mezclado. Si se toman muestras de una mezcla de dos componentes al iniciarse el mezclado (los componentes todavía se hallan separados), la mayor parte de ellas estarán constituidas tan sólo por uno de los componentes. A medida que la operación transcurre, la composición de las muestras se va haciendo más uniforme, aproximándose a la composición teórica media de la mezcla (Fellows, 1994; Aguado, 2003).

En la publicación de Weidembbaum, como en otras de Valentín y de Herdan (Helman, 1984), se analizan una serie de casi treinta trabajos de diferentes investigadores abocados a la tarea de llegar a técnicas universales de control del mezclado y estudio de rendimientos de distintos equipos. De dicha revisión surge evidentemente la falta de uniformidad de ciertas definiciones básicas y fundamentales en lo que se podría llamar “grado de mezcla” o “índice de mezclado” como referencia que permita contrastar el rendimiento de cualquier equipo. En muchos de tales trabajos se llega a ecuaciones finales que si bien no son de aplicación general, pueden ayudar a estudiar y controlar el comportamiento de equipos semejantes (Helman, 1984).

Dentro del mezclado de sólidos granulares el índice de mezcla se basa, no en las condiciones para mezclado cero, sino sobre la desviación estándar que se observaría con una mezcla perfecta al azar (Fellows, 1994).

A partir de lo anterior las desviaciones de las composiciones de las muestras puntuales respecto a la media de la mezcla global constituyen una medida del progreso de la operación de mezclado respecto al tiempo. La manera correcta de medir esta desviación es utilizando el término estadístico conocido por desviación estándar, que viene dada por (Aguado, 2003):

$$\sigma_m = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{ec. 1})$$

En la que:

σ_m : Desviación estándar de muestras puntuales

n : Número de muestras tomadas

x_i : Concentración del componente en cada una de las muestras

\bar{x} : Concentración media del componente en las muestras

$\sum_{i=1}^n$: Sumatoria de la diferencia $(x_i - \bar{x})^2$ (Lindley, 1991)

$$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n} \quad (\text{ec. 2})$$

El valor de σ_m es una medida relativa del mezclado, válido solamente para ensayos de un material específico y un determinado tipo de mezclador. A medida que la uniformidad de la mezcla aumenta, el valor de la desviación estándar disminuye.

Existen diversos índices de mezclado (IM) que permiten controlar la uniformidad de la mezcla y comparar el funcionamiento de diversas mezclas, como:

$$IM_1 = \frac{\sigma_0 - \sigma_m}{\sigma_0 - \sigma_\infty} \quad (\text{ec.3})$$

$$IM_2 = \frac{\text{Log } \sigma_0 - \text{Log } \sigma_m}{\text{Log } \sigma_0 - \text{Log } \sigma_\infty} \quad (\text{ec.4})$$

$$IM_3 = \frac{\sigma_0^2 - \sigma_m^2}{\sigma_0^2 - \sigma_\infty^2} \quad (\text{ec.5})$$

En estas expresiones σ_∞ es la desviación estándar de una “mezcla perfecta” (en el que $\sigma_\infty = 0$), σ_0 la desviación estándar de una mezcla al comienzo de la operación y σ_m la desviación estándar de una muestra tomada durante el mezclado. σ_0 y σ_∞ se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_0 = \sqrt{(p_1(1 - p_1))} \quad (\text{ec.6})$$

$$\sigma_\infty = \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \quad (\text{ec.7})$$

Dónde:

p_1 : Representa el promedio de la masa o volumen relativo de cada componente de la mezcla. Establecido por:

$$p_1 = \frac{\text{cantidad del componente mayoritario}}{\text{cantidad total de la mezcla}} \quad (\text{ec.8})$$

N: Número de partículas

σ_∞ : Desviación estándar de una mezcla perfecta, en la práctica es recomendable utilizar $\sigma_\infty = 0.001$ (Aguado, 2003).

En la práctica, el mezclado perfecto no se alcanza nunca, pero en una mezcladora eficaz después de un tiempo de funcionamiento razonable este valor llega a ser muy bajo.

Se utiliza el índice de mezclado que se adapta mejor a una determinada mezcla de componentes o un tipo particular de mezclador.

El índice de mezclado IM_1 , se utiliza cuando los componentes se encuentran aproximadamente en igual proporción en masa y/o a velocidades de mezclado relativamente lentas; IM_2 , cuando uno de ellos se encuentra en muy poca proporción y/o velocidades de mezclado elevadas, e IM_3 se emplea para líquidos o sólidos que se mezclan de forma semejante a IM_1 (Fellows, 1994).

1.2.4. FENÓMENOS QUE EVITAN EL MEZCLADO DE SÓLIDOS

1.2.4.1. Segregación

La segregación se puede definir como el volumen de sólidos compuesto por partículas con diferentes propiedades constituyentes que evolucionan a un estado no uniforme (Anjani y Virendra, 2009).

En este fenómeno existe la presencia de mezcla y desmezclado simultáneamente en la operación, de acuerdo a su tamaño y/o densidad del material. La importancia de los efectos de la segregación sobre el grado de la homogeneidad alcanzado en la mezcla de sólidos no puede sobrestimarse. Las investigaciones han reportado que las propiedades físicas, contribución eléctrica, la dirección del movimiento de la partícula y los aparatos usados durante el proceso de un material en particular contribuyen a la segregación de las partículas (Anjani y Virendra, 2009). En la mayoría de los casos de mezcladoras segregantes está presente un mecanismo de carácter fundamentalmente difusivo y en el caso de las que operan con mecanismos convectivos este fenómeno es poco probable, además de tomar en cuenta las propiedades fisicoquímicas de los componentes de la mezcla. En algunos casos, la preparación de los materiales previamente estudiados, ayuda a que no se presenten problemas de segregación (McCabe, 1995).

El efecto de la segregación de polvos se inicia muy arriba del nivel molecular, cuando las partículas llegan a un tamaño más allá donde el movimiento Browniano no puede ocurrir. El primer paso para la segregación es la dilatación de la cama del polvo la cual puede ser producida en diferentes formas dando lugar a diferentes mecanismos de segregación.

Además de lo anterior; existen otros factores para que se dé la segregación como lo son las cargas electrostáticas, que motivan que las partículas se repelan unas a

otras, en este caso se debe tener control del tiempo de mezclado para no aumentar la presencia de estas cargas (Aguado, 2003). La densidad relativa, forma, rugosidad y el tamaño de la partícula, siendo esta última la más importante; si estas diferencias son altas se presentará segregación dentro de regiones aisladas.

La segregación, está presente en las mezclas en las que las partículas sólidas tienen el mismo tamaño y forma pero diferentes densidades, esto dificulta que tenga un buen resultado. Demostrando lo anterior Henderson y Perry (1976), determinaron que las partículas pequeñas tienen la propiedad de encontrarse en la parte más alta y las partículas con mayores densidades son arrastradas hacia el fondo del recipiente de mezclado. Perry (1984) en otro estudio reportó esto para las partículas con la misma densidad pero diferencias en tamaño, las partículas más pequeñas deberían de ir hacia el fondo y las grandes hacia la parte más alta. Sin embargo, las partículas lisas se encuentran alrededor y cerca del fondo, mientras que las dentadas y polihedrales se situarán en la parte más alta. El proceso de mezclado supera las tendencias naturales; esto es consumado debido al levantamiento de los materiales, más o menos en masa, desde el fondo del recipiente de mezclado y sobre el punto más alto boca abajo permitiendo con esto llenar los vacíos por gravedad.

La segregación se presenta en partículas menores a 10 μm . La adición de pequeñas cantidades de humedad puede transformar la tendencia natural de segregación de la mezcla contra la cohesividad. Una mezcla con alto contenido de gruesos puede suplementar la segregación libre solo en el mayor componente rugoso o fibroso en su forma. Si uno de los componentes en la mezcla gruesa es muy fino, no habrá segregación.

Evitar la segregación es un desafío en la industria de los alimentos donde los materiales tienen un amplio rango de propiedades que están muy a menudo presentes en el mezclado (Lindley, 1991).

1.2.4.2. Aglomeración

Los polvos de partículas pequeñas presentan una tendencia a aglomerarse esto ocurre debido a la atracción presente entre las fuerzas de unión propias de las materias primas, estas son suficientemente poderosas para reagrupar las partículas individuales. Esto se debe principalmente a que el tamaño de las partículas disminuye las fuerzas entre estas, por lo tanto llegan a ser menos dominantes y esto provoca que los límites de las fuerzas inter-partícula de Van der Waals, electrostáticas o humedad limitantes tengan una mayor importancia (Lindley, 1991).

La aglomeración está presente en las partículas cohesivas finas que se adhieren entre ellas bajo la influencia de fuerzas electrostáticas, Van der Waals o puentes líquidos, para formar aglomerados causando una distribución asimétrica en la mezcla. El tiempo de mezclado, velocidad de mezclado, tipo de mezclador y el volumen de llenado pueden llegar a afectar la tendencia a la aglomeración. Los mecanismos de aglomeración han sido poco estudiados y son pocos los trabajos al respecto, Orr y Sallam (1978), sugirieron que cuando el equipo esta girando, los polvos sucumben a las fuerzas de compactación, esto dando lugar a la formación de unos primeros aglomerados denominados "trozos" en los polvos. Estos "trozos", se rompen en pequeñas unidades debido a los mecanismos de mezclado presentes en el mezclador, el estrés de la masa de polvo libre y las colisiones entre ellos en las paredes del mezclador. Esto transforma los "trozos" en "bolas" de alta densidad. Las "bolas" libres se encuentran en la superficie de la masa de polvo, ruedan alrededor de la pendiente generada al mismo tiempo que incrementan su tamaño (DesRosiers y col., 2006).

1.2.5. EQUIPOS DE MEZCLADO

Un mezclador es un recipiente dentro del cual se colocan los polvos, que luego se extraen por artefacto mecánico o neumático. Son tantas las variables del mezclado y tan diversas las aplicaciones y requisitos de las mezclas que no hay un diseño universal. Los distintos tipos de mezcladores en uso son más bien el resultado de la evolución del empirismo que la resultante de un trabajo teórico fundamentado.

Entre las características del equipo que influyen en el mezclado y que, por lo tanto, son de advertir, se hallan entre otras, sus dimensiones y geometría; formas de los agitadores (si los hay); dimensiones y ubicación de los accesos; composición del material; terminación de las superficies, detalles de carga-descarga, etc.

Los mezcladores para productos pulverizados responden a dos diseños básicos: en el primero de ellos el mezclado del material se produce como consecuencia del movimiento de rotación del recipiente que lo contiene, mientras que en el segundo, el producto es impulsado por la acción de un tornillo helicoidal hacia la zona de mezcla (McCabe, 1995).

1.2.5.1. Mezcladores de cintas

Un mezclador de cintas representado en la Figura 3, está constituido por una cubeta horizontal semicilíndrica, provista de dos cintas helicoidales montadas sobre un mismo eje, que actúan en sentidos contrarios. Una de ellas desplaza lentamente el sólido en una dirección mientras que la otra se mueve rápidamente en sentido contrario. El mezclado resulta como consecuencia de la turbulencia inducida por los agitadores de sentido contrario y no del movimiento de los sólidos a través del recipiente. Aunque la segregación puede aparecer debido al movimiento envolvente, en general, no es un problema serio. El mecanismo que opera en este tipo de mezcladoras es fundamentalmente convectivo: las cintas transportan las partículas de una zona a otra. Los mezcladores de cintas resultan eficaces para pastas poco espesas o para sólidos pulverizados que no fluyen fácilmente. Algunos mezcladores de cintas operan para cargas, mientras que otros trabajan en continuo, introduciendo la alimentación de sólidos por un extremo y descargándolos por el otro. La cubeta está abierta o ligeramente tapada en el caso de servicio suave y cerrado, con paredes gruesas, en el caso de operación a presión o a vacío. Algunas unidades discontinuas son muy grandes, pudiendo cargar hasta 30 000 litros de material. Su requerimiento energético es moderado (McCabe, 1995; Aguado, 2003).

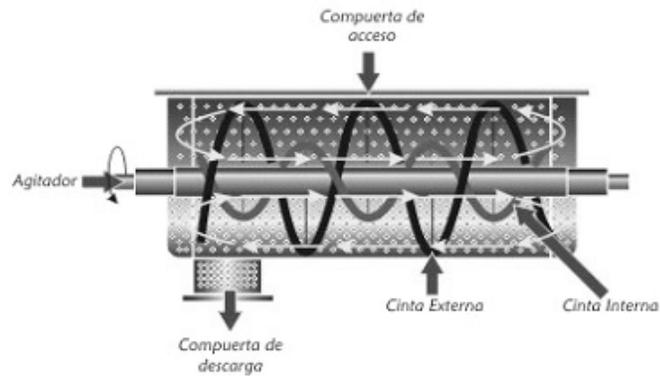


Figura 3. Mezclador de cintas (<http://www.vibrasec.com>)

1.2.5.2. Mezcladores de tornillo interno

Consisten en un tornillo vertical giratorio situado en un recipiente cilíndrico o cónico, como lo muestra la Figura 4. El tornillo puede estar fijo en el centro del depósito o puede desplazarse formando una órbita alrededor del eje central, pasando cerca de las paredes del recipiente. Esta última disposición es más efectiva y evita las capas estacionarias cerca de las paredes. Las mezcladoras de tornillo vertical son rápidas, muy eficientes y particularmente útiles para mezclar pequeñas cantidades de aditivos con una gran masa de producto. Predomina también en ellas el mecanismo convectivo, de manera que pueden ser utilizadas con productos proclives a la segregación. La mezcla es generalmente más lenta que en los mezcladores de cintas pero el consumo de energía es algo menor (McCabe, 1995; Aguado, 2003).

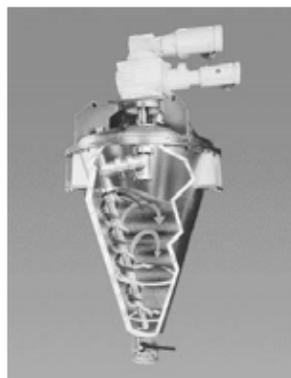


Figura 4. Mezclador de tornillo interno (<http://www.vibrasec.com>)

1.2.5.3. Volantes de impacto

Los polvos finos y ligeros, se mezclan de forma continua esparciéndolos en una delgada capa por acción de la fuerza centrífuga, como se observa en la Figura 5. Simultáneamente se suelen agregar de forma continua distintos ingredientes sólidos premezclados, cerca del centro de un disco giratorio de alta velocidad de 10 a 27 pulgadas de diámetro, que los proyecta hacia fuera dentro de una carcasa estacionaria. Las intensas fuerzas de cizalla, que actúan sobre los polvos durante su recorrido sobre la superficie del disco, dan lugar a un completo mezclado de los distintos materiales. En algunas máquinas el disco es vertical mientras que en otras es horizontal. En algunos dispositivos, diseñados para mezclado sin reducción de tamaños, la alimentación premezclada se introduce en un doble rotor horizontal provisto de pernos verticales cortos cerca de su periferia para aumentar la eficacia de mezclado. Para sólidos fáciles de mezclar, un disco de 14 pulgadas gira a 1750 rpm. A veces se requieren varios pasos a través de la misma máquina o a través de varias máquinas en serie. Para obtener buenos resultados, la alimentación premezclada de un volante de impacto debe ser bastante uniforme ya que de esta forma casi no hay retención de material en el mezclador ni oportunidad para la recombinación de los materiales que han pasado con el que entra. Los volantes de impacto pueden mezclar de 1 a 25 toneladas por hora de polvos ligeros que fluyen libremente (McCabe, 1995).

