

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**PREMEZCLADO DE SÓLIDOS INERTES PARA LA PRODUCCIÓN DE  
DINAMITA, MEDIANTE EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
MEZCLADOR CÓNICO VERTICAL PILOTO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
QUÍMICO**

**FABIÁN MAURICIO CHICO PROAÑO**

**sisu\_fabian3@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. MARCELO LOZADA**

**marcelo.lozada@epn.edu.ec**

**Quito, Enero 2011**

Escuela Politécnica Nacional 2010  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACION**

Yo, Fabián Mauricio Chico Proaño, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluye en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Fabián Mauricio Chico Proaño

## **CERTIFICACION**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado en su totalidad por el Señor Fabián Mauricio Chico Proaño bajo mi supervisión.

---

**Ing. Marcelo Lozada**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AUSPICIO**

La presente investigación contó con el auspicio de Explocen, en la parte técnica y bibliográfica

## **DEDICATORIA**

A mis padres Fabián y Yolanda, quienes con su inmenso amor, amistad , abnegación , dedicación y esfuerzos me enseñaron principios y valores para cultivarlos y saber escoger el camino que tengo que recorrer y ser un hombre de bien, dispuesto a enfrentar y luchar contra toda adversidad , para conseguir mis objetivos y metas.

A mis hermanos Andrés y Sebastián por su amistad , apoyo, cariño y estar conmigo en todo momento.

A mi tía Patricia del Carmen Chico, que me ha motivado y apoyado para seguir adelante.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
INTRODUCCIÓN	iii
<b>1. PARTE TEÓRICA</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Mezclado</b>	<b>1</b>
1.1.1 Concepto	1
1.1.2 Homogeneidad	2
1.1.3 Control de las muestras	3
<b>1.2 Propiedades que afectan al mezclado de sólidos</b>	<b>4</b>
1.2.1 Propiedades	4
1.2.2 Características de los sólidos	4
<b>1.3 Mecanismos de mezclado</b>	<b>5</b>
1.3.1 Convección	5
1.3.2 Fallas o cizallamiento	5
1.3.3 Difusión	6
<b>1.4 Tipos de mezcladores</b>	<b>6</b>
1.4.1 Mezcladores estáticos	6
1.4.1.1 Mezclador de cinta	7
1.4.1.2 Mezclador de Tornillo sin fin vertical	7
1.4.1.3 Mezclador de Paletas	8
1.4.1.4 Mezclador de Palas Planetario	8
1.4.1.5 Mezclador Sigma	9
1.4.1.6 Mezclador de barra z	10
1.4.1.7 Mezclador de Lecho fluidizado	10
1.4.2 Mezcladores móviles	11
1.4.2.1 Mezclador de tambor cilíndrico o cúbico	11
1.4.2.2 Mezclador bicónico	11
1.4.2.3 Mezclador en V o de Calzoncillo	12
1.4.3 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de mezcladores	13

<b>1.5 Propiedades de la materia prima</b>	<b>17</b>
1.5.1 Nitrato de Amonio	17
1.5.1.1 Usos y Aplicaciones	18
1.5.1.2 Propiedades del nitrato de amonio	17
1.5.2 Aserrín	18
1.5.2.1 Usos y Aplicaciones	20
1.5.2.2 Propiedades del Aserrín	20
1.5.3 Harina de maíz	20
1.5.3.1 Propiedades	21
1.5.3.2 Usos y Aplicaciones	22
1.5.3.3 Propiedades del almidón	22
<b>1.6 Características de diseño y operación</b>	<b>23</b>
1.6.1 Características	23
1.6.1.1 Uniformidad de la muestra	23
1.6.1.2 Tiempo de mezclado	23
1.6.1.3 Carga y descarga	23
1.6.1.4 Potencia	23
1.6.1.5 Limpieza	24
1.6.1.6 Rotura y desgaste de los aglomerados	24
1.6.1.7 Formación de polvo	24
1.6.1.8 Carga electrostática	24
1.6.1.9 Desgaste del equipo	25
1.6.1.10 Contaminación del producto	25
1.6.1.11 Calentamiento o enfriamiento	25
1.6.1.12 Flexibilidad	26
1.6.1.13 Velocidad de rotación	26
<b>1.7 Criterios de eficiencia de mezclado</b>	<b>26</b>
1.7.1 Índice de mezcla	26
1.7.2 Tiempo óptimo de mezclado	28

<b>2. PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Caracterización de la Materia Prima</b>	<b>29</b>
2.1.1 Densidad	29
2.1.2 Humedad	30
2.1.2.1 Nitrato de Amonio	30
2.1.2.2 Aserrín	30
2.1.2.3 Harina de maíz	31
2.1.2.4 Cloruro de Sodio	32
2.1.3 Tamaño de la partícula	32
<b>2.2 Diseño y construcción del mezclador piloto</b>	<b>33</b>
2.2.1 Capacidad del mezclador	34
2.2.2 Materia Prima	35
2.2.3 Dimensionamiento del tornillo sin fin	35
2.2.3.1 Procedimiento de diseño	35
2.2.3.2 Dimensiones del tornillo sin fin	46
2.2.4 Dimensiones del cono	47
2.2.5 Selección del material para la construcción del mezclador	50
2.2.6 Construcción del mezclador	50
2.2.7 Tamaño de muestra	50
2.2.8 Marcha analítica	52
2.2.9 Procedimiento Experimental	53
2.2.9.1 Carga en el mezclador con el 30 %	54
2.2.9.2 Carga en el mezclador con el 50 %	54
<b>2.3 Análisis de las muestras a diferentes velocidades</b>	<b>56</b>
<b>2.4 Fracción global media</b>	<b>57</b>
<b>2.5 Índice de mezclado</b>	<b>58</b>
<b>2.6 Tiempo de mezclado óptimo</b>	<b>58</b>
<b>2.7 Pruebas de velocidad de detonación</b>	<b>59</b>