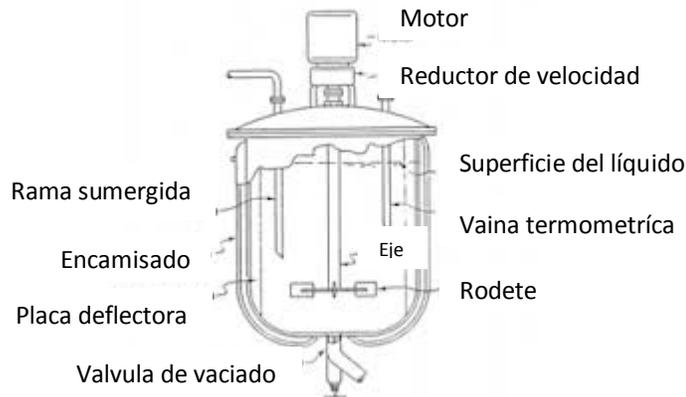


Figura 5. Mezclador de impacto (<http://www.vibrasec.com>)

1.2.5.4. Mezcladores de volteo

Operan volteando la masa de los sólidos en un tambor giratorio de forma variada. La envoltura gira a velocidades de hasta 100 rpm y su capacidad de carga es de 50-60% del volumen total. Para mejorar la eficacia del mezclado puede disponer de pulverizadores internos para introducir pequeñas cantidades de líquido en el mezclador y dispositivos accionados mecánicamente para desmenuzar los aglomerados de sólidos. Los mezcladores de volteo son más adecuados para la mezcla suave de productos sólidos pulverizados de características similares. Mezclan eficazmente suspensiones de sólidos densos en líquidos y polvos secos pesados. La segregación puede resultar un problema, sobre todo si las partículas varían de tamaño y forma. El mezclador de doble cono es un aparato de uso común para polvos que fluyen libremente. La carga se introduce en el cuerpo del aparato por la parte superior, hasta llenarlo. Los extremos del contenedor se cierran y los sólidos se voltean durante 5 a 20 minutos. El material se retira por el fondo del contenedor, pasando a un sistema de transporte o a un depósito. El mezclador de tambores gemelos está formado por dos cilindros unidos en V y gira alrededor de un eje horizontal. Como en el mezclador de doble cono, puede contener pulverizadores internos para introducir pequeñas cantidades de líquido en el mezclador o, también, dispositivos accionados mecánicamente para desmenuzar los aglomerados de sólidos. Los mezcladores de tambores gemelos son más eficaces en algunas operaciones de mezcla que los mezcladores de doble cono. Los mezcladores de volteo se construyen en una gran variedad de tamaños y materiales. Generalmente el consumo de potencia es ligeramente inferior a los mezcladores de cintas (Brenan, 1980; Aguado, 2003).

1.2.5.5. Características del mezclador en “V”

El mezclador de doble cono es un aparato de uso común para polvos que fluyen libremente o materiales no cohesivos. La carga se introduce en el cuerpo del aparato por la parte superior, hasta llenarlo en un 50 a 60% de su capacidad. Este gira alrededor de un eje horizontal, la velocidad que puede alcanzar es hasta 100 rpm, los extremos del contenedor están formados por dos cilindros unidos en V, se cierran y los sólidos se voltean durante 5 a 20 minutos, la Figura 6 ejemplifica la forma común de estos equipos. Se detiene el equipo y el material se retira (Mc Cabe, 2005).

La eficacia para la mezcla de determinados componentes depende de su forma y de su velocidad de volteo; ésta deberá ser siempre inferior a la velocidad crítica (aquella velocidad a la que la fuerza centrífuga supera a la de la gravedad). Estos equipos actúan por el mecanismo de difusión principalmente, volteando el material y girando a velocidades y ángulos de inclinación diferentes, por esto es importante que la velocidad de agitación sea la adecuada, ya que esta determina en cierta medida la eficiencia del mezclado (Sánchez, 2003).

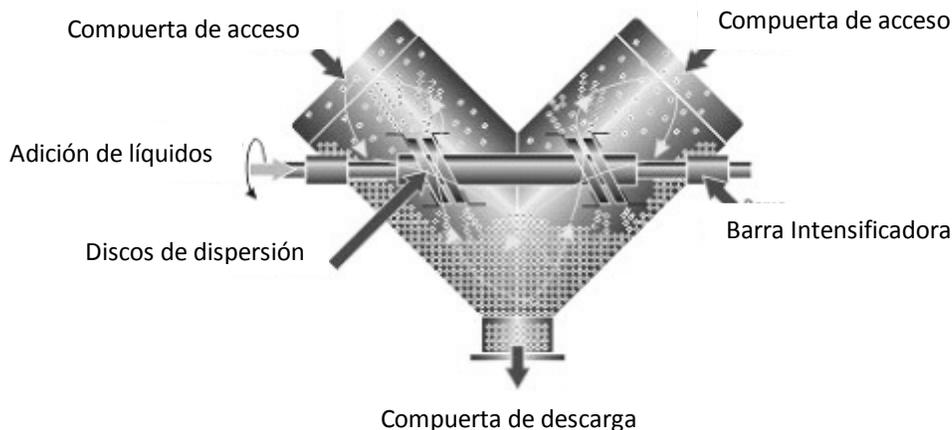


Figura 6. Mezclador en “V” (<http://www.vibrasec.com>)

1.2.6. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS POLVOS

Grandes diferencias entre las propiedades pueden hacer que el mezclado sea dificultoso. Entre las más importantes se pueden mencionar:

1.2.6.1. Cohesividad

La cohesión de los polvos es la tendencia de las partículas que lo constituyen a permanecer adheridas entre sí; dependen de la naturaleza química del material y tamaño de la partícula, influyen también, la presencia de gases y vapores existentes en el medio ambiente ya sean como película o bien como líquido aglomerante por tensión superficial (humedad), ya que los polvos húmedos no pueden fluir o no ruedan fácilmente como cuando están secos.

Esta propiedad es afectada por distintas características propias y únicas de cada material; entre las que se pueden citar: fuerzas de Van der Waals, donde se agrupan distintas fuerzas de cohesión entre las moléculas. Como son debidas a una distribución electrónica desigual entre los átomos de las moléculas y como el campo eléctrico exterior así producido varía en magnitud y dirección en función del tiempo, es que se les denomina también fuerzas electrodinámicas, estas últimas, son las que predominan en la formación de los cristales orgánicos. Cuando estas fuerzas de Van der Waals actúan entre dos moléculas que son dipolos inducidos se les llama fuerzas de London y la energía de estas fuerzas es baja, por lo que se ven vencidas con facilidad por agitación térmica (Klein, 1981).

Otras fuerzas que intervienen son las derivadas de la fricción, por carga electrostática, y cuando el tamaño se acerca al micrón, las fuerzas de quimiosorción. Estas últimas son en especial enérgicas para las partículas muy pequeñas y anisótropas que se unen así de manera firme por orientación de campo (Helman, 1984).

1.2.6.2. Tamaño

En sistemas en los cuales se tienen 2 tipos de objetos con diferentes volúmenes, se ha encontrado que el tamaño de las partículas tiene un efecto excesivo en la segregación, en el momento del mezclado de sólidos (Roskilly, 2010).

Bridwater e Ingram fueron los pioneros en identificar los parámetros dominantes responsables de la segregación, esas investigaciones encontraron que el tamaño de las partículas es el parámetro más dominante que contribuye hacia la segregación (Lindley, 1991; Anjani y Virendra, 2009).

Las técnicas en uso para la determinación del tamaño de partículas sólidas utilizan el tamizado, es aplicable a los materiales más diversos con tamaños entre 0 y 10 cm y malla 400 (37 micrones). Consiste en hacer pasar una muestra pesada del material a través de una serie de tamices, apilados unos encima de otros, ordenados de tal manera que sus orificios vayan disminuyendo de manera progresiva hacia abajo, cada fracción se considera formada por partículas de igual dimensión y precisamente la media entre la abertura del tamiz que dejó pasar y la de aquel en que quedó retenido (Helman, 1984).

1.2.6.3. Contenido de humedad

El agua se divide en libre y ligada en los alimentos; la primera es aquella disponible para el crecimiento de microorganismos y para intervenir en las otras transformaciones, ya que la segunda está unida a la superficie sólida y no actúa por estar “no disponible o inmóvil”. La principal causa por la cual es de interés conocer el contenido humedad presente en los polvos alimenticios es la formación de aglomerados debida a una alta presencia de esta propiedad.

La determinación del contenido de humedad es una de las más importantes medidas y ampliamente usadas en el procesado y control de los alimentos. El método más rápido y práctico para la industria de alimentos es la determinación de humedad por medio del uso de estufa y termobalanza; en este último método evapora de manera continua el agua presente y se registra continuamente la pérdida de peso, hasta que la muestra se sitúe en peso constante. El error de pesada de este método se minimiza cuando la muestra no se expone constantemente al ambiente (Perry, 1984).

1.2.6.4. Diámetro

Está claro que para una masa granular, es difícil que una sola partícula satisfaga todos los requisitos y pueda entonces ser representativa del volumen, del peso y superficie. Es por ello que se refiere al tamaño de partículas sólidas mediante elección de una dimensión característica de la misma. Si se trata de partículas isodimensionales, redondeadas, dicha dimensión o diámetro no ofrece dudas en su elección y significado (Helman, 1984).

El diámetro de partícula es un dato esencial para cualquiera que está tratando de polvos. Expresa el diámetro de una partícula individual y no es una tarea fácil cuando se trata de una partícula no esférica. Por valor medio de cualquier conjunto de valores, se entiende a un valor que pueda representarlos a todos, de tal manera que multiplicado dicho valor medio por el número total de ejemplares del conjunto obtengamos el valor total de dicha propiedad (Hiroaki, 2006).

Para este fin se maneja el diámetro Sauter medio: Se usa para los casos en los que la dimensión de una partícula tiene el volumen promedio por unidad de superficie y considerando un tamizado, está dado por:

$$d_{p_{sau}} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (\text{ec.9})$$

Dónde:

x_i = Fracciones del total retenidas por cada uno de los tamices

d_{pi} = Aberturas medias de los tamices utilizados

$d_{p_{sau}}$ = Diámetro Sauter medio

Cuando se trata con partículas muy irregulares, el concepto de diámetro a aplicar exige suma prudencia en su utilización.

Generalmente se recurre al denominado diámetro equivalente, o sea, el diámetro de una esfera que posea la misma relación de superficie/volumen que la partícula en cuestión (Helman, 1984). De acuerdo a esto, podemos decir:

$$d_{eq} = \frac{\sum v_p}{s_p} = \frac{d_p}{\lambda} \quad (\text{ec.10})$$

Dónde:

d_{eq} : Diámetro equivalente

$\sum v_p$: Sumatoria de volumen de partículas

s_p : Superficie de una partícula

d_p : Diámetro de partícula

λ : Factor de forma

1.2.6.5. Forma

Las partículas tienen varias formas dependiendo de su manufactura y sus propiedades mecánicas, muchas veces se les asemeja con esferas o paralelepípedos rectangulares, en muchos casos no se les puede definir.

En los métodos cualitativos las formas son expresadas por los términos de “esfera”, “granulo”, “bloque”, “escama”, “cilindro”, “prisma”, “barra”, “fibra”, “irregular”, y varios más. Los descriptores verbales descritos son muchas de las veces convenientes para expresar formas irregulares y hacer más fácil de entender la forma en una manera visual. Sin embargo, estos términos no son estandarizados al momento de aplicarlos por lo tanto se necesitan descriptores cuantitativos en el momento de evaluar la forma de las partículas.

Los descriptores cuantitativos de la forma de las partículas pueden ser deducidos mediante 2 o 3 propiedades dimensionales geométricas y pueden ser calculadas por la comparación con propiedades físicas de formas de referencia (Hiroaki, 2006).

Para poder expresar la forma de una partícula irregular se ha convenido en utilizar un llamado factor de forma, independiente del tamaño de la partícula (λ). Dicho factor se ha elegido de tal manera que, para cubos, esferas y cilindros de longitud igual al diámetro, valga uno.

La relación volumen de partícula/superficie de partícula, que para esos tres cuerpos es:

$$\frac{v_p}{s_p} = \frac{d_e}{6} \quad (\text{ec.11})$$

Para partículas irregulares será:

$$\frac{v_p}{s_p} = \frac{d_p}{6\lambda} \quad (\text{ec.12})$$

Dónde:

v_p : Volumen de una partícula

s_p : Superficie de una partícula

d_e : Diámetro de esfera

d_p : Diámetro de partícula

λ : Factor de forma

En los siguientes apartados se describen técnicas que se pueden utilizar como apoyo del seguimiento de trazadores cuando se evalúa la homogeneidad de mezclas de polvos alimenticios (Helman, 1984).

1.2.6.6. Conductividad

En 1884 Svante Arrhenius (Morrison, 1998) propuso su teoría iónica de las disoluciones, en la cual planteaba que ciertas sustancias producen iones que se mueven libremente cuando se disuelven en agua y conducen la corriente eléctrica en una disolución acuosa.

La conducción de una corriente eléctrica a través de una solución de un electrolito involucra la migración de especies cargadas positivamente hacia el cátodo y especies cargadas negativamente hacia el ánodo. La *conductancia* de una solución, que es una medida del flujo de corriente que resulta de la aplicación de una fuerza eléctrica dada, depende directamente del número de partículas

cargadas que contiene. Todos los iones contribuyen al proceso de conducción, pero la fracción de corriente transportada por cada especie está determinada por su concentración relativa y su movilidad inherente en el medio.

La conductividad eléctrica de una solución se define, simplemente, como el inverso de la resistencia eléctrica que se observa en la solución, al circular corriente en condiciones reguladas. Si bien las unidades bien podrían ser Ω^{-1} (ohms inversos), por razones históricas, se definió la unidad Siemens, abreviado "S" y se le encuentra a menudo precedida de modificadores de orden, más frecuentemente micro. Al trabajar en soluciones, es preciso identificar la longitud a través de la que se mide la conductividad, de modo que la unidad habitual de conductividad de soluciones resulta ser mS/cm y la especie se cita como conductividad.

La aplicación de las mediciones de conductancia directa al análisis es limitada porque es una propiedad de naturaleza no selectiva. Los usos principales de las mediciones directas han estado confinados al análisis de mezclas de agua-electrolito y a la determinación de la concentración total del electrolito.

La producción de reacciones electroquímicas en las placas del equipo de conductividad eléctrica, en la mayoría de los casos las corroe con cierta premura así es que se suele recurrir a sistemas que miden la conductividad sin electrodos. Tal sistema se basa en la inmersión de un transformador aislado en la solución. El inducido (cable enrollado) primario recibe una señal de corriente alterna, que induce una corriente alterna en el secundario (otro cable, enrollado encima del primario). La corriente inducida en el secundario será función de la conductancia específica del electrolito conformado por la solución bajo análisis.

Para medir la conductancia de una solución se utiliza un puente de Wheatstone, como se muestra en la Figura 7. El pasaje de corriente a través de una solución de un electrolito puede producir cambios en la composición de la solución en la zona adyacente a los electrodos; además pueden desarrollarse potenciales con la consecuente introducción de errores serios en las mediciones conductimétricas,

siempre que no se reduzcan los efectos de polarización a proporciones desestimables. Estas dificultades se eliminan generalmente empleando corrientes alternas para las mediciones de manera que se reducen considerablemente los efectos de polarización y el grado de electrólisis.