<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>61</b>
<b>3.1 Resultados de la caracterización</b>	<b>61</b>
3.1.1 Densidad	61
3.1.2 Humedad	61
3.1.2.1 Nitrate de amonio	62
3.1.2.2 Aserrín	62
3.1.2.3 Harina de maíz	62
3.1.2.4 Cloruro de sodio	63
3.1.3 Tamaño de la partícula	63
3.1.3.1 Nitrate de amonio	63
3.1.3.2 Harina de maíz	65
3.1.3.3 Aserrín	66
3.1.3.4 Materia prima molida	68
3.1.3.4.1 Harina de maíz molido	68
3.1.3.4.2 Aserrín molido	69
3.1.3.5 Mezcla	71
<b>3.2 Análisis de muestras a diferentes velocidades</b>	<b>72</b>
3.2.1 Pruebas a 70 rpm del tornillo sin fin y 30% de carga	72
3.2.2 Prueba a 55 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	76
3.2.3 Pruebas a 85 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	77
3.2.4 Pruebas a 70 rpm del tornillo sin fin y 50 % de carga	79
<b>3.3 Índice de mezclado</b>	<b>80</b>
<b>3.4 Tiempo de mezclado óptimo</b>	<b>82</b>
<b>3.5 Velocidad de detonación</b>	<b>87</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
4.1 Conclusiones	93
4.2 Recomendaciones	94
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador en V	13
<b>Tabla 2.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador Bicónico	13
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador de tambor cilíndrico o cúbico	14
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y desventajas del mezclador de tornillo vertical	14
<b>Tabla 5.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador de cinta	15
<b>Tabla 6.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador de palas planetario	15
<b>Tabla 7.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador Sigma	15
<b>Tabla 8.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador barra Z	16
<b>Tabla 9.</b> Ventajas y Desventajas del mezclador lecho fluidizado	16
<b>Tabla 10.</b> Propiedades físico químicas del Nitrato de Amonio	17
<b>Tabla 11.</b> Propiedades físico químico del aserrín	20
<b>Tabla 12.</b> Propiedades físico químico del almidón	22
<b>Tabla 13.</b> Características del material.	37
<b>Tabla 14.</b> Capacidades (ft <sup>3</sup> /hr) para transportadores de tornillo a 1rpm y max rpm	37
<b>Tabla 15.</b> Capacidades (ft <sup>3</sup> /hr) para transportadores de tornillo a 1rpm y max rpm	38
<b>Tabla 16.</b> Factor de capacidad para transportadores especiales con paso (Cf1)	40
<b>Tabla 17.</b> Factor de capacidad para transportadores especiales con hélice (Cf2)	40
<b>Tabla 18.</b> Factor de capacidad para transportadores especiales con paleta (Cf3)	40
<b>Tabla 19.</b> Factor (Fm) en función de las características del material.	42
<b>Tabla 20.</b> Factor (Fd) transportador de diámetro	42
<b>Tabla 21.</b> Factor (Fb) de rodamiento	42
<b>Tabla 22.</b> Dimensiones del diámetro del tornillo y diámetro del eje	46
<b>Tabla 23.</b> Diámetro del eje y espesor de la hélice del tornillo sin fin	46
<b>Tabla 24.</b> Dimensiones del tornillo sin fin	47
<b>Tabla 25.</b> Dimensiones del cono	49
<b>Tabla 26.</b> Nitrato de plata (ml) gastados para 2,5 y 10 g de muestra	51
<b>Tabla 28.</b> Valores de masa pesados para cada material y la densidad aparente.	61
<b>Tabla 29.</b> Valores de masa pesados de la mezcla y la densidad aparente.	61
<b>Tabla 30.</b> Masa inicial y final para el Nitrato de Amonio	62

<b>Tabla 31.</b> Masa inicial y final para el Aserrín	62
<b>Tabla 32.</b> Masa inicial y final para la Harina de maíz	62
<b>Tabla 33.</b> Masa inicial y final para el Cloruro de Sodio	63
<b>Tabla 34.</b> Masas de los tamices para la primera prueba. (Nitrato de Amonio)	64
<b>Tabla 35.</b> Masas de los tamices para la réplica. (Nitrato de Amonio)	64
<b>Tabla 36.</b> Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos. (Nitrato de Amonio)	64
<b>Tabla 37.</b> Masas de los tamices para la primera prueba. (Harina de Maíz)	65
<b>Tabla 38.</b> Masas de los tamices para la réplica. (Harina de Maíz)	65
<b>Tabla 39.</b> Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos. (Harina de Maíz)	66
<b>Tabla 40.</b> Masas de los tamices para la primera prueba. (Aserrín)	66
<b>Tabla 41.</b> Masas de los tamices para la réplica. (Aserrín)	67
<b>Tabla 42.</b> Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos. (Aserrín)	67
<b>Tabla 43.</b> Masas de los tamices para la primera prueba. (Harina de Maíz molido).	68
<b>Tabla 44.</b> Masas de los tamices para la réplica. (Harina de Maíz molido).	68
<b>Tabla 45.</b> Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos. (Harina de Maíz molido)	69
<b>Tabla 46.</b> Masas de los tamices para la primera prueba. (Aserrín molido).	69
<b>Tabla 47.</b> Masas de los tamices para la réplica. (Aserrín molido).	70
<b>Tabla 48.</b> Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos. (Aserrín molido)	70
<b>Tabla 49.</b> Masas de los tamices para la primera prueba. (Mezcla)	71
<b>Tabla 50.</b> Masas de los tamices para la réplica. (Mezcla)	71
<b>Tabla 51.</b> Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos. (Mezcla)	72
<b>Tabla 52.</b> Nitrato de plata (ml) gastados a 70 rpm y 30% carga	72
<b>Tabla 53.</b> Concentración del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga	73
<b>Tabla 54.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga	74
<b>Tabla 55.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 55 rpm y 30% de carga	76
<b>Tabla 56.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 85 rpm y 30% de carga	77
<b>Tabla 57.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 50% de carga	79
<b>Tabla 58.</b> Índice de mezcla para 55 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	80
<b>Tabla 59.</b> Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	81
<b>Tabla 60.</b> Índice de mezcla para 85 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	81
<b>Tabla 61.</b> Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 50 % de carga	82

<b>Tabla 62.</b> Tiempo óptimo de mezclado para distintas rpm y % de carga	85
<b>Tabla 63.</b> Índice de mezcla por espectrofotometría para 70 rpm y 30 % carga	86
<b>Tabla 64.</b> Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla manual	88
<b>Tabla 65.</b> Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla manual	88
<b>Tabla 66.</b> Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.	88
<b>Tabla 67.</b> Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.	88
<b>Tabla 68.</b> Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 55 rpm y 30% de carga.	89
<b>Tabla 69.</b> Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 85 rpm y 30% de carga.	89
<b>Tabla 70.</b> Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 70 rpm y 50% de carga.	89
<b>Tabla 71.</b> Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla manual	90
<b>Tabla 72.</b> Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla manual	90
<b>Tabla 73.</b> Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.	90
<b>Tabla 74.</b> Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.	90
<b>Tabla 75.</b> Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 55 rpm y 30% de carga.	91
<b>Tabla 76.</b> Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 85 rpm y 30% de carga.	91
<b>Tabla 77.</b> Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 70 rpm y 50% de carga.	91
<b>Tabla 78.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Nitrato de Amonio	101

<b>Tabla 79.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Nitrato de Amonio	102
<b>Tabla 80.</b> Masas de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Harina de Maíz	104
<b>Tabla 81.</b> Masas de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Harina de Maíz	105
<b>Tabla 82.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Aserrín	106
<b>Tabla 83.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Aserrín	107
<b>Tabla 84.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Harina de Maíz molido	108
<b>Tabla 85.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Harina de Maíz molido	109
<b>Tabla 86.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Aserrín molido	110
<b>Tabla 87.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Aserrín molido	111
<b>Tabla 88.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con la mezcla	112
<b>Tabla 89.</b> Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con la mezcla	113
<b>Tabla 90.</b> Tamaño de muestra para productos empaquetados o envasados	114
<b>Tabla 91.</b> Características del material	115
<b>Tabla 92.</b> Diámetro del tornillo sin fin en función de la capacidad para 1 rpm y rpm máxima.	116
<b>Tabla 93.</b> Dimensiones del tornillo sin fin	117
<b>Tabla 94.</b> Nitrato de plata (ml) gastados a 70 rpm y 30% carga	120
<b>Tabla 95.</b> Normalidad del ión cloruro a 70 rpm y 30 % de carga.	122
<b>Tabla 96.</b> Concentración del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga	123
<b>Tabla 97.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga	124
<b>Tabla 98.</b> Nitrato de plata (ml) gastados a 55 rpm y 30% carga	125

<b>Tabla 99.</b> Normalidad del ión cloruro a 55 rpm y 30 % de carga.	125
<b>Tabla 100.</b> Concentración del ión cloruro en ppm a 55 rpm y 30% de carga	126
<b>Tabla 101.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 55 rpm y 30% de carga	126
<b>Tabla 102.</b> Nitrato de plata (ml) gastados a 85 rpm y 30% carga	127
<b>Tabla 103.</b> Normalidad del ión cloruro a 85 rpm y 30 % de carga.	127
<b>Tabla 104.</b> Concentración del ión cloruro en ppm a 85 rpm y 30% de carga	128
<b>Tabla 105.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 85 rpm y 30% de carga	128
<b>Tabla 106.</b> Nitrato de plata (ml) gastados a 70 rpm y 50% carga	129
<b>Tabla 107.</b> Normalidad del ión cloruro a 70 rpm y 50 % de carga.	129
<b>Tabla 108.</b> Concentración del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 50% de carga	130
<b>Tabla 109.</b> Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 50% de carga	130
<b>Tabla 110.</b> Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga	131
<b>Tabla 111.</b> Ejemplo de cálculo para 10 segundos a 70 rpm y 30 % de carga	132
<b>Tabla 112.</b> Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	133
<b>Tabla 113.</b> Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 85 rpm y 30 % de carga	133
<b>Tabla 114.</b> Índice de mezcla para 85 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	134
<b>Tabla 115.</b> Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 55 rpm y 30 % de carga	134
<b>Tabla 116.</b> Índice de mezcla para 55 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga	135
<b>Tabla 117.</b> Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 70 rpm y 50 % de capacidad	135
<b>Tabla 118.</b> Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 50 % de carga	136
<b>Tabla 119.</b> Concentración del ion cloruro en ppm analizados mediante el método espectrofotométrico	137
<b>Tabla 120.</b> Concentración del ion cloruro en ppm analizados mediante el método espectrofotométrico	138
<b>Tabla 121.</b> Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de capacidad, analizados mediante método espectrofotométrico	146
<b>Tabla 122.</b> Índice de mezcla por espectrofotometría para 70 rpm y 30 % carga	147

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mezclado aleatorio	1
<b>Figura 2.</b> Mezclado ideal	2
<b>Figura 3.</b> Mecanismo convectivo	5
<b>Figura 4.</b> Mecanismo por cizallamiento	5
<b>Figura 5.</b> Mecanismo difusivo	6
<b>Figura 6.</b> Mezcladores de cinta	7
<b>Figura 7.</b> Mezcladores de tornillo sin fin verticales	8
<b>Figura 8.</b> Mezclador de paletas	8
<b>Figura 9.</b> Mezclador palas planetario.	9
<b>Figura 10.</b> Mezclador Sigma	9
<b>Figura 11.</b> Mezclador barras z	10
<b>Figura 12.</b> Mezclador de lecho fluidizado.	10
<b>Figura 13.</b> Mezclador de tambor	11
<b>Figura 14.</b> Mezclador doble cono	12
<b>Figura 15.</b> Mezclador en V	12
<b>Figura 16.</b> Estructura de la celulosa	19
<b>Figura 17.</b> Estructura de la amilosa (a) y amilopectina (b)	21
<b>Figura 18.</b> Dimensiones del tornillo sin fin	47
<b>Figura 19.</b> Dimensiones del cono	49
<b>Figura 20.</b> Secciones del mezclador para la toma de muestras	52
<b>Figura 21.</b> Marcha analítica para determinar la concentración de cloruros mediante el método volumétrico	53
<b>Figura 22.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador	75
<b>Figura 23.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 55 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador	76
<b>Figura 24.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 85 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador	78

<b>Figura 25.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 50 % de carga, en diferentes secciones del mezclador	79
<b>Figura 26.</b> Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 55 rpm y 30 % de carga	82
<b>Figura 27.</b> Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 70 rpm y 30 % de carga	83
<b>Figura 28.</b> Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 85 rpm y 30 % de carga	84
<b>Figura 29.</b> Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 70 rpm y 50 % de carga	85
<b>Figura 30.</b> Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 70 rpm y 30 % de carga, analizado mediante espectrofotometría	87
<b>Figura 31.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Nitrato de Amonio.	103
<b>Figura 32.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la réplica con Nitrato de Amonio.	103
<b>Figura 33.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Harina de Maíz.	104
<b>Figura 34.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la réplica con Harina de Maíz.	105
<b>Figura 35.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Aserrín.	106
<b>Figura 36.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para réplica con Aserrín.	107
<b>Figura 37.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Harina de Maíz molido.	108
<b>Figura 38.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Harina de Maíz.	109
<b>Figura 39.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Aserrín molido.	110
<b>Figura 40.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la réplica con Aserrín molido.	111
<b>Figura 41.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con la mezcla.	112