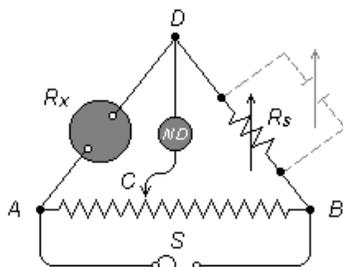
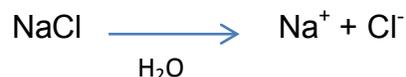


Figura 7. Puente de Wheatstone para mediciones de resistencias (www.quimica.com)

En el caso de las disoluciones electrolíticas, la corriente es transportada por los iones de la disolución. En ausencia de un campo eléctrico los iones, que constituyen un conductor iónico, se encuentran en un constante movimiento al azar. Este movimiento es debido a la acción de fuerzas térmicas y de convección. Cuando los iones son sometidos a la acción de un campo eléctrico (por la aplicación de una diferencia de potencial) se mueven, en un sentido u otro, de acuerdo con su carga, fenómeno que se conoce como *migración iónica*. En estas condiciones, se puede considerar a la disolución como un conductor electrónico homogéneo que sigue la Ley de Ohm.

Un electrolito fuerte existe en disolución casi por completo en la forma de iones. La mayoría de los sólidos iónicos que se disuelven en agua entran en la disolución casi totalmente como iones, por lo que son electrolitos fuertes. La disolución de cloruro de sodio en agua es:



El agregado de un electrolito a una solución de otro electrolito bajo condiciones que no producen un cambio apreciable en el volumen, afectará la conductancia de la solución dependiendo de si ocurren o no reacciones químicas. Si no ocurre una

reacción iónica, tal como en el agregado de una sal simple a otra (por ejemplo, agregado de cloruro de potasio a una solución de nitrato de sodio), la conductancia simplemente aumentará. Si ocurre una reacción iónica, la conductancia puede aumentar o disminuir; en efecto, con el agregado de una base a un ácido fuerte, la conductancia decrece debido al reemplazo del ion hidrógeno de alta conductividad por otro catión de conductividad más baja.

La localización de un electrodo de conductividad en el proceso es crítica, porque la distribución de sales disueltas en un volumen líquido puede cambiar si el mezclado se aleja de la idealidad. Esta apreciación, sin embargo, es válida para el diseño de la localización de prácticamente cualquier instrumento.

Se debe tener control de la temperatura del proceso ya que la dilatación térmica y la aceleración del movimiento browniano afectan la conductividad. Frecuentemente, es suficiente con sumergir la celda en un baño razonablemente grande de agua mantenido a temperatura ambiente. Claramente, aunque es necesaria una temperatura constante, no es importante controlarla en un valor específico (Brunati y De Napoli, 2010).

Variables que afectan la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material de transportar carga eléctrica, y esta medida nos proporciona una medida directa del comportamiento iónico en las soluciones electrolíticas. La conductividad eléctrica se puede ver afectada por:

- Temperatura
- Concentración de electrolitos
- Contenido químico
- Viscosidad
- Fuerzas eléctricas
- Sólidos suspendidos
- Estructuras celulares presentes

Es por todas estas variables que la conductividad eléctrica es un indicador de cambios en sistemas alimenticios, y por lo que se utilizará como una medida de la concentración de sal en la mezcla final.

1.2.6.7. Colorimetría

La CIE (Comisión Internacional de Iluminación) define el color en base a tres conceptos: color físico, color percibido y color psicofísico. Un estudio del color que proporcione una medida objetiva del mismo (color físico) y tenga en cuenta la respuesta del observador (color percibido), para establecer, un control de calidad de la proporción de un rastreador en una mezcla, deberá ser un estudio psicofísico.

El color psicofísico tiene por objeto relacionar el color físico con el percibido. Se trata de cuantificar la sensación llegada al cerebro desde las células fotorreceptoras, provocada por un determinado estímulo luminoso, en términos de la cantidad de rojo, verde y azul de dicho estímulo. Esta cuantificación se realiza a través de coordenadas de color, que representan la respuesta de cada cono al estímulo recibido. Estas respuestas dependerán del estímulo luminoso exterior y de la respuesta del ojo.

Los intentos de uniformizar escalas de color se basan en estrechar la separación cromática en la zona de los verdes y alargarla en la zona de los azules. Entre estos espacios uniformes de color, uno de los más utilizados en el área de la tecnología de los alimentos es el espacio CIE $L^* a^* b^*$, representados en la Figura 8:

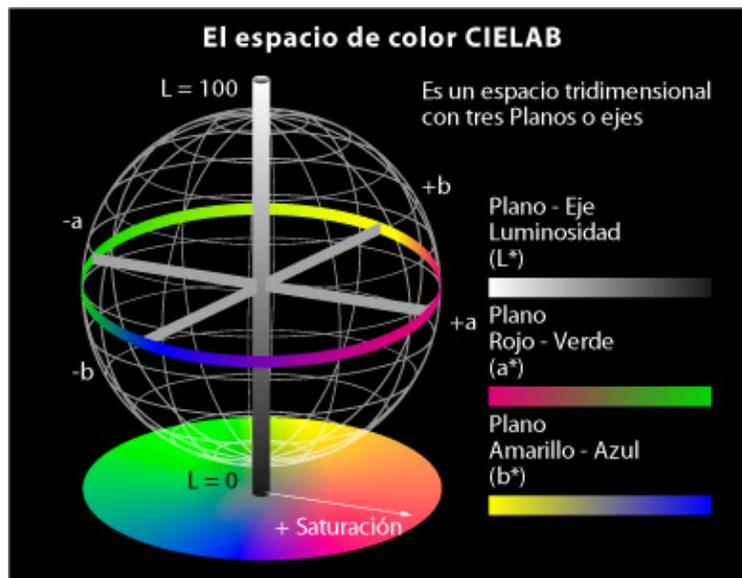


Figura 8. Espacio de color CIE L*a*b* (www. cala.unex.es)

El espacio de color CIELAB es un sistema coordenado cartesiano definido por tres coordenadas colorimétricas L^* , a^* , b^* , magnitudes adimensionales; la coordenada L^* es el eje vertical que recibe el nombre de Claridad o Luminosidad (métrica) y puede tomar valores entre 0 para negro hasta 100 para un blanco (los colores fluorescentes pueden dar un valor de L^* mayor que 100), a^* es uno de los dos ejes horizontales y representa una medida del contenido de rojo o de verde de un color y define la desviación del punto acromático correspondiente a la Claridad, hacia el rojo si $a^* > 0$, hacia el verde si $a^* < 0$. Análogamente, la coordenada b^* es el otro eje horizontal, perpendicular al eje a^* ; define la desviación hacia el amarillo si $b^* > 0$, hacia el azul si $b^* < 0$ (Chiralt, 2007).

Cuando estas coordenadas se convierten realmente importantes es cuando queremos obtener numéricamente las diferencias de color. Para describir una diferencia de color numéricamente, es necesario que los valores tomados como referencia (el estándar y los valores del objeto cuya diferencia de color se desea conocer la muestra); para tal fin se utiliza el valor calculado ΔE que se define como la magnitud de la diferencia de color existente entre las dos muestras, pero no da ninguna información del tipo de diferencia. Su cálculo está dado por:

$$\Delta E^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2} \quad (\text{ec.13})$$

Dónde:

ΔL^* = Diferencia de lectura coordenada L^* muestra patrón y muestra estudiada

Δa^* = Diferencia de lectura coordenada a^* muestra patrón y muestra estudiada

Δb^* = Diferencia de lectura coordenada b^* muestra patrón y muestra estudiada

Sólo si ΔL^* es positivo la muestra de ensayo es más clara que la referencia; si es más negativo será más oscura (Gilabert, 2002).

1.2.6.8. Microscopía

La microscopía se utiliza como herramienta en la evaluación de la calidad de los alimentos, además de estudiar la influencia de los ingredientes y las condiciones de procesado en la estructura de los alimentos. Al mostrar la distribución y el estado físico de los constituyentes, el microscopio óptico suministra una explicación visual de por qué alimentos con composición química similar, poseen texturas muy diferentes.

Un principio importante en la microscopía de los alimentos es que las muestras deben manipularse lo menos posible. También se necesita rapidez porque las técnicas para observar cambios durante el procesado de los alimentos pueden utilizarse para monitorizar los tratamientos (Flint, 1996).

Las variedades de microscopios poderosos existentes hoy en día marcan la diferencia para la obtención de un mejor resultado, vienen dados desde lentes con alta potencia hasta algunos con facilidades de fotografía incluida y que en la mayoría de experimentos tienen un margen restrictivo.

La calidad del sistema de lentes determina la corrección en las aberraciones y la precisión de los resultados finales. La resolución que es esperada está en función de la calidad de los lentes. El objetivo es el lente más importante y existen diferentes alternativas para este.

Los objetivos están considerados los elementos más importantes en la formación de la imagen microscópica, ya que estos sistemas de lentes establecen la calidad

de la imagen en cuanto a su nitidez y la capacidad que tiene para captar los detalles de la misma (poder de resolución). Están constituidos también por un juego de lentes, en este caso, convergente y divergente, para eliminar, en la medida de lo posible, una serie de aberraciones que afectarían la calidad de las imágenes formadas.

Los objetivos se fabrican para ampliar las imágenes de los objetos observados en diversos aumentos; así se tienen objetivos con aumentos propios de 3.5x, 4x, 10x, 25x, 40x, 65x y 100x. Los objetivos también se clasifican de acuerdo al medio que existe entre el objeto examinado y la lente frontal del objetivo. De acuerdo a esta característica son secos o de inmersión. Son objetivos secos aquellos que entre el objeto observado y el objetivo solamente existe el aire; en cambio se denominan objetivos de inmersión aquellos que requieren que entre la preparación y la lente frontal del objetivo se coloque una sustancia líquida, ésta puede ser agua, glicerina o un “aceite de inmersión”, natural como el “aceite de cedro” o aceites artificiales (Flint, 1996).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La experimentación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio Experimental Multidisciplinario II, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, Nave 2000 de Ingeniería en Alimentos.

2.1. Problema

Lograr un producto granular de uso alimentario a base de sal y ácido cítrico, con un índice de mezclado cercano a 1, evaluando las condiciones de operación de mezclado de tiempo, velocidad de rotación, diámetro de partícula y consumo de energía.

2.2. Hipótesis

En la operación de mezclado de polvos en alimentos las propiedades físicas como lo son el tamaño, densidad, forma y cohesividad de un material al tener más similitudes entre sí se favorece la uniformidad de una mezcla final; esto se debe a los mecanismos de convección, difusión y corte presentes durante la operación, además de las fuerzas presentes entre las partículas pulverulentas; si estas propiedades y fuerzas existentes en la mezcla presentan diferencias entre ellas, se producirá el fenómeno de segregación o formación de conglomerados y el mezclado se verá desfavorecido. En la evaluación del grado de uniformidad de diferentes muestras en la mezcla y el posterior cálculo de la desviación standard de cada una de estas muestras sucesivas. A medida que la uniformidad de la mezcla aumenta el valor de la desviación standard disminuye; es así que la mezcla de ácido cítrico y sal será favorecida con una similitud de tamaño de partícula de los materiales, además de tener un tiempo y velocidad menores que evitarán la segregación o conglomeración, con ello se garantizará un valor de índice de mezclado cercano a 1 a bajos costos energéticos en cortos tiempos de mezclado.

2.3. Objetivo general

Evaluar una mezcla granular de uso alimentario (sal-ácido cítrico) por medio del estudio de las propiedades físicas y químicas de los diferentes componentes de la muestra y la variación de las variables de operación como son: tiempo de mezclado, velocidad de rotación y diámetro de partícula inicial, para la obtención de un índice de mezclado cercano a 1 con bajos consumos de energía.

2.4. Objetivo particular 1

Evaluar la influencia del tamaño de partícula durante el mezclado del producto granular a partir de la definición de dos tamaños de partícula (gruesos y finos) para la sal por medio del tamizado del material.

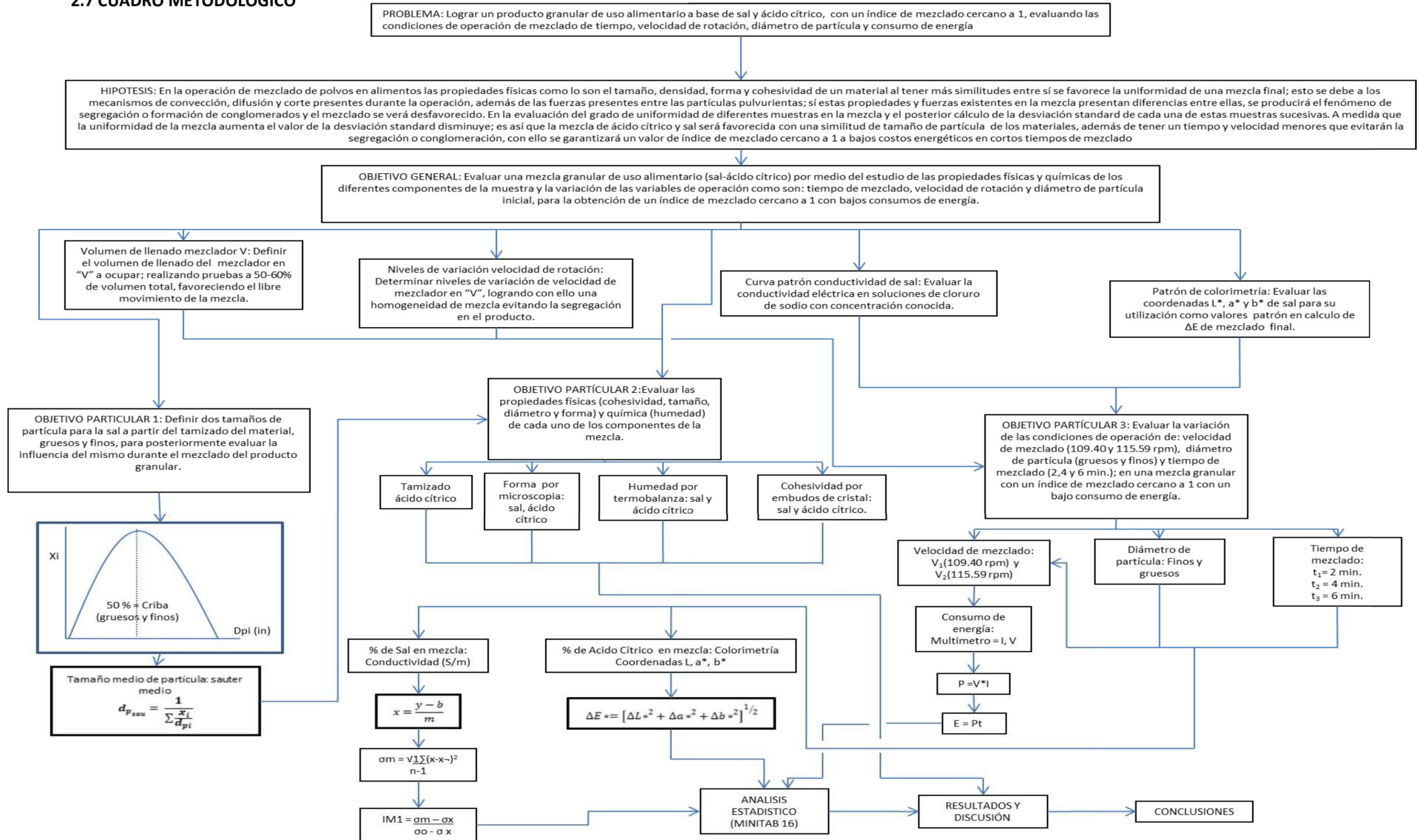
2.5. Objetivo particular 2

Evaluar las propiedades físicas (cohesividad, tamaño, diámetro y forma) y química (humedad) de cada uno de los componentes de la mezcla.

2.6. Objetivo particular 3

Evaluar la variación de las condiciones de operación de: velocidad de mezclado (109.40 y 115.59 rpm), diámetro de partícula (gruesos y finos) y tiempo de mezclado (2,4 y 6 min.); en una mezcla granular con un índice de mezclado cercano a 1 con un bajo consumo de energía.

2.7 CUADRO METODOLOGICO



2.8. ACTIVIDADES PRELIMILARES

2.8.1. Volumen de llenado mezclador V

Se estableció el volumen de producto a utilizar durante la experimentación con sal, ya que representa al componente mayoritario en la mezcla (98%) dentro del equipo, posteriormente, se procedió en base al pesaje total del llenado del mezclador a definir el 50% y 60% de volumen aunado con el libre giro del mezclador en V en momento de marcha.

2.8.2. Niveles de variación velocidad de rotación

Se definieron los valores de los niveles de variación de velocidad a utilizar del mezclador en "V"; midiendo las rpm generadas por el equipo 30 veces por medio de un tacómetro a los 3 niveles donde se observaron cambios en la velocidad del mezclador posteriormente se colocó una etiqueta en el control de velocidad ya que el equipo no contaba con tal señalamiento, con los valores cuantitativos medidos, se procedió al cálculo del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos.

2.8.3. Curva patrón para la conductividad de sal

Como se mencionó anteriormente en los antecedentes la conductividad es la medida de las sales presentes en una solución acuosa expresada como corriente eléctrica, esta es útil ya que refleja la salinidad total de una solución y los cambios debidos a la introducción de algún otro soluto; con la anterior definición se procedió a la medición de la conductividad eléctrica presente en soluciones de cloruro de sodio con concentraciones conocidas [1.0 - 0.1 g sal comercial]; con los resultados obtenidos se graficó una curva patrón para su posterior utilización en la evaluación del contenido de sal en las muestras de la mezcla (sal y ácido cítrico); con las mediciones de conductividad se calculó el Índice de Mezcla final de las muestras.

Se realizó en primera instancia la calibración del equipo según lo establecido por el manual del Sensor Medidor de Conductividad (con celda de conductividad)

marca Philip Harris Modelo E30060/9; que establece realizar una disolución de Cloruro de Potasio con una pureza del 99.9 % al 0.1 mol/dm a una temperatura de 22 °C, en la cual se estableció una lectura del sensor igual a la tabla establecida en el manual de operación del equipo; logrando con tal acción un grado de confianza mayor de las lecturas finales de conductividad presentes de las mezclas a evaluar.

Posteriormente se pesaron muestras de sal de 1.0 - 0.1 g, después se diluyeron cada 0.1 g en 50 mL de agua destilada hasta llegar a 1.0 g de sal, con esto se tenían un total de 10 muestras por cada ensayo de conductividad, se procedió a medir la conductividad eléctrica presente en cada una de las muestras utilizando el Sensor Medidor de Conductividad Eléctrica, en el momento de realizar la medición de conductividad de la muestra se sumergía el sensor cubriendo toda la celda y se tomaba la lectura en una escala de 0 a 10 S/m dentro de una probeta de 100 mL, se verificaba que la temperatura estuviera dentro de un margen de 20 a 22 °C durante la experimentación, posteriormente se tenía la precaución de sumergir el sensor con agua destilada a temperatura ambiente.

Se realizaron 5 repeticiones de cada concentración, con los datos obtenidos concentración de sal, se realizó el tratamiento de los mismos por medio de un análisis simple de la varianza (ANOVA), por medio del programa Minitab 16, además del cálculo de desviación estándar y coeficiente de variación, de los valores de conductividad. Posteriormente se construyó el gráfico de concentración de sal vs conductividad eléctrica de solución y se calculó la regresión lineal para cada ensayo (ec.14).

$$y = mx + b \quad (\text{ec.14})$$

Dónde:

y = Variable dependiente (Lectura conductividad S/m)

x = Variable independiente (Concentración de sal g/mL)

m = Pendiente de la recta

b = Ordenada al origen (Conductividad sin concentración de sales)

Se usara solo un despeje de la ecuación de regresión lineal (ec.15), obtenido de alguna de las 5 repeticiones realizadas para el cálculo de concentración de ácido cítrico de la mezcla (sal-ácido cítrico), finales a diferentes condiciones de operación y con este dato calcular el índice de mezclado final (ec.13):

$$x = \frac{y-b}{m} \quad (\text{ec. 15})$$

Dónde:

x = Concentración de sal g/mL

y = Conductividad solución (S/m)

m = Pendiente de la recta

b = Ordenada al origen (Conductividad sin concentración de sales)

2.8.4. Patrón de colorimetría

Se evaluaron las coordenadas L^* , a^* y b^* de una muestra de sal utilizando el colorímetro MINOLTA y con los resultados se calculó el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación, para cada una de las coordenadas.

Como se mencionó con anterioridad en los antecedentes ΔE representa el valor de la magnitud para la diferencia de color calculado entre dos muestras a estudiar, por lo que los valores de lectura de las coordenadas L^* , a^* y b^* promedio obtenidas para la sal se utilizaron como valores patrón en el cálculo del ΔE de las muestras del mezclado de sal-ácido cítrico del objetivo particular 3.

Esta actividad se realizó con la finalidad de establecer un valor numérico de la diferencia del color (sal pura/mezcla final); para con ello poder analizar cuál de las variables de operación evaluadas durante el mezclado está influyendo con mayor significado sobre la cantidad de ácido cítrico presente en la muestra final.

2.9. OBJETIVOS PARTICULARES

2.9.1. Objetivo particular 1:

Evaluar la influencia del tamaño de partícula durante el mezclado del producto granular a partir de la definición de dos tamaños de partícula (gruesos y finos) para la sal por medio del tamizado del material.

Para cubrir este objetivo, se realizó el tamizado de 100 g de sal marca Great Value lote 230A6BB, por medio del arreglo de tamices de Serie Tyler no rigurosa que se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4. Serie Tyler no rigurosa utilizada para el tamizado de sal.

Malla	Abertura (in)
10	0.0787
20	0.0331
28	0.0232
35	0.0165
48	0.0117
65	0.0083
Charola	-

Posteriormente, se realizó el cálculo de X_i y D_{pi} , para lo cual se utilizaron las ecuaciones 14 y 15; ocupando los datos obtenidos del pesaje de los tamices tanto vacíos como después del tamizado del producto.

$$x_i = \frac{(\text{Peso retenido} - \text{Peso de tamiz})}{\text{Peso total de la muestra}} \quad (\text{ec.16})$$

$$D_{pi} = \frac{\text{Abertura de tamiz superior} + \text{Abertura de tamiz inferior (in)}}{2} \quad (\text{ec.17})$$

Posteriormente con los datos calculados, se procedió a la elaboración del gráfico acumulativo y diferencial de X_i vs D_{pi} para cada corrida realizada.

2.5.2. Objetivo particular 2:

Evaluar las propiedades físicas (cohesividad, tamaño de partícula, diámetro de partícula y forma) y humedad de cada uno de los componentes de la mezcla.

Humedad. Se realizó la prueba de contenido de humedad para la sal y ácido cítrico utilizando una Termobalanza OHAUS modelo MB45 a 100 °C, se introdujo la muestra a analizar, se inició la lectura a las condiciones ya mencionadas y para detener la prueba se esperó hasta que el dato del equipo de % humedad permaneció constante. Se realizaron tres ensayos con cada componente de la mezcla a realizar y con los datos obtenidos se calcularon promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

Tamaño de partícula. Se utilizaron los datos del tamizado de sal del objetivo particular 1 y se realizó un tamizado con el mismo arreglo de tamices para la Serie Tyler no rigurosa del ácido cítrico. Se realizó el análisis granulométrico de cada materia prima, con los datos resultantes se elaboró un gráfico diferencial de X_i vs D_{pi} .

Diámetro medio. Con la tabla de análisis granulométrico del objetivo particular 1 y del tamizado del ácido cítrico se determinó el Sauter medio de cada material, utilizando la ecuación 9, citada en la p. 42.

Forma. Se realizó un ensayo con el cual se estandarizó la cantidad de sal y ácido cítrico que ocupaban 1 cm^2 , teniendo la precaución de que no se tuvieran gránulos apelmazados para ello se utilizó un Microscopio Binocular marca Olympus Modelo CX-31RB SFA. Se contabilizaron los gránulos en la muestra, después de repetir la medición 30 veces por medio de la toma de la muestra con una espátula y medida del peso, se calcularon promedio, desviación estándar y coeficiente de variación; ya con el peso establecido de la muestra se procedió a la observación en microscopio utilizando el objetivo 10 x del equipo, de las materias primas en un porta objetos, en el cual se había definido un área de un cuadrado de $1 \times 1\text{ cm}$, dividiéndolo en cuadrícula de 1 mm .

Debido a que en el momento de identificar la forma de cada partícula dentro de la mezcla final, el ácido cítrico era muy difícil de distinguir; se tomó la decisión de colorearlo con ayuda de colorante vegetal rojo, logrando con esto una fácil identificación en las muestras finales.

Cohesividad. Se realizó la prueba de tolvas de cristal para partículas de polvos alimenticios, en donde se utilizan diferentes diámetros (Figura 9), se hicieron pasar los polvos por cada una de las tolvas, colocando en un soporte universal las tolvas a una altura de 10 cm de la superficie de caída y se llenaron las tolvas a la mitad de su capacidad (Klein, 1981), entre menos problema tuvieron en pasar menos cohesivos fueron. Esta prueba se repite 3 veces para cada materia prima.

Tabla 5. Diámetros de tolvas de cristal para prueba de cohesividad.

TOLVA	DIAMETRO (mm)
1	2.5
2	5.0
3	8.0
4	12.0
5	18.0



Figura 9. Imagen de tolvas utilizadas en prueba de fluidez de materias primas.

2.5.3. Objetivo particular 3:

Evaluar la variación de las condiciones de operación de: velocidad de mezclado (109.40 y 115.59 rpm), diámetro de partícula (gruesos y finos) y tiempo de mezclado (2,4 y 6 min.); en una mezcla granular con un índice de mezclado cercano a 1 con un bajo consumo de energía.

Se empleó un mezclador en V, este constó de un cuerpo móvil dividido en dos brazos de acero, accionado con un interruptor para su giro en 360°.

En la Figura 10, se muestra el equipo ocupado durante la experimentación, con sus respectivas medidas y una capacidad de carga para cada brazo de: 5195.42 cm³.

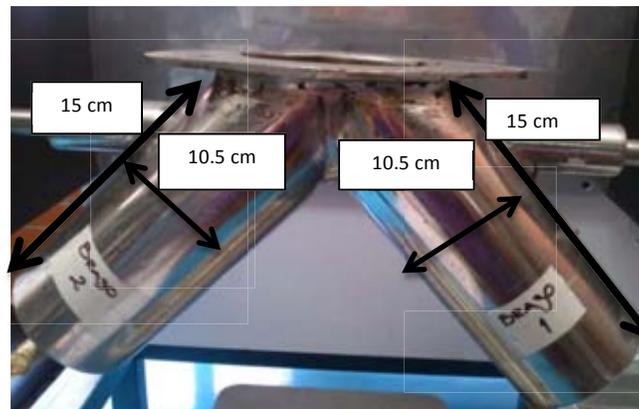


Figura 10. Mezclador en "V" utilizado en experimentación.

El mezclado se efectuó utilizando 98% de sal con 2% de ácido cítrico, en un inicio se tomó el voltaje inicial del equipo por medio de un multímetro de gancho, se inició la rotación, se tomó la intensidad en Amperes cada 10 s y se detenía el equipo en tiempo de 2, 4 y 6 minutos, el intervalo de tiempo se determinó después de un barrido a 5, 10 y 15 minutos, en el cual se observó que el equipo se forzaba con la carga dentro del mismo, por lo cual se realizó el siguiente barrido a intervalos más pequeños y el equipo trabajó de manera estable; en el momento de detener el equipo a estos tiempos, se realizó la toma de muestra del brazo 1 y brazo 2 por medio de una bayoneta de metal procurando que esta muestra fuese

representativa del experimento; se dividieron las muestras en función a la siguiente posición de la bayoneta (ver Figura 11):

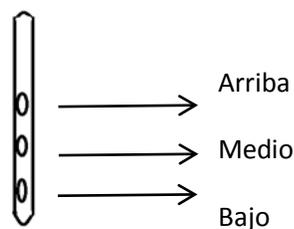


Figura 11. Bayoneta de muestreo.

Se realizó la evaluación del color y la conductividad, a 216 muestras resultantes del mezclado de sal y ácido cítrico.

Posteriormente se calculó el IM_1 para las diferentes condiciones de trabajo utilizadas durante la experimentación; para describir la metodología utilizada para la obtención de IM_1 , se utilizan las composiciones de cada una de las muestras puntuales expresadas en fracción de ácido cítrico. A continuación se presenta un ejemplo de la secuencia de cálculo utilizada para cada muestra del mezclado de sal-ácido cítrico:

Tabla 6. Concentración de ácido cítrico de las muestras puntuales.

Ácido Cítrico (g)	Ácido Cítrico (%)
0.038	6.63
0.000	0.00
0.046	6.60
0.000	0.00
0.020	2.91
0.008	1.17

Secuencia de cálculo:

1. Se obtiene la concentración media del ácido cítrico de las muestras puntuales que viene dada por:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{n} \right) \quad (\text{ec. 2})$$

$$\bar{x} = \frac{(6.63 + 0 + 6.60 + 0 + 2.91 + 1.17)}{6} = 2.89$$

Dónde:

x_i = Concentración de ácido cítrico en muestras puntuales

n = Número de muestras individuales que en este caso son 6

2. Se determinó la desviación estándar de las muestras, que está definida por la expresión:

$$\sigma_m = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{ec.1})$$

Dónde se obtienen los resultados de la Tabla 7:

Tabla 7. Resultados calculo $(x_i - \bar{x})^2$

$(x_i - \bar{x})^2$
$(6.63 - 2.85)^2$
$(0 - 2.85)^2$
$(6.60 - 2.85)^2$
$(0 - 2.85)^2$
$(2.91 - 2.85)^2$
$(1.17 - 2.85)^2$
$\Sigma = 47.42$

Por lo anterior:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{47.42}{6-1}} = 3.08$$

3. Se calcula el valor de p_1 de la siguiente manera:

$$p_1 = \frac{\text{cantidad del componente mayoritario}}{\text{cantidad total de la mezcla}} \quad (\text{ec.8})$$

$$p_1 = \frac{695.03 \text{ g}}{695.03 \text{ g} + 14.18 \text{ g}} = 0.98$$

Dónde los 695.03 g corresponden la cantidad de sal en la mezcla y los 14 g restantes del ácido cítrico.

4. Posteriormente se calcula el valor de la desviación estándar para “mezclado cero”, a partir de la(ec.6):

$$\sigma_0 = \sqrt{(p_1(1 - p_1))} \quad (\text{ec.6})$$

Dónde:

σ_0 = Desviación estándar para un tiempo de mezclado cero

p_1 = Fracción del componente p en una muestra puntual

$$\sigma_0 = \sqrt{(0.980(1 - 0.980))} = 0.14 = 14 \%$$

5. Calculo de la desviación estándar para una mezcla perfecta:

$$\sigma_\infty = \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \quad (\text{ec.7})$$

Dónde:

N = Número de partículas

Según lo reportado por Aguado, 2003, es recomendable usar $\sigma_\infty = 0.001$ el cual considera una mezcla perfecta, en este caso el valor se trabajó en porcentaje debido a la mezcla realizada durante la experimentación.