<b>Figura 42.</b> Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la réplica con la mezcla.	113
<b>Figura 43.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, para la sección superior del mezclador, analizado mediante titulación y espectrofotometría.	139
<b>Figura 44.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, para la sección media del mezclador, analizado mediante titulación y espectrofotometría.	140
<b>Figura 45.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, para la sección inferior del mezclador, analizado mediante titulación y espectrofotometría.	140
<b>Figura 46.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador, analizado mediante espectrofotometría	141
<b>Figura 47.</b> Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador, analizado mediante titulación.	141
<b>Figura 48.</b> Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 55 rpm y 30 % de carga	142
<b>Figura 49.</b> Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 30 % de carga	143
<b>Figura 50.</b> Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 85 rpm y 30 % de carga	144
<b>Figura 51.</b> Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 50 % de carga	145
<b>Figura 52.</b> Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 30 % de carga, analizado mediante espectrofotometría	147
<b>Figura 53.</b> Recipiente cónico	148
<b>Figura 56.</b> Anillo dentado	149
<b>Figura 57.</b> Mecanismo de movimiento	149
<b>Figura 58.</b> Fuerza motriz del mezclador	150



## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo I</b>	101
Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para el nitrato de amonio	101
<b>Anexo II</b>	104
Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para la harina de maíz	104
<b>Anexo III</b>	106
Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para el aserrín	106
<b>Anexo IV</b>	108
Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para la harina de maíz molido	108
<b>Anexo V</b>	110
Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para el aserrín molido	110
<b>Anexo VI</b>	112
Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para la mezcla	112
<b>Anexo VII</b>	114
Método de muestreo aleatorio o al azar para productos empaquetados o envasados, norma inen 476	114
<b>Anexo VIII</b>	115
Características del material a ser transportado	115
<b>Anexo IX</b>	116
Capacidad del tornillo sin fin a 1 revolución por minuto	116
<b>Anexo X</b>	117
Diámetro del eje del transportador de tornillo sin fin	117
<b>Anexo XI</b>	118
Cálculo del tamaño de muestra mínimo para que sea representativo del lote, mediante la teoría de Gy.	118
<b>Anexo XII</b>	120
Consumo de nitrato de plata y cálculo de las ppm del ion cloruro para las diferentes velocidades de giro del tornillo sin fin.	120

<b>Anexo XIII</b>	131
Índice de mezclado para cada una de las condiciones de velocidad de giro del tornillo sin fin y porcentaje de carga	131
<b>Anexo XIV</b>	137
Concentración del ión cloruro en ppm mediante método espectrofotométrico	137
<b>Anexo XV</b>	139
Comparación de la concentración del ión cloruro empleando el método de titulación con nitrato de plata y el método espectrofotométrico	139
<b>Anexo XVI</b>	142
Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 55 rpm y 30 % de carga	142
<b>Anexo XVII</b>	143
Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 30 % de carga	143
<b>Anexo XVIII</b>	144
Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 85 rpm y 30 % de carga	144
<b>Anexo XIX</b>	145
Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 50 % de carga	145
<b>Anexo XX</b>	146
Índice de mezclado para una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 30 % de carga, datos analizados por el método espectrofotométrico.	146
<b>Anexo XXI</b>	148
Procedimiento para la construcción del mezclador	148
<b>Anexo XXII</b>	151
Glosario de términos	151

## RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó, construyó y evaluó un mezclador cónico vertical piloto para estudiar las condiciones de operación a ser aplicadas en la producción de dinamitas en la empresa Explocen C.A.

Para satisfacer el requerimiento de la empresa luego de elegir la mejor opción se diseñó y construyó un mezclador cónico vertical para luego evaluar la eficiencia de las mezclas de las materias primas compuesta por nitrato de amonio, aserrín y harina de maíz, usando cloruro de sodio como trazador. Se realizaron pruebas a diferentes revoluciones por minuto del elemento mezclador a distintos porcentajes de carga y tiempos.

La determinación del tiempo óptimo de mezclado se realizó mediante el análisis de los gráficos del índice de mezcla en función del tiempo, en donde se establece que el mejor tiempo es cuando el índice de mezcla tiende a permanecer constante.

Para evaluar la calidad de la dinamitas se realizaron pruebas de la velocidad de detonación con un equipo especializado que posee la empresa (VOD meter). Para dichas pruebas se realizó un premezclado de los sólidos inertes, tanto manualmente así como también empleando el mezclador a las diferentes condiciones de operación. Las mezclas fueron completadas con la nitroglicerina y mezcladas durante 15, 20, 25 y 30 minutos, siguiendo los procedimientos de seguridad propios de Explocen C. A. Con estas mezclas se fabricaron cartuchos de dinamita, para luego de las mediciones compararlos con la velocidad de detonación estándar actual.

El estudio determinó que la mejor velocidad de operación del pre mezclador cónico vertical piloto, es a 70 rpm del tornillo sin fin, 30 % de capacidad y un tiempo de 190 segundos.

Con estos resultados se evidenció que la mezcla, mejoró la homogenización y de esta manera se obtiene un producto de mejor calidad, que satisface las necesidades y requerimiento de la empresa Explocen C. A.

## **ABSTRACT**

In the present study the pilot vertical conic mixer was designed, constructed and evaluated for the study of the operating conditions to be applied in the production of dynamite at Explocen C. A.

This study was performed in order to satisfy the requirements of the company, testing mixing parameters like: time, speed in revolutions per minute, loading rates of raw materials consisting of ammonium nitrate, sawdust, corn meal using sodium chloride reagent as a tracer.

The determination of mixing optimum time, graphs with mixing index versus time were analyzed and it was established that the best time is when the index of mixing tends to stay constant.

To evaluate the quality of dynamite were performed tests of the detonation velocity with a specialized approved equipment (VOD meter). For these tests were performed a premixed inert solids, manually and also using the mixer to the different operating conditions. The mixes were completed with nitroglycerin and mixed for 15, 20, 25 and 30 minutes, following the proper Explocen C. A safety procedures. With these mixes were manufactured dynamite cartridges, and then compared the measurements with the current standard detonation velocity.

The study determined that the best operating screw speed of the pilot pre vertical conical mixer was 70 rpm, 30% of total capacity with a mixing time of 190 seconds.

With these results was evidenced that the mixture improved its homogenization, and obtained a better quality than current product that meets the needs and requirements of Explocen.

## INTRODUCCIÓN

Explocen C. A. es una empresa ecuatoriana de economía mixta, constituida en el año de 1977, siendo sus objetivos la fabricación, importación, exportación, almacenamiento, comercialización y distribución de explosivos industriales y accesorios de voladura para el mercado hidrocarbúrico, minero, obra civil, Fuerzas Armadas y Policía Nacional.

Actualmente la empresa, en la línea de dinamitas, no dispone de un proceso de pre mezclado de los sólidos inertes, lo que genera una deficiente homogenización de las materias primas, produciendo variabilidad en la calidad del producto, especialmente en su velocidad de detonación (VOD).