6. A partir de los valores σ_m , σ_∞ y σ_0 , se calculó el índice de mezclado (IM_1), que está definido por:

$$IM_1 = \frac{\sigma_0 - \sigma_m}{\sigma_0 - \sigma_\infty} = \frac{14 - 3.08}{14 - 0.001} = 0.78 \quad (\text{ec.3})$$

Posteriormente utilizando los resultados del cálculo de IM de la mezcla final se realizó el tratamiento estadístico por medio del software Minitab 16. Se utilizó un diseño factorial de múltiples niveles debido al diseño experimental realizado, representado en la Tabla 8, obteniendo con su aplicación dos gráficos (interacciones y efectos principales IM) que muestran la forma en la que las variables de operación afectan el valor final de IM de la mezcla sal-ácido cítrico.

Tabla 8. Diseño factorial de múltiples niveles utilizado para análisis estadístico por medio de programa Minitab 16 para datos de IM.

Factor	Nivel	Valor
Velocidad	2	109.4 rpm, 115.59 rpm
Diámetro	2	Grueso, Fino
Brazo	2	1,2
Tiempo	3	2,4,6 minutos

Al igual que en los valores de concentración, se utilizó un diseño factorial de múltiples niveles debido al diseño experimental realizado, representado en la Tabla 9, obteniendo con su aplicación el gráfico de efectos principales ΔE , que muestran la forma en la que las variables de operación afectan el valor final del ΔE de la mezcla sal-ácido cítrico.

Tabla 9. Diseño factorial de múltiples niveles utilizado para análisis estadístico por medio de programa Minitab 16 para datos de ΔE .

Factor	Nivel	Valor
Velocidad	2	109.4 rpm, 115.59 rpm
Diámetro	2	Gruesos, Finos
Brazo	2	1,2
Tiempo	3	2,4,6 minutos
Posición	3	Arriba, medio, bajo

Se utilizó un diseño factorial de múltiples niveles, representado en la Tabla 10, con el software Minitab 16, obteniendo con su aplicación gráficos que muestran como las variables de operación afectan el valor final del consumo de energía.

Tabla 10. Diseño factorial de múltiples niveles utilizado para análisis estadístico por medio de programa Minitab 16 para datos consumo de energía.

Factor	Nivel	Valor
Velocidad	2	109.4 rpm, 115.59 rpm
Diámetro	2	Gruesos, Finos
Tiempo	3	2,4,6 minutos

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1.1. Volumen de llenado mezclador V

Se realizaron dos pruebas en las cuales se pesaron 709.20 g (60%) y 591.0 g (50%) de sal. En el momento de accionar el equipo se observaba la forma de giro del mezclador para que no presentara ningún paro en el momento de marcha a diferentes niveles de velocidad. Se apreció que en el momento de colocar la cantidad de sal correspondiente al 50% de llenado, el equipo presentaba cambios en su velocidad de giro y mostraba un paro después de cierto tiempo en comparación al de 60% de llenado donde no se generaban paros ni cambios en la velocidad del giro; por lo tanto se eligió este último para la experimentación.

3.1.2. Niveles de variación velocidad de rotación

En la Tabla 11 se muestran los resultados estadísticos promedio de 30 repeticiones para la evaluación de velocidad de giro del mezclador en V a 3 niveles de variación. Se decidió utilizar el nivel 2 y 3, debido a que en el nivel 1 el equipo generó un paro en el momento de tener producto dentro del mismo.

Tabla 11. Valores promedio de 30 repeticiones de los 3 niveles de variación de velocidad para el mezclador en V.

NIVEL	PROMEDIO (rpm)	DESVIACIÓN ESTANDAR	C.V. (%)
1	88.34	4.17	4.73
2	109.42	4.31	3.94
3	115.69	3.27	2.83

Se concluye con los resultados mostrados en la Tabla 11, que el nivel 1 (88.34 rpm) presenta el coeficiente de variación mayor por 0.79 en comparación del nivel 2 (109.42) y 1.90 con respecto al nivel 3 (115.69) en base a su media, por tal motivo como los datos están más alejados de su media se descarta esta velocidad.

3.1.3. Curva patrón conductividad de sal

En la Figura 12 se muestran las curvas resultantes de los 5 ensayos realizados para conductividad eléctrica de soluciones de sal a concentración conocida obtenidas por medio del equipo Sensor Medidor de Conductividad, marca Philip Harris Modelo E30060/9; y las 5 ecuaciones de cada regresión lineal en la Tabla 12.

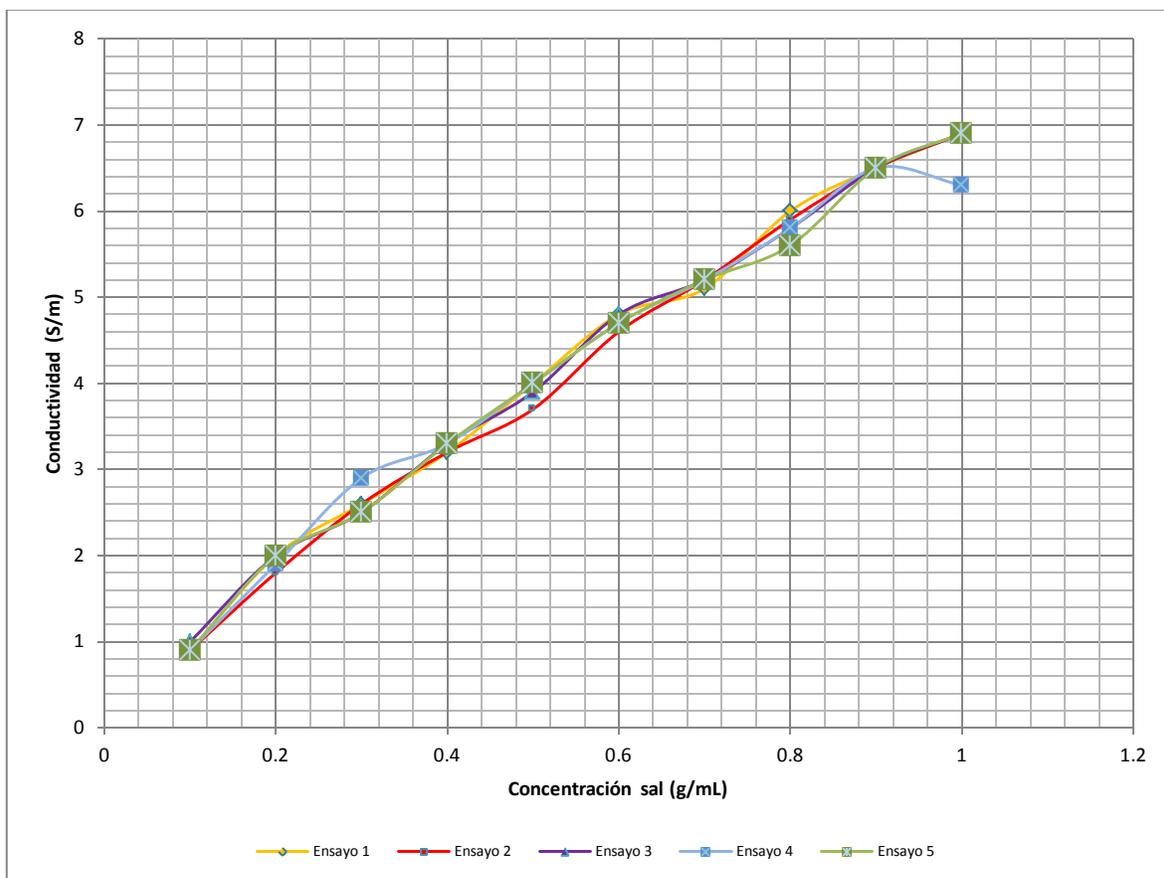


Figura 12. Gráfico de resultados de la Concentración de sal vs Conductividad.

Como se observa en la Figura 12, los ensayos no muestran comportamientos lejanos en sus puntos en el momento de graficar los resultados de cada concentración de sal vs conductividad de solución, ya que se tuvo el cuidado de controlar tanto el peso de las muestras que no tuviera diferencias de más de 3 dígitos, volumen de disolución controlado y control de temperatura, en el momento de medición de conductividad. Se calculó la regresión lineal en cada ensayo, para

posteriormente conocer la concentración en muestras después del mezclado a diferentes condiciones de operación; a continuación en la Tabla 12 se reporta cada ecuación para su ensayo correspondiente.

Tabla 12. Ecuaciones de la regresión lineal para cada ensayo del gráfico de concentración de sal vs conductividad eléctrica de solución.

ENSAYO	ECUACIÓN
1	$y = 6.606x + 0.566$
2	$y = 6.684x + 0.453$
3	$y = 6.527x + 0.600$
4	$y = 6.509x + 0.580$
5	$y = 6.684x + 0.453$

Se utiliza el programa MINITAB 16 para el análisis estadístico de los datos, ANOVA y Prueba de Tukey de 95% de confianza para los resultados de conductividad, como se mencionó con anterioridad.

Tabla 13. Resultados de prueba Tukey al 95% aplicada a los datos de concentración de sal vs conductividad eléctrica de solución.

ICs de 95% individuales para la media
basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
C1	10	4.200	2.009	(-----*-----)
C2	10	4.130	2.029	(-----*-----)
C3	10	4.190	1.982	(-----*-----)
C4	10	4.150	1.892	(-----*-----)
C5	10	4.160	1.979	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+
3.50 4.20 4.90 5.60

Desv.Est. agrupada = 1.979

Agrupar información utilizando el método de Tukey

N	Media	Agrupación
C1	10	4.200 A
C3	10	4.190 A
C5	10	4.160 A
C4	10	4.150 A
C2	10	4.130 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Como se observa en la Tabla 13, las medias de los ensayos de conductividad eléctrica a diferentes concentraciones de sal no tienen diferencias significativas apoyado esto por la prueba de Tukey; por lo cual se decidió utilizar la ecuación de regresión lineal del ensayo 1 (ver Tabla 12) y realizando un despeje de la variable “x”, para con ello establecer el modelo matemático a utilizar en el cálculo de la concentración de sal y ácido cítrico después del mezclado a diferentes condiciones de operación.

Realizando el despeje y sustitución de datos para la (ec. 15):

$$x = \frac{y-b}{m} \quad (\text{ec.15})$$

$$x = \frac{\text{Conductividad de la muestra} - 0.549}{6.606} \quad (\text{ec.18})$$

Se procedió a la sustitución de los datos para cada muestra de mezcla sal-ácido cítrico.

3.1.4. Patrón de colorimetría

En la Tabla 14 se muestran los resultados promedio de las lecturas de 30 repeticiones para coordenadas L*, a* y b*, obtenidas con el equipo Colorímetro MINOLTA con procesador de datos DP-301, de una muestra de sal al 100%; tales resultados promedio se utilizaron para el cálculo de ΔE de las muestras de mezclado final del Objetivo particular 3.

Tabla 14. Valores promedio L*, a* y b*, para sal sin ácido cítrico.

	L*	a*	b*
PROMEDIO	70.66	-0.41	0.10
DESV. EST.	0.20	0.02	0.02
C.V. (%)	0.28	3.35	2.48

Los valores de coeficiente de variación de las coordenadas L*, a* y b* tienen poca variabilidad entre los valores de las muestras con respecto a la media ya que están dentro del rango recomendable (88.34±4.17 % C.V.)

3.2. RESULTADOS DE OBJETIVOS PARTICULARES.

3.2.1. RESULTADOS DEL OBJETIVO PARTICULAR 1.

Se realizó el tamizado con el arreglo anteriormente mencionado. A partir del gráfico acumulativo, que se presenta en la Figura 13, se definió utilizar el tamiz de malla 40 (0.0165 in). En este gráfico se puede observar que en esta malla se obtuvo el 45 %, lo que significó separar a la sal, el componente mayoritario, en dos fracciones, la fina y la gruesa, que fue una de las variables independientes a utilizar.

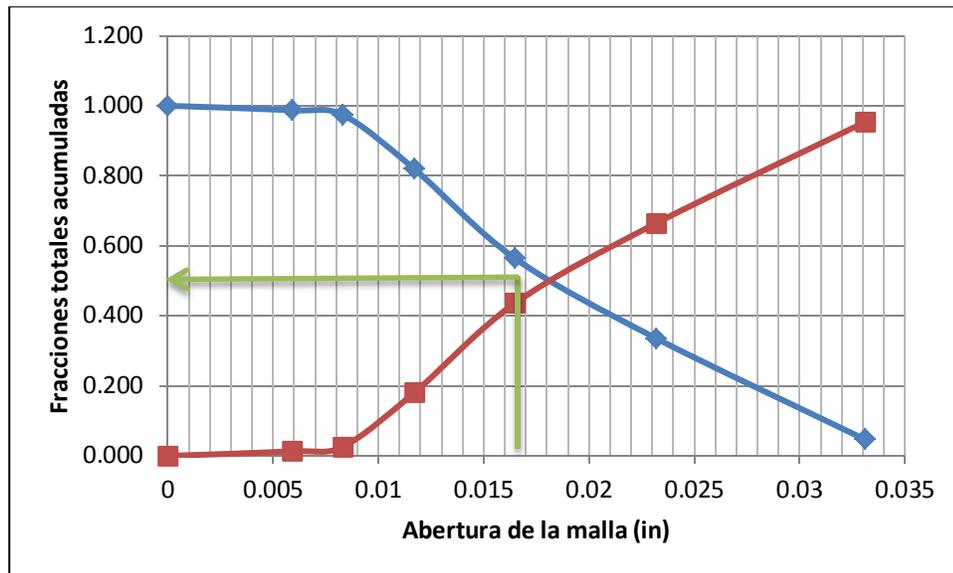


Figura 13. Grafico diferencial D_{pi} vs X_i de sal.

En la Figura 13, se observan los resultados graficados del tamizado de sal, durante la operación se tuvo fractura de la sal, sin embargo se cumplió con que en el Tamiz 40 se quedaba retenido el 45% de sal que se consideraron como gruesos y a lo pasado como finos.

3.2.2. RESULTADOS DEL OBJETIVO PARTICULAR 2.

3.2.2.1. Humedad de sal y ácido cítrico

La Tabla 15 muestra los valores medidos por medio del equipo de termobalanza para el contenido de humedad de las materias primas utilizadas:

Tabla 15. Valores de humedad por Termobalanza de materias primas.

No. MUESTRA	RESULTADOS % HUMEDAD	
	SAL	ÁCIDO CÍTRICO
1	0.00	0.36
2	0.02	0.36
3	0.00	0.30
PROMEDIO	0.00	0.34
DESV. EST.	0.01	0.04
C.V. (%)	0.00	1.19

Como se muestra en la Tabla 15, el % C.V. para el ácido cítrico está 10 veces más alejado de la media de las muestras en comparación con el de la sal; por lo tanto la humedad de la materia prima va a tender a ser mayor aumentando con esto las fuerzas presentes intermoleculares limitantes (Van der Waals, electrostáticas o humedad), y muy probablemente se tenga una formación de conglomerados dentro de la mezcla final. Esto es justificado debido a la historia de almacenamiento del material que no tiene un control adecuado de la humedad relativa del ambiente dentro de las instalaciones del laboratorio.

3.2.2.2. Tamaño de sal y ácido cítrico

En la Figura 14, se muestra la curva de distribución diferencial comparativa entre la sal y ácido cítrico tamizados.