Para solucionar este inconveniente la empresa desea construir un mezclador cónico vertical, el cual tiene un amplio uso en industrias de este tipo, ya que el mecanismo de mezclado efectúa dos movimientos simultáneos permitiendo así un íntimo mezclado y además eliminación de los grumos que se forman debido a las propiedades higroscópicas de la materia prima, sobre todo los nitratos.

Con el estudio Explocen C.A. desea aumentar la capacidad de producción de las dinamitas con una baja variabilidad en la velocidad de detonación y almacenar las mezclas de las materias primas inertes en sacos de 25 Kg en las bodegas respectivas para disponer de un stock adecuado

Se propuso el diseño del mezclador, cuyo dimensionamiento considera las propiedades específicas de la materia prima usada, los materiales adecuados y los mecanismos de motricidad del mezclador, luego de lo cual se procedió a la construcción de un mezclador piloto para estudiar y definir la mejor velocidad de operación del mezclador, el porcentaje de carga y los tiempos óptimos de mezclado.

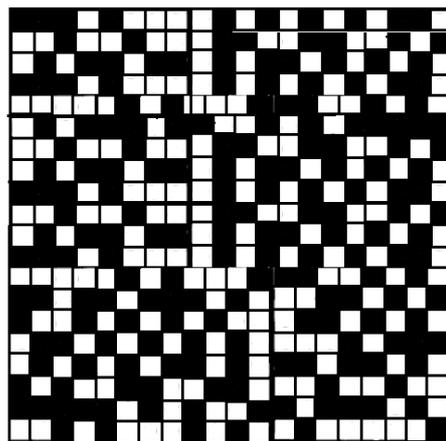
El estudio demuestra que las condiciones de operación óptima de 70 rpm y 30% de carga, permiten lograr una disminución en la variabilidad de la velocidad de detonación de los cartuchos de dinamita.

# 1. PARTE TEÓRICA

## 1.1 MEZCLADO

### 1.1.1 CONCEPTO

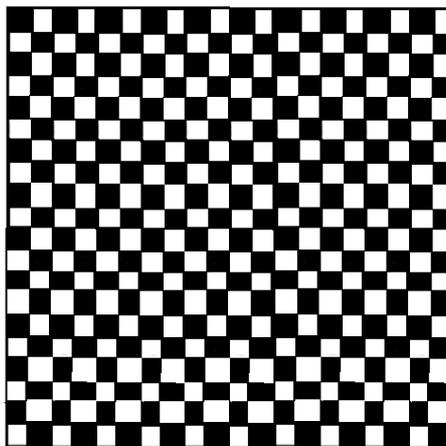
El mezclado es una operación unitaria fundamental en casi todos los procesos químicos. Es el proceso en el cual varios componentes se ponen en contacto en forma aleatoria, de tal manera que al final de la operación se obtenga un sistema uniforme (homogéneo).



**Figura 1.** Mezclado aleatorio

(Aulton, 2002)

No existe un mezclador ideal en el que la uniformidad sea total (grado de mezcla), es decir en el que todas las partículas se distribuyan uniformemente entre las otras debido a factores que producen segregación en las partículas. (Helman, 1982).



**Figura 2.** Mezclado ideal

(Aulton, 2002)

### **1.1.2 HOMOGENEIDAD**

“La homogeneidad del producto 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 la materia prima” (Fellows, 2000).

El grado de homogeneidad alcanzado también depende del tipo de método usado para analizar las muestras, el número de muestras analizadas, lugar en donde se tomaron las muestras y las propiedades deseadas en la mezcla. (Banchero y Badger, 1955).

La medida del grado de homogeneidad alcanzado en un cierto equipo, se basa en la desviación estándar o la varianza respecto a su valor medio. Para determinar el tiempo necesario para lograr una mezcla homogénea (estandarización del proceso de mezclado) se toman muestreos periódicos en condiciones determinadas y en varios puntos del lecho del mezclador, a ciertos intervalos de tiempo hasta obtener una proporción constante.

### 1.1.3 CONTROL DE LAS MUESTRAS

“Los análisis cuantitativos se basan en dos mediciones. La masa o el volumen de la muestra que se va a analizar y la medición de alguna cantidad que es proporcional a la cantidad de analito en dicha muestra”. (Skoog *et al.*, 1995)

Es de gran importancia la selección adecuada del método de análisis, el mismo que depende de la exactitud requerida, complejidad de la muestra que se analiza, cantidad de componentes, tiempo y dinero disponibles. (Walter y Banchemo, 1955).

Para realizar el análisis del material se requiere que éste sea representativo de todo el lote, además se debe tener en cuenta dos aspectos importantes, las propiedades físicas del material a muestrear y el procedimiento de extracción de la muestra.

Existen varios tipos de análisis que se pueden realizar para determinar la uniformidad de los lotes:

- a) Refractometría
- b) Gravimetría
- c) Contaje de partículas
- d) Técnicas de separación de los componentes por solventes, tamizado, etc.
- e) Indicadores o trazador
- f) Titulaciones volumétricas.
- g) Espectrofotometría
- h) Fluorescencia.
- i) Espectrometría de masas
- j) Calor de reacción
- k) Conductividad térmica

## **1.2 PROPIEDADES QUE AFECTAN AL MEZCLADO DE SÓLIDOS**

### **1.2.1 PROPIEDADES**

Las propiedades de los ingredientes dominan la operación de mezclado, el mezclado de sólidos se vuelve complejo cuando existen considerables diferencias en los valores.

### **1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SÓLIDOS**

Uno de los principales problemas que se presenta en el mezclado de sólidos es la segregación. Ésta es la tendencia a la separación de los componentes de la mezcla y las causas principales son:

- Distribución del tamaño de partícula
- Densidad del sólido a granel
- Densidad real o peso específico
- Forma de las partículas
- Características especiales como el área superficial, la tendencia a adquirir carga estática, entre otras.
- Características del flujo como el ángulo de reposo y la fluidez
- Friabilidad que es la tendencia del material a romperse en partículas de menor tamaño.
- Estado de aglomeración referente a si las partículas se presentan independientes unas de otras o por el contrario adheridos formando agregados.
- Humedad
- Limitaciones térmicas de los reactivos

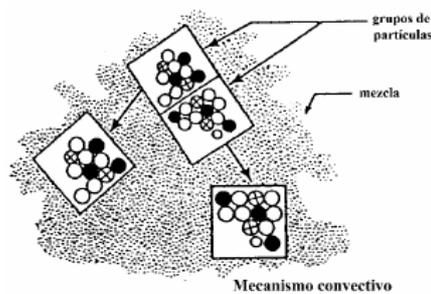
Es de gran importancia preparar a los sólidos antes de que ingresen al mezclador para así evitar diferencias extremas entre ellos y disminuir los problemas de segregación. (Perry H. Robert y Green W., 2001).