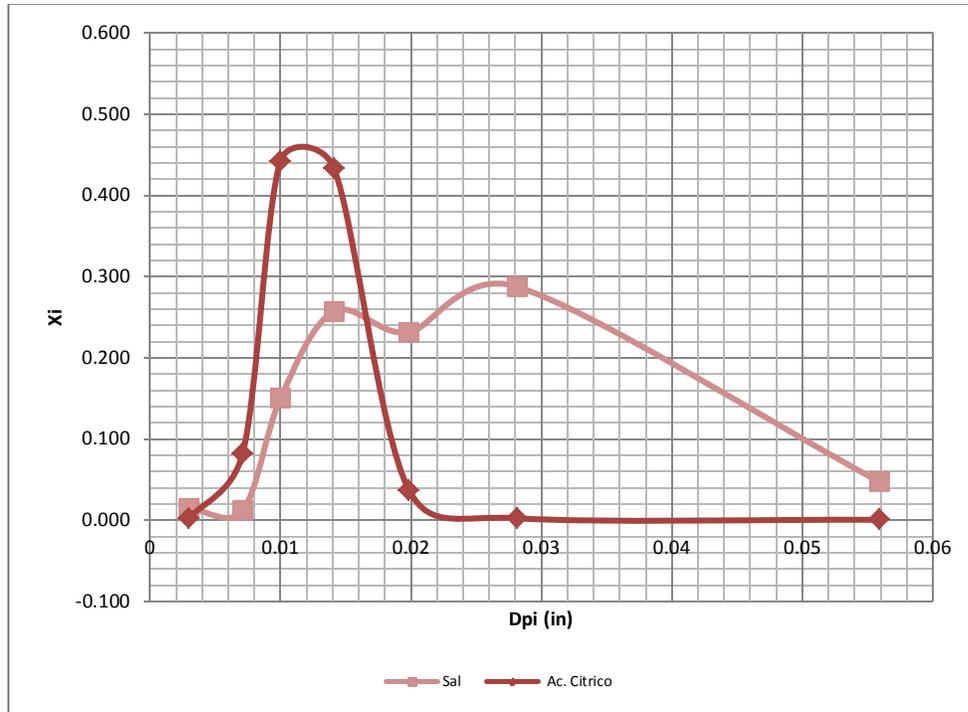


Figura 14. Curva comparativa de distribución diferencial de sal y ácido cítrico.

En la Figura 14, se observa la curva diferencial de sal presenta una población de tamaño de partícula mayor en comparación a la del ácido cítrico; esto podría significar problemas en el momento del mezclado según lo reportado por McCabe, (1995), ya que la diferencia de tamaños es la causa con mayor peso en el fenómeno de segregación durante el mezclado de partículas pequeñas; si este último proceso está presente en la muestra se tendría un mezclado y desmezclado, por lo tanto se verá reflejado en el resultado de índice de mezclado final.

3.2.2.3. Diámetro Sauter medio de sal y ácido cítrico

La Tabla 16 muestra los resultados del cálculo del diámetro Sauter medio por medio de la ecuación 9 (p.42-43):

Tabla 16. Resultados del cálculo de Diámetro Sauter Medio para ácido cítrico y sal respectivamente.

Ensayo	Diámetro Sauter Medio (in)	
	Ácido Cítrico	Sal
1	0.011	0.016
2	0.011	0.016
3	0.011	0.016
Promedio	0.011	0.016
Desv. Est.	0.000	0.000
C.V. (%)	0.000	0.000

Los diámetros no tuvieron variabilidad entre los mismos ensayos, sin embargo, entre las dos materias primas al compararlas el ácido cítrico es 0.005 veces menor con respecto a la sal, esto nos da un margen cercano de diferencia entre ambas partículas, pero no significativo para que los resultados del diámetro de las partículas finas presenten alguna segregación en el momento de la mezcla apoyado lo anterior con lo establecido por Lindley, (1991). Aunado con lo anterior, si se observa la Figura 14, corrobora los resultados obtenidos del cálculo para el diámetro, para esto se debe mencionar que las partículas de sal presentaron el fenómeno de quiebre de partícula después de la acción mecánica del tamizado como se había ya mencionado con anterioridad por tanto las partículas son aún más pequeñas después de tal acción, esto nos da una población de gruesos cercana a lo establecido en la Tabla 16 para la sal y una población aún mayor de finos después de la separación de la materia prima, por tanto la diferencia de tamaños entre la sal y ácido cítrico aumentó.

3.2.2.4. Forma de sal y ácido cítrico

Se observó bajo el microscopio Binocular Olympus Modelo CX-31RB SFA la forma rectangular con aspecto pardusco para el ácido cítrico y forma de prisma translucido para la sal, cabe mencionar que en la mezcla fue difícil la diferenciación entre ambas partículas, por lo que se utilizó color vegetal en el ácido cítrico para facilitarlos. La forma de las partículas participantes durante el mezclado es un factor decisivo para la presencia de segregación como lo estableció, Lindley, (1991); ya que en el momento de presentar diferentes formas pueden ser favorecidas en consecuencia, formación de enlaces químicos o posición en momento del mezclado dentro del equipo, en consecuencia tener un fenómeno de segregación presente al finalizar la operación, lo anterior afectará el resultado final del índice de mezclado.

3.2.2.5. Cohesividad de sal y ácido cítrico

La Tabla 17 muestra los resultados del paso por las tolvas de cristal de la sal y del ácido cítrico, los criterios de evaluación que se tomaron solo fueron visuales ya que no es de interés en este trabajo el cálculo de valores de fluidez propios de los materiales pulverulentos en la industria, solo se utilizó esta prueba para determinar un margen cualitativo de cohesividad en las materias primas.

Tabla 17. Resultados de paso por diámetro de tolvas de cristal de sal y ácido cítrico.

Tolva	Diámetro (mm)	Característica de paso por diámetro	
		ÁCIDO CÍTRICO	SAL
1	2.5	No paso el material	No paso el material
2	5.0	Paso de material	Pasa poco material
3	8.0	Paso de material	Paso de material
4	12.0	Paso de material	Paso de material
5	18.0	Paso de material	Paso de material

Como se observa en la Tabla 17, el material que presentó menos paros en el momento de paso por todos los diámetros de las tolvas de cristal fue el ácido cítrico, ya que la sal tuvo libre paso solo a partir de la tolva de 8 mm, para la sal presentaba un apelmazamiento en los diámetros de 2.5 y 5.0 mm, lo anterior se debe en parte a que el material con mayor diámetro establecido en la actividad 2.6.6.3., es la sal, consiguientemente su cohesividad (tendencia de las partículas a permanecer unidas) son mayores en este material por lo tanto el fenómeno de aglomeración pudiese ser favorecido principalmente en la mezcla de finos según lo señalado por Orr y Sallam, 1978, ya que estas partículas en el momento de ser sometidas al movimiento del giro del equipo caen bajo fuerzas de compactación y empiezan a formar conglomerados dentro de la mezcla final y afectar directamente la homogeneidad.

3.2.3. RESULTADOS DEL OBJETIVO PARTICULAR 3.

3.2.3.1. Resultados de Índice de Mezcla sal-ácido cítrico

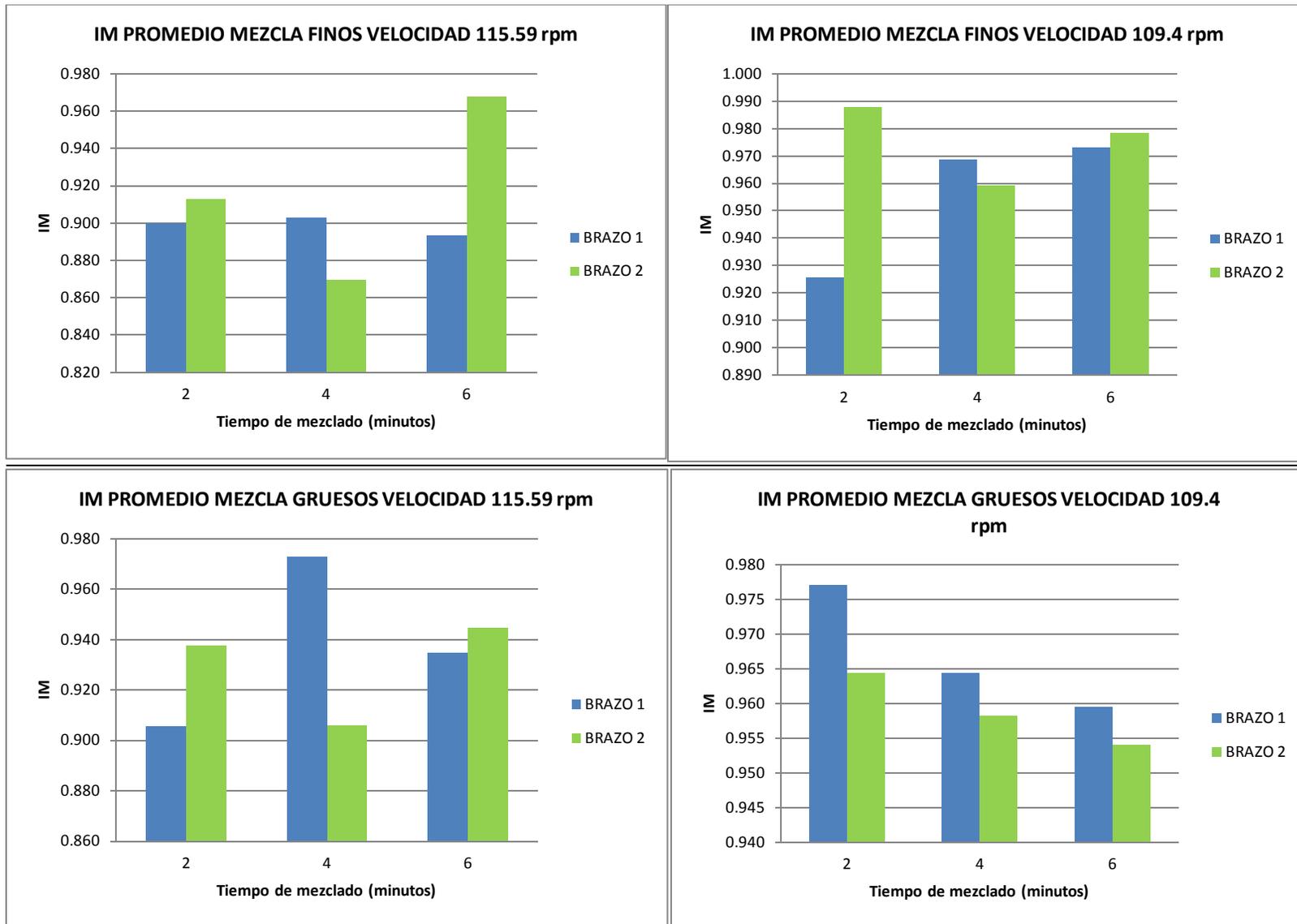


Figura 15. Gráficos de los resultados calculados de Índice de Mezclado promedio.

Como se observa en la Figura 15 al comparar los gráficos de resultados de IM promedio en velocidad de 115.59 rpm de partículas tanto para gruesos como finos, al inicio del mezclado son cercanos a 0.91 para los dos brazos siguiendo la operación, se observa una mejoría de 0.70 del valor de IM promedio de las muestras con respecto a los valores promedio calculados del tiempo de 2-4 minutos, para el brazo 1, posteriormente existe una decaída en el intervalo de 4-6 minutos de 0.041 de IM promedio; sin embargo para el brazo 2 en un inicio a tiempo 2 minutos se alcanzan valores de 0.94 de IM promedio de las muestras, posteriormente coexiste un descenso en los valores de 2-4 minutos de 0.04 del valor de IM promedio y en el lapso de 4-6 minutos hay un aumento del 0.023 de IM promedio, debido a estos datos se puede decir que está presente un fenómeno de desmezclado en la mezcla tanto en finos como en gruesos ya que los valores de IM promedio están siendo afectados con respecto al tiempo.

Con respecto a los gráficos de los resultados comparados de los datos de IM promedio en la velocidad de 109.4 rpm de partículas; en el mezclado de finos existe un aumento paulatino aproximado de 0.045 en los valores calculados de IM hasta un valor de 0.97 en el brazo 1, con respecto al brazo 2 en el tiempo de 2 minutos se alcanza el valor más cercano a 1 de IM promedio (0.99), en el intervalo de 2-4 minutos disminuye el valor de IM promedio en un 0.09 y al llegar el mezclado a 6 minutos el IM promedio se ve favorecido en un 0.005; en el brazo 2 existe un mezclado y desmezclado ya que los valores de IM promedio no siguen una tendencia positiva. En el caso de la mezcla de gruesos ambos brazos siguen una predisposición a la disminución empezando en el brazo 1 en tiempo 2 minutos con valores de IM promedio de 0.98 hasta en el tiempo de 6 minutos alcanzar un IM promedio de 0.96; con respecto al brazo 2 en el tiempo 2 minutos tuvo hasta 0.96 de IM promedio y finalizó el IM promedio con valor de 0.95. Con lo anteriormente mencionado se puede concluir que la velocidad de 109.4 rpm utilizando partículas finas tiene el mejor comportamiento de IM promedio que favorecen la presencia de una mezcla homogénea, esto apoyado con los antecedentes ya que se establece por Helman, Lindley y Aguado que a menor diferencia entre tamaños, tiempos menores a 15 minutos y velocidades bajas se

verán favorecidos los mecanismos que permiten la mezcla al azar de los componentes existentes.

En la Figura 16 aparecen cuatro recuadros, cada uno con su respectivo título (velocidad de rotación, brazo, diámetro, tiempo) referente a la variable o factor en estudio.

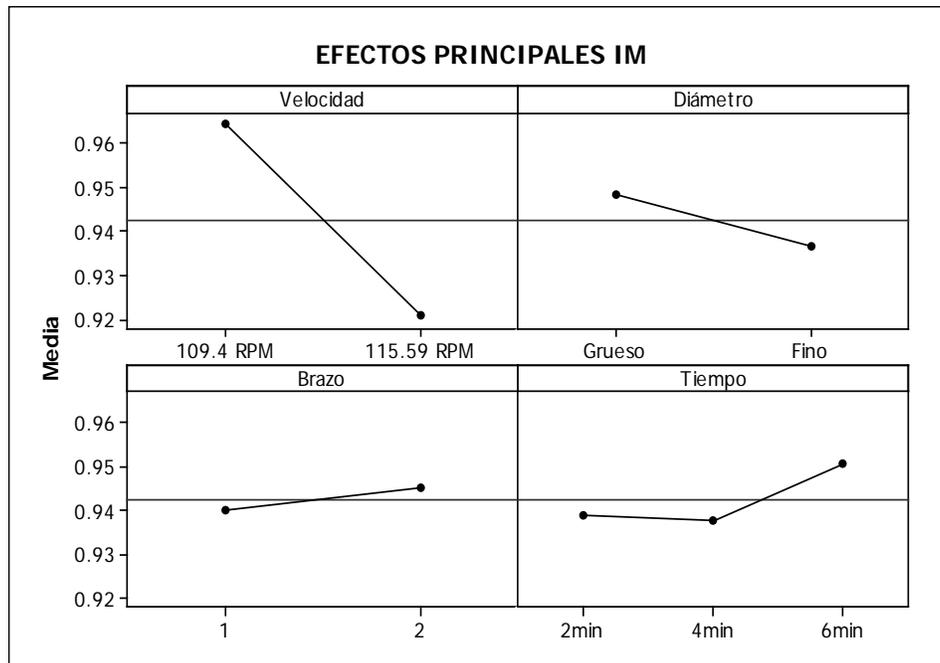


Figura 16. Resultados del análisis factorial para el IM de la mezcla de sal y ácido cítrico, en el efecto principal de los factores analizados.

Cada recuadro tiene en el eje de las abscisas los dos niveles o tres utilizados en la experimentación, y paralelo a este eje hay una línea que atraviesa el recuadro (es la media de los resultados obtenidos para el Índice de Mezclado calculado para las muestras finales). En el eje de las ordenadas se encuentran los valores obtenidos de Índices de Mezclado relativos en las muestras; debido a la tendencia de la línea que atraviesa cada recuadro se establece la magnitud de influencia sobre la variable de respuesta que en este caso podemos concluir que: la velocidad de rotación es la variable que tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la homogeneidad final de la mezcla de sal-ácido cítrico, ya que en la velocidad de 109.4 rpm se tiene una media mayor a 0.96 del IM final por lo

tanto más cercano 1 que representa una posibilidad más cercana de tener una mezcla final homogénea de los componentes, apoyando este resultado está la Figura 15 para valores de hasta 0.99 de IM promedio de las muestras, tal conclusión apoya la hipótesis mencionada (ver Capítulo 2. Metodología), que a menores velocidades se verá favorecido el IM en un mezclador en V y establecido por Lindley, (1991), el factor de tiempo muestra una tendencia de la recta negativa del intervalo de 2-4 minutos y mejora de 4-6 minutos esto representa un mezclado y desmezclado con respecto a la marcha de la operación con relación de las medias del IM, y por último con respecto a los factores de diámetro, brazo y tiempo en el mezclado, su influencia no tiene afectación significativa sobre el IM de la mezcla.

En la Figura 17 se analizan las diferentes interacciones entre los factores establecidos en la experimentación y su efecto sobre el IM final de la mezcla sal-ácido cítrico.

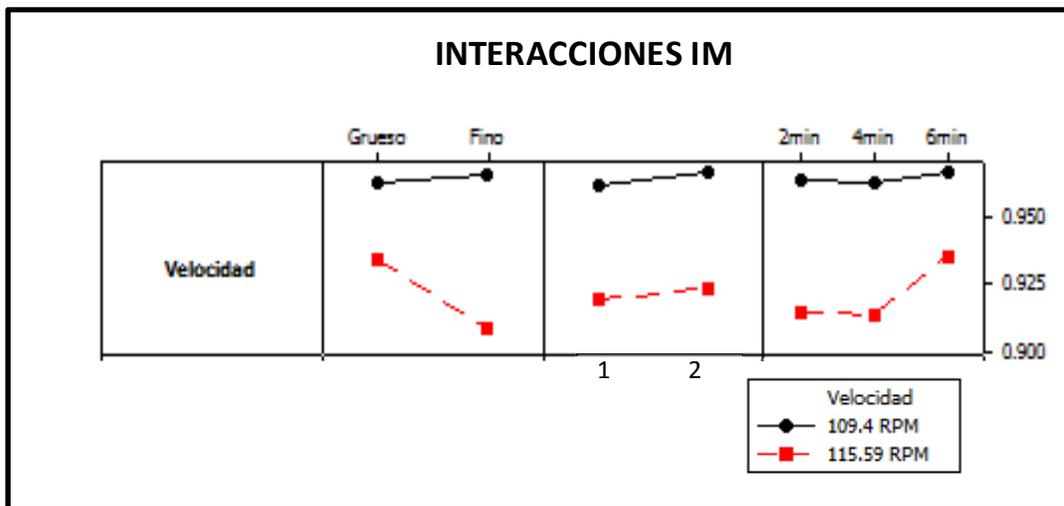


Figura 17. Resultados del análisis factorial para el IM de la mezcla de sal y ácido cítrico, en las interacciones de las variables de velocidad, diámetro, brazo y tiempo.

En la figura 17 se presenta el gráfico de interacciones comparando las velocidades utilizadas con los diferentes tamaños, con los 2 brazos y con los tiempos de mezclado utilizados. En el caso de los tamaños se observa que para la velocidad mayor, afectó el tamaño de las partículas obteniéndose mejores resultados para el tamaño grueso, mientras que para la velocidad menor, el IM no fue afectado. Para el caso de los brazos, se observa que solo la velocidad afectó el IM, siendo la velocidad menor donde se obtienen los mayores IM, como en el caso anterior.

En el caso del tiempo, nuevamente la velocidad menor, muestra los mejores IM, además de que el tiempo de mezclado no fue factor de significancia, en tanto que para la velocidad mayor, el tiempo de 6 min, muestra significancia obteniendo un IM mayor, superior a 0.95.

3.2.3.2. Resultados para diferencia de color de la mezcla sal y ácido cítrico.

En la Figura 18 se muestran los resultados de colorimetría para las muestras del mezclado de sal-ácido cítrico, con el cálculo para cada una de las variables de ΔE tomando como referencia los valores de L^* , a^* y b^* , de la muestra patrón de sal pura.

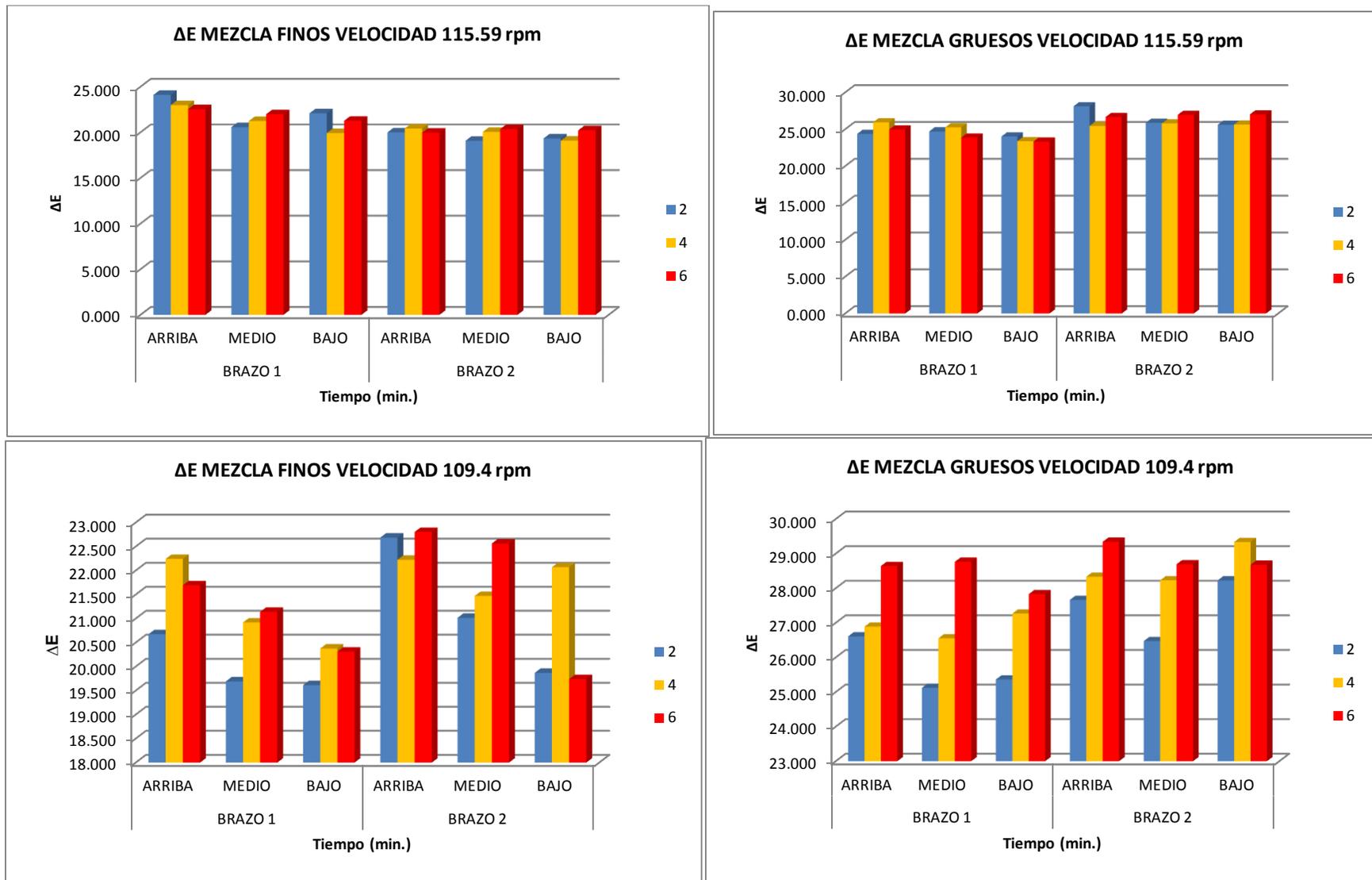


Figura 18. Gráficos de resultados de ΔE a diferentes condiciones de operación del mezclado de sal-ácido cítrico.

La Figura 18 se observan los valores de ΔE en las mezclas de sal-ácido cítrico para las dos condiciones de partícula y diferentes velocidades de giro, estos muestran un comportamiento de presencia no homogénea de ácido cítrico en las diferentes posiciones, esto significa que en las muestras al momento de tomarlas no existió la misma probabilidad de encontrar las partículas del ácido cítrico en cualquier posición del brazo, este comportamiento como se observa existe en los dos brazos del equipo. Sin embargo para la velocidad de 115.59 rpm los ΔE son cercanos o sobrepasan valores de $\Delta E=25$, para los dos tamaños de partícula, brazo 1 y brazo 2; además de que las diferencias de posición son menores entre ellas.

Cabe mencionar que para la velocidad de 109.4 rpm se obtuvieron los valores más altos de ΔE , con una tendencia creciente en el tiempo de 6 minutos con valores próximos a 29 y un posterior decrecimiento del ΔE hasta valores cercanos 28 este comportamiento en las tres posiciones en el brazo 1 y en el brazo 2 se observa un comportamiento menos significativo para los valores de ΔE . Esto último reafirma los datos observados en la Figura 16, donde se alcanzan IM de la mezcla sal gruesa-ácido cítrico cercanos a 1, ya que existe una mayor proporción en está del ácido cítrico.

La Figura 19 muestra el gráfico de las medias de los factores que afectan al ΔE de las muestras, obtenido por medio del tratamiento de los resultados para colorimetría.

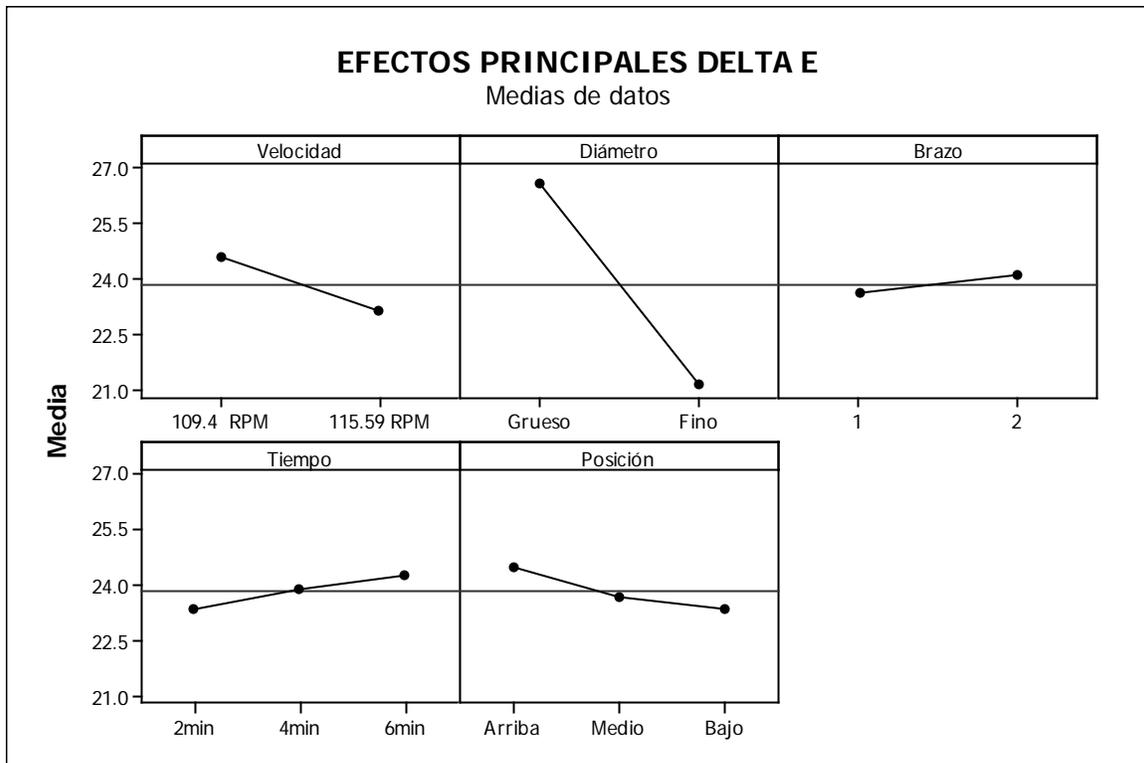


Figura 19. Resultados del análisis factorial para el ΔE de la mezcla de sal y ácido cítrico, en los efectos principales sobre la media de las variables de velocidad, diámetro, brazo, tiempo y posición.

A partir de este gráfico, se puede establecer que la variable que tiene un mayor efecto debido a la mayor inclinación de la línea resultante es el diámetro, por lo tanto se tiene presente una mayor proporción de ácido cítrico expresado cualitativamente como ΔE en el mezclado de gruesos esto resulta acorde con los establecido en el análisis de la Figura 16 para el IM de la mezcla. En menor proporción se tiene el efecto de la velocidad sobre el ΔE de la mezcla siendo 109.4 rpm la velocidad con una media más alta apoyando lo dicho en los análisis de la Figura 15 y 16, con respecto a la posición de toma de muestra como se observa no afecta significativamente el valor de ΔE de las muestras esto indica que existe una proporción de ácido cítrico con poca variabilidad en cualquier posición favoreciendo con esto la homogeneidad de la mezcla y las variables de brazo y tiempo no presentan influencia significativa en la variable de respuesta.

3.2.3.3. Resultados de consumo de energía en el mezclado de sal-ácido cítrico

En la Figura 20 se muestran los resultados del cálculo para consumo de energía resultantes del mezclado de sal-ácido cítrico, con los datos obtenidos se realizó el tratamiento de estos por medio del software Minitab 16, con un diseño factorial de 3 niveles (velocidad, tiempo y diámetro), con el cual se estableció el grado de efecto que tienen las diferentes condiciones de operación sobre la energía ocupada durante la operación de mezclado.