### 1.3 MECANISMOS DE MEZCLADO

El mezclado de sólidos se basa en tres mecanismos esenciales (Aulton, 2002), que son:

#### 1.3.1 CONVECCIÓN

Es el movimiento de grupos de partículas grandes del material en forma de bloque de un lugar a otro distante en el lecho del mezclado.

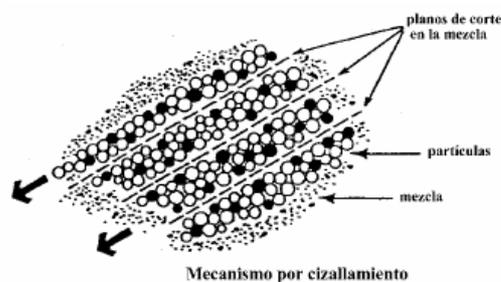


**Figura 3.** Mecanismo convectivo

(Lieberman y Lachaman, 1981)

#### 1.3.2 FALLAS O CIZALLAMIENTO

Es el movimiento de planos entre diferentes regiones del lecho del mezclado, en forma individual en las masas o en forma de flujo laminar.

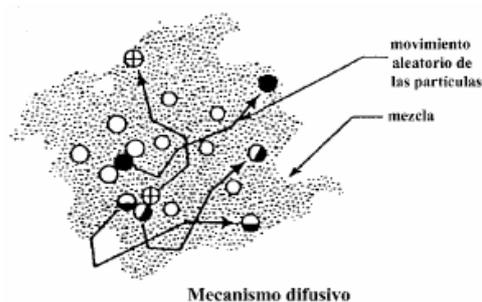


**Figura 4.** Mecanismo por cizallamiento

(Lieberman y Lachaman, 1981)

### 1.3.3 DIFUSIÓN

Es el movimiento de partículas individuales sobre la superficie del lecho, cambiando la posición relativa de la partícula respecto al lecho.



**Figura 5.** Mecanismo difusivo

(Lieberman y Lachaman, 1981)

## 1.4 TIPOS DE MEZCLADORES

El número de modelos de mezcladores utilizados para mezclar materiales es amplio, debido a la infinita variedad de sustancias que pueden mezclarse, razón por la cual el mezclador adecuado va a depender del uso para el que se requiere teniendo en cuenta las características del material como densidad, tamaño, forma entre otras. (Perry y Green, 2001)

Se puede clasificar a los mezcladores en dos grandes clases:

- Inmóviles o estáticos
- Móviles

### 1.4.1 MEZCLADORES ESTÁTICOS

Son equipos en los cuales la carcasa permanece fija y en su interior existen varios elementos como aire, cuchillas, tornillos o paletas que realizan la tarea de mezclado.

Se caracterizan por proporcionar un mezclado eficiente de las partículas, con poca generación de calor.

#### **1.4.1.1 Mezclador de cinta**

Consiste en un tambor horizontal con un eje axial de soporte y un agitador de cintas que puede tener la forma de espiral, paletas o de tornillo helicoidal.

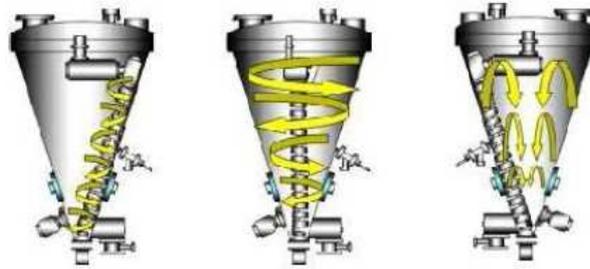
El mezclador opera mediante dos cintas que actúan en sentidos contrarios permitiendo el movimiento del material a lo largo del tambor, evitando la acumulación de partículas en los extremos del mezclador y la formación de zonas muertas sin agitación. Adicionalmente se presenta un movimiento radial que permite que asciendan las partículas a través de las paredes.



**Figura 6.** Mezcladores de cinta  
(Nu-Con, 2010)

#### **1.4.1.2 Mezclador de Tornillo sin fin vertical**

Consiste en una carcasa cónica con un tornillo sin fin interno el cual efectúa dos movimientos simultáneos. El primero es un movimiento planetario (movimiento circular paralelo a la bisectriz del cono) que permite el desplazamiento del material hacia el centro del mezclador y el segundo es un movimiento de rotación sobre su propio eje, el cual hace que el material sea transportado hacia arriba y luego por efecto de la gravedad regrese al fondo.



**Figura 7.** Mezcladores de tornillo sin fin verticales  
(Littleford)

#### 1.4.1.3 Mezclador de Paletas

Consiste en un recipiente cilíndrico vertical el cual consta de un eje central provisto de palas o paletas. La mezcla del material se produce debido a la rotación del eje.



**Figura 8.** Mezclador de paletas  
(Nu-Con, 2010)

#### 1.4.1.4 Mezclador de Palas Planetario

Consiste en un recipiente cilíndrico vertical el cual consta de un eje vertical con paletas que rotan en un movimiento planetario. Se diferencia del mezclador de paletas por el tipo de movimiento del eje.



**Figura 9.** Mezclador palas planetario.

(Emjuvi, 2007)

#### 1.4.1.5 Mezclador Sigma

Consiste de un cilindro vertical provisto de cuchillas pequeñas propulsoras localizadas en su fondo.



**Figura 10.** Mezclador Sigma

(Farmacotecnia, 2004)

#### 1.4.1.6 Mezclador de barra z

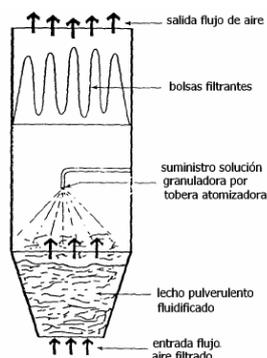
Consiste en un recipiente cilíndrico horizontal con dos ejes paralelos (cuchillas espirales) los cuales giran en direcciones contrarias y diferentes velocidades, produciendo un movimiento tangencial que arrastra la masa hacia abajo, donde sufre un efecto de corte entre las palas y el fondo.



**Figura 11.** Mezclador barras z  
(LLeal)

#### 1.4.1.7 Mezclador de Lecho fluidizado

Se fundamenta en la acción de un chorro de aire a altas velocidades el cual traslada el material a través de una cámara donde todas las partículas se entremezclan en un flujo turbulento



**Figura 12.** Mezclador de lecho fluidizado.

(Farmacotecnia, 2004)

## 1.4.2 MEZCLADORES MÓVILES

Son equipos que se basan en el movimiento de la carcasa y las fuerzas de gravedad, lo que permite el volcamiento del material. La velocidad óptima de rotación va a depender del tamaño, forma del mezclador, tipo de material a mezclar entre otras propiedades. La velocidad es un parámetro importante pues si es demasiado lento el movimiento de cascada no se produce en forma adecuada, y al ser demasiado rápido el material se mantendrá en las paredes del mezclador debido a la fuerza centrífuga. (Fellows, 2000).

### 1.4.2.1 Mezclador de tambor cilíndrico o cúbico

Consiste en una carcasa de forma cilíndrica o cúbica la cual será estructurada para rotar con la ayuda de un eje, permitiendo que se produzca un flujo cruzado del material.



**Figura 13.** Mezclador de tambor

(Laval, 2005)

### 1.4.2.2 Mezclador bicónico

Consiste en dos conos que se encuentran unidos a un anillo cilíndrico horizontal, el cual es parte de un eje. El mezclado se da ya que durante la rotación del eje, el material ubicado en el cono inferior sobrepasa el ángulo de reposo, haciendo que las

capas superficiales del material rueden hacia el cono opuesto incrementándose la cantidad del material desplazado cuando el cono se aproxima a su posición más baja.



**Figura 14.** Mezclador doble cono  
(LLeal)

#### 1.4.2.3 Mezclador en V o de Calzoncillo

Consiste en dos cilindros unidos en sus extremos con un ángulo que oscila entre 45 y 90°. La rotación del mezclador se da en un solo plano y dependiendo del modelo de la carcasa su acción cambia la orientación del polvo en 90 o 45°.

El procedimiento de mezclado es similar al que ocurre en el mezclador bicónico antes mencionado.



**Figura 15.** Mezclador en V  
(LLeal)

### 1.4.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MEZCLADORES

En las siguientes tablas presentadas a continuación se podrán observar las ventajas y desventajas de los mezcladores, para de esta forma tener una idea más clara de las características de los mezcladores y poder hacer una comparación.

**Tabla 1.** Ventajas y Desventajas del mezclador en V

Tipo de Mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador de polvos en V</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usa el mecanismo de convección para la mezcla</li> <li>• Mezclado suave</li> <li>• Ideal para material abrasivo y de manipulación delicada</li> <li>• Alta capacidad</li> <li>• Moderado consumo de energía</li> <li>• Fácil mantenimiento</li> <li>• Fácil operación</li> <li>• Adición de líquidos hasta un máximo del 10%</li> <li>• Generación mínima de calor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No útil para polvos de alta cohesividad</li> <li>• Dificultad en la limpieza de equipo (eje central)</li> <li>• No sirve para romper aglomerados</li> <li>• Requiere un largo tiempo de mezclado</li> <li>• No producen un buen flujo cruzado a lo largo del eje</li> </ul>

**Tabla 2.** Ventajas y Desventajas del mezclador Bicónico

Tipo de mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador Bicónico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga y descarga fácil</li> <li>• Fácil limpieza</li> <li>• Tiempo de mezclado corto</li> <li>• Mezcla suave</li> <li>• Fácil flujo de polvos secos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No sirve para romper aglomerados</li> <li>• No útil para polvos de alta cohesividad</li> <li>• No producen un buen flujo cruzado a lo largo del eje</li> </ul>

**Tabla 3.** Ventajas y Desventajas del mezclador de tambor cilíndrico o cúbico

Tipo de Mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador de tambor cilíndrico o cúbico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mezclado a través de la gravedad</li> <li>• El mezclado se da por difusión</li> <li>• La inclinación mejora el flujo cruzado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poca eficiencia</li> <li>• Adhesión del material a las paredes</li> <li>• Dificultad para el vaciado</li> <li>• No producen un buen flujo cruzado a lo largo del eje</li> </ul>

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas del mezclador de tornillo vertical

Tipo de mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador de tornillo vertical</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mezclado mediante difusión (rotación del tornillo sin fin)</li> <li>• Mezclado mediante convección(movimiento planetario del tornillo sin fin)</li> <li>• Mezclado mediante cizallamiento</li> <li>• Mezclado rápido</li> <li>• Consumo bajo de energía</li> <li>• Rompimiento de los aglomerados</li> <li>• Útiles cuando se debe incorporar una pequeña cantidad de un producto a una masa grande de material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede producir algo de abrasión por la caída libre a la que se somete los gránulos y por el choque de éstos contra las paredes del equipo</li> <li>• Dificultad para la limpieza</li> </ul>

**Tabla 5.** Ventajas y Desventajas del mezclador de cinta

Tipo de mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador de cinta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene movimiento radial y axial</li> <li>• Mezclado mediante cizallamiento</li> <li>• Mezclador de velocidad baja</li> <li>• Moderado consumo de energía</li> <li>• Buen barrido del material</li> <li>• Rompimiento de partículas debido al roce de las cintas y de la carcasa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil limpieza</li> <li>• Se genera abrasión</li> <li>• No apto para ciclos largos de mezclado</li> <li>• Posee una velocidad baja de mezclado</li> <li>• Soporta pequeñas cargas</li> <li>• Requieren alta energía para su funcionamiento</li> </ul>

**Tabla 6.** Ventajas y Desventajas del mezclador de palas planetario

Tipo de mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador de palas planetario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede mezclar polvos semisólidos y líquidos eficientemente</li> <li>• Rompimiento de grumos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son lentos</li> <li>• Consumen bastante energía</li> <li>• Generan calor dentro de la mezcla de polvos</li> </ul>

**Tabla 7.** Ventajas y Desventajas del mezclador Sigma

Tipo de mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador Sigma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rompimiento de los aglomerados</li> <li>• Útil para materiales pastosos de viscosidad alta o muy pegajosos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce calentamiento del material</li> <li>• Consume mucha energía</li> <li>• Difícil limpieza</li> <li>• Mezclado lento</li> </ul>

**Tabla 8.** Ventajas y Desventajas del mezclador barra Z

Tipo de mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador barra Z</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectivos en la distribución de fluidos en la masa del polvo</li> <li>• Mezclado de masas pegajosas duras y densas(gomas), granulados (CaCO<sub>3</sub>), adhesivos dentales y polímeros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultad en el vaciado</li> <li>• Susceptibilidad a la contaminación</li> <li>• Lentitud</li> <li>• Alto consumo de energía</li> <li>• Difícil limpieza</li> </ul>

**Tabla 9.** Ventajas y Desventajas del mezclador lecho fluidizado

Tipo de mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Mezclador lecho fluidizado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede granular y secar el material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los polvos no pueden ser cohesivos</li> <li>• La diferencia entre densidades debe ser mínima para evitar la segregación</li> </ul>

A partir de las ventajas y desventajas presentadas en las Tablas anteriores se han analizado subjetivamente las características de los mezcladores, concluyendo que el mezclador cónico vertical, es el que mejor se ajusta a las necesidades requeridas, las cuales son: evitar la formación de aglomerados por parte de los materiales cohesivos, uniformidad aceptable de mezclado debido a la acción de los tres mecanismos de mezclado, bajo consumo de energía.

Adicionalmente, por las características de los materiales a mezclar y la simplicidad de los mecanismos móviles no presenta un desgaste considerable este tipo de mezclador, incrementándose así la vida útil. Existe una similitud en las características de los diferentes tipos de mezcladores, sin embargo en lo concerniente a la formación de aglomerados, el mezclador de tornillo vertical evita dicho fenómeno

## 1.5 PROPIEDADES DE LA MATERIA PRIMA

### 1.5.1 NITRATO DE AMONIO

Es una sal formada por iones de nitrato y de amonio, representados según la fórmula molecular  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Se trata de un compuesto incoloro e higroscópico, con una solubilidad de 66,1 g/100 g de agua (20 °C), siendo este valor alto. Presenta riesgo pues es explosivo y autodetonante en ausencia de agua o si se aplica calor o fuego. (Yinon y Zitrin, 1993).

El término higroscópico es la capacidad de algunas sustancias de absorber o ceder humedad al medio ambiente, a menudo son utilizados como desecantes podemos citar algunos compuestos higroscópicos: Cloruro de sodio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, sulfato de cobre, pentóxido de fósforo entre otros.

#### 1.5.1.1 Propiedades del nitrato de amonio

**Tabla 10.** Propiedades físico químicas del Nitrato de Amonio

Propiedad	Valor	Unidades
Peso molecular	80,0	Kg/Kgmol
Temperatura de fusión	169,6	°C
Densidad	800-1000	Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de ebullición	210	°C
Temperatura de descomposición	210	°C
Solubilidad en agua*	66,1	g/100g de agua (2°C)
Energía de formación	1057	Kcal/Kg
Entalpía de formación	1091	Kcal/Kg
Balance de Oxígeno	+19,99	%
Contenido de Nitrógeno	34,98	%
Volumen de detonación de los gases	0,980	M <sup>3</sup> /Kg
Pruebas de bloque de plomo	1,8E-4	M <sup>3</sup> /0,010Kg
Capacidad de retención Fuel Oil	11,0	%Mínimo
Materiales insolubles en agua	0,20	%Máximo
pH (10% solución a 20 °C )	4,5 a 6,0	

(Rudolf Meyer, 1993)

(Yinon y Zitrin, 1993)\*

### **1.5.1.2 Usos y Aplicaciones**

Dependiendo de la porosidad de los gránulos, la densidad, capacidad para absorber el combustible, superficie específica, el nitrato de amonio se clasifica en:

- Grado explosivo
- Grado fertilizante

El uso principal como fertilizante (grado fertilizante) se debe a su alto contenido de nitrógeno. El nitrato es aprovechado directamente por las plantas mientras que el amonio es oxidado por los microorganismos presentes en el suelo a nitrito o nitrato y sirve de abono de más larga duración. En la fabricación de explosivos (grado explosivo) se realizan mezclas con otros componentes como por ejemplo con derivados de petróleo para obtener los explosivos anfo.

Al ser un compuesto oxidante es necesario evitar el contacto con productos incompatibles (materiales combustibles), almacenando el producto en un área seca y ventilada.

### **1.5.2 ASERRÍN**

Es una especie de polvo, más o menos grueso, que se desprende de la madera cuando la asierran. Por este motivo las propiedades químicas del aserrín se asumen las de la madera.

La madera es una sustancia fibrosa heterogénea, formada por enlaces cruzados en el que los carbohidratos y la lignina forman tejidos con propiedades y características que dependen de varios factores, tales como composición, constitución, organización, entre otros.

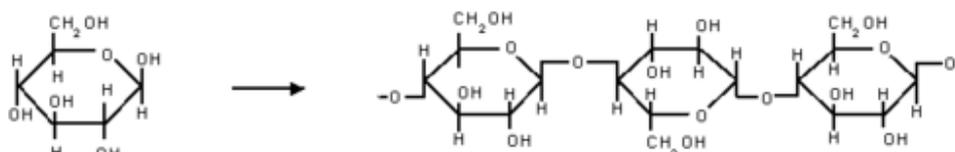
La madera es un material higroscópico pero insoluble en agua, debido a que absorbe o desprende agua en función del ambiente que le rodea. Además, el compuesto que

se encuentra en mayor porcentaje en la madera es la celulosa (45 %-50 %). (Casey, 1991).

La celulosa es un polisacárido lineal, de alto peso molecular, con un grado de polimerización de aproximadamente 4000 a 5000 tanto para las maderas suaves como para las duras.

La fórmula molecular de la celulosa es la siguiente  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . No presenta sabor, olor y se caracteriza por ser biodegradable e insoluble en solventes orgánicos. La celulosa presenta una estructura cristalina, en donde las moléculas se encuentran ordenadas y otra región en donde las moléculas se encuentran desordenadas, llamada región amorfa, la degradación térmica de la celulosa ocurre a temperaturas mayores de 250 °C, formándose levoglucosana y una variedad de productos inorgánico.

La celulosa se forma por la unión de moléculas de  $\beta$ -glucosa mediante enlaces  $\beta$ -1,4-O-glucosídico. Por hidrólisis de glucosa.



**Figura 16** Estructura de la celulosa

(Zamora, 2008)

### 1.5.2.1 Propiedades del Aserrín

**Tabla 11.** Propiedades físico químico del aserrín

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	128-640	Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	0,3-0,6	Kcal/Kg°C
Humedad	50-60	%
Composición		
Celulosa	45-50	%
Lignina	19-24	%
Hemicelulosa	19-25	%
Libertad	22-115	cc
Indice de rotura	0,93-1,19	Kpa.m <sup>2</sup> /g

(Casey, 1991)

### 1.5.2.2 Usos y Aplicaciones

Es usada en la fabricación de papel, cartón, explosivos (nitrocelulosa), seda artificial, rayón, celofán, barnices, esponjas hidrofílicas, en la síntesis de diversos productos químicos, películas