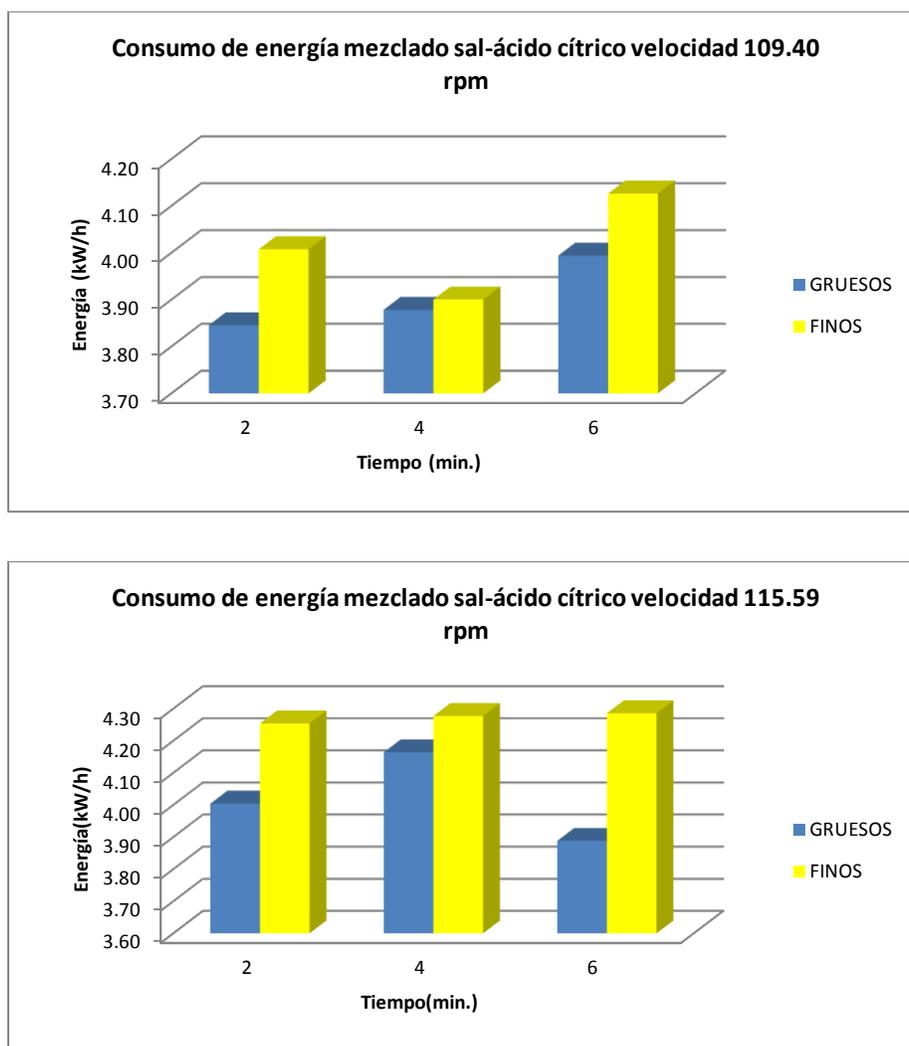


Figura 20. Gráficos de resultados de consumo de energía en mezclado de sal-ácido cítrico a diferentes condiciones de operación.

En la Figura 20 se observa que los gruesos son los que tienen resultados de consumo de energía menores a velocidad de 109.40 rpm, esto es muy probablemente debido a que la partícula no necesita propiamente una aplicación de energía mayor debido a sus propiedades fisicoquímicas inherentes y la acción de fuerza de gravedad dentro de la operación mecánica del equipo. Además se puede analizar que para la velocidad 115.59 rpm el gasto de energía es mayor debido al aumento de giro del equipo, y al avanzar la operación el efecto en las partículas finas es constante, mientras que en los gruesos varia.

En la Figura 21 se muestra el efecto significativo del diámetro, la velocidad de giro y tiempo de mezclado sobre el consumo de energía en el momento del mezclado de sal-ácido cítrico; en el proceso, los datos obtenidos en la Figura 17 apoyan tal efecto ya que se observa la media de IM de la mezcla favorecido por la velocidad de 109.4 rpm en mezclas de gruesos en donde el consumo de energía es menor con respecto a la velocidad de 115.59 rpm por 0.20 kW/h, tales condiciones presentan consumos de energía bajos que son idóneos para la operación en gran escala del mezclado de polvos alimenticios.

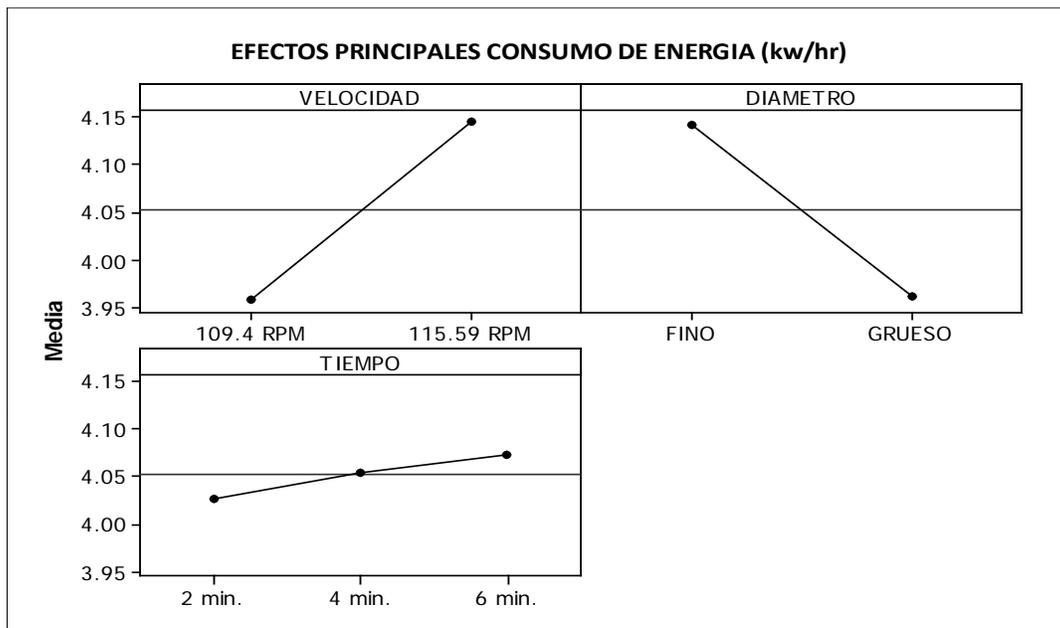


Figura 21. Resultados del análisis factorial para el consumo de energía durante el mezclado de sal-ácido cítrico en un mezclador en V.

CONCLUSIONES

Las propiedades físicas de la sal y ácido cítrico, son de importancia en la operación de mezclado de alimentos granulares, en mayor grado de afectación sobre el mezclado se encuentran el tamaño y diámetro de partícula, ya que los fenómenos de segregación y aglomeración, que desfavorecen tal operación son afectados directamente por estas propiedades afectando directamente a la propiedad de cohesividad entre partículas de los materiales, ya que en el momento del mezclado de finos, las fuerzas interparticulares se ven afectadas reflejándose en los valores de índice de mezclado lejanos a 1 y a la par se tiene un desmezclado en los gruesos para las dos velocidades empleadas en la operación.

El fenómeno de desmezclado y mezclado observado en los resultados de índice de mezclado y ΔE para la mezcla de sal-ácido cítrico, se justifican debido al equipo utilizado en la experimentación, ya que el mismo está catalogado como segregante para polvos alimenticios; además de tener resultados altos de humedad de las muestras de ácido cítrico que llegaron a afectar el valor de ΔE final, lo anterior se pudo haber controlado con una preparación adecuada de la materia prima.

La velocidad de giro de 109.40 rpm es la idónea para el mezclado de sal-ácido cítrico en los 2 tamaños estudiados, ya que muestra un desmezclado menor entre los brazos y para ambos tamaños de partícula, además de alcanzar valores de índice de mezclado cercanos a 1, además de que la presencia de ácido cítrico (expresado como valores más altos de ΔE), están por encima de una media de $\Delta E=25$ en diferentes posiciones dentro de los brazos, por tanto se justifican los valores de índice de mezclado altos ya mencionados. Aunado con lo anterior a la velocidad mencionada, se suma el bajo consumo de energía en momento de operación para mezcla de partículas gruesas, siendo este resultado deseable para un proceso a nivel industrial.

Aunado a lo anterior la sal utilizada como ya se ha mencionado tuvo un fenómeno de quiebre de partícula desde el tamizado y probablemente siguió dentro del equipo dados los mecanismos difusivos y acción mecánica dentro del equipo, por lo tanto se debe de considerar esta singularidad del material para el trabajo con este, debido a el proceso de quiebre dentro del equipo por si solo afectó la homogeneidad final de mezcla.

El diseño del equipo tiene un lugar importante en la homogeneidad final de la mezcla ya que en el brazo 2 los resultados tuvieron una tendencia más cercana a 1 de índice de mezclado en comparación al brazo 1, esto debido a la forma del giro del equipo y la velocidad de rotación, además que en el momento de llenado del equipo no se controló la cantidad de material introducido en cada brazo.

Dentro del mezclado de alimentos se debe realizar un estudio a fondo de las propiedades físicoquímicas de las materias primas a utilizar y la caracterización rigurosa del equipo, posteriormente una preparación de los materiales ya que estas propiedades afectarán directamente la homogeneidad final de la mezcla y por lo tanto a los gastos de energía finales ya que tales propiedades pueden acortar o alargar los tiempos de estancia dentro de la operación unitaria para los fines que le confieren a la operación como los son cumplimiento de cantidades de ingredientes, legalidad y costos de insumos a utilizar en la industria.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aguado, J. (2003). *Ingeniería de la industria alimentaria operaciones de procesado de alimentos*. España: Editorial Síntesis.

Anjani K. J. y Virendra M.P. (2009). Percolation segregation of binary mixtures under periodic movement. *Powder technology*, 195, 73-82.

Bagster, D.F. y Bridgwater, J. (1967). The measurement of the force needed to move blades through a bed of cohesionless granules. *Powder technology*, 1, 189-198.

Brennan, J. (1980). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. España: Editorial Acribia.

Bodhisattwa C., Mehrotra, A., Muzzio, F., Tomassone, S. (2006). Cohesive effects in powder mixing in a tumbling blender. *Powder Technology*, 165, 105-114.

Bridgwater, J. y Ingram, N.D. (1971). Rate of spontaneous inter-particle percolation. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, 49, 163–169.

Brisay, K., (1975). Salt: the study of an ancient industry. *Colchester Archaeological Group*, 1974.

Brunati, C. y De Napoli, H. (2010). *Titulaciones conductimétricas*. Nueva York.

Chiralt, A., (2007). *Propiedades físicas de los alimentos*. España: Editorial Universidad Politécnica de Valencia.

Committee on Medical Aspects of Food Policy. (1994). Nutritional aspects of cardiovascular disease. *Department of health report on health and social subjects*, 46.

Department of the Interior E.U.A. (Junio, 2006). Consumo de sal a nivel mundial. Recuperado de: <http://www.departmentinter.org>

DesRosiers E., Abatzoglou, N., Cartilier, L., Simard J. (2006). Agglomeration tendency in dry pharmaceutical granular systems. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 64, 193–199.

Dirección de industria alimentaria S.A.G.P. y A. (Octubre, 2012). Consumo de ácido cítrico por destino en área industrial. Recuperado de http://www.alimentosargentinos.gov.ar/0-3/revistas/r_12/12_06_citrico.htm

Espacio de color CIE L*a*b*. (Enero, 2013) Métodos colorimétricos. Recuperado de: www.cala.unex.es

Fellows, (1994). *Tecnología del procesado de los alimentos*. España: Editorial Acribia.

Flad R., (2005). Archaeological and chemical evidence for early salt production in china, *PNAS*, 102, 12618–12622.

Flint, O., (1996). *Microscopia de los Alimentos, Manual de Métodos Prácticos Utilizando la Microscopía Óptica*. España: Editorial Acribia.

Food and drug administration. (Octubre, 2012a). Aditivos alimentarios. Recuperado de <http://www.fda.org.mx>

Food and drug administration. (Octubre, 2012b). Producción mundial de sal 2011. Recuperado de <http://www.fda.org.mx>

Gilabert E., (2002). *Medida del color*. España: Editorial UPV.

Helman, J., (1984). *Farmacotécnica, teórica y práctica* (pp.1147-1185). México: Editorial Cecsca.

Henderson y Perry R. (1976). *Agricultural process engineering*, 442.

Herve, (1995). *Revelations gastronomiques*. Francia.

Hiroaki, M., (2006). *Powder technology handbook*, EUA: Editorial Taylor & Francis.

James W., (1987). The dominance of salt in manufactured food in the sodium intake of affluent societies. *Lancet* 1, 143.

Juliano, P., Balasingam, M., Barbosa-Cánovas, G.V., (2006). Flow and shear descriptors of preconsolidated food powders. *Journal of food engineering*, 72, 157-166.

Kiple, K., (2000). *The cambridge world history of food* (pp. 156-180). EUA: Editorial Cambridge University Press.

Klein, K., (1981). *Aerosil for improving the flow behaviour of power substances, technical bulletin pigments*. Frankfurt: Editorial Degusa.

Kurlansky, M.,(1998). *Cod: a biography of the fish that changed the world*. Penguin books.

Lacey, (1954). Developments in the theory of particle mixing. *Journal of applied chemistry*, 4, 257-268.

Lara, A., Rosas, M., Pastelín, G., Aguilar, C., Fauste, Attie., Velázquez, Óscar. (2004). Hipercolesterolemia e hipertensión arterial en México. Consolidación urbana actual con obesidad, diabetes y tabaquismo. *Archivos de cardiología de México*, 74, 231-245.

Laszlo, P., (2001). *Grain of life*. EUA: Columbia university press.

Lemieux, M., Bertrand, F., Chaouki, J., Gosselin P. (2007). Large-scale numerical investigation of solids mixing in a v-blender using the discrete element method. *Chemical Engineering Science*, 62. 1783-1802.

Lindley, J. (1991). Mixing processes for agricultural and food materials: powders and particulates. *J. Agric. Engng. Res.*, 49, 1-19.

Massol-Chaudeur, S., Berthiaux, H., Dodds, J.A. (2002). Experimental study of the mixing kinetics of binary pharmaceutical powder mixtures in a laboratory hoop mixer. *Chemical Engineering Science*, 57, 4053-4065.

Mc Cabe, (1995). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. España: Editorial Mc Graw-Hill.

McGee, H., (2004). *On food and cooking: the science and lore of the kitchen*. Nueva York: Editorial Scribner.

Mckillop, H., (1995). Salt: white gold of the ancient maya. *British food journal*, 97, 30-32.

Morrison, R.T. y Neilson, R. (1998). *Química orgánica*. México: Editorial Pearson Educación.

NOM-040-SSA2-2004. (s.f.). Recuperado octubre de 2012 de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/040ssa2.2004>

Organización Mundial de la Salud. (Enero, 2013). Causas de muerte México. Recuperado de: <http://www.oms.org>.

Orr, A. y Sallam, P. (1978). Content uniformity of potent drugs in tablets. *J. Pharm. Pharmacol*, 30, 741-747.

Perry R., (1984). *Perry's chemical engineers' handbook*. Nueva York: Editorial McGraw-Hill.

Roskilly J.S., Colbourn, E.A., Alli, O., Williams, D., Paul, K.A., Welfare H.E., Trusty P.A. (2010). Investigating the effect of shape on particle segregation using a monte carlo simulation. *Powder technology*, 203, 211-222.

Ruíz, J., (1986). *Influencia del tiempo de mezclado en la interacción lubricante-excipientes sobre las características del procesamiento de polvos y las propiedades de las tabletas comprimidas*. Tesis de química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, México.

Sánchez, S., (2003). *Formulación de medicamentos protocolo de calificación de un mezclador en v de capacidad de 600 l*. Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, México.

Toussaint-Samat, (1997). *A history of food* (pp. 45-90). EUA: Editorial Oxford

Equipos de mezclado industrial. (Febrero, 2014). Mezcladores para alimentos. Recuperado de: <http://www.vibrasec.com>.

Weinberger, M., (1996). Salt sensitivity of blood pressure in Humans. *Hypertension*, 27, 481-490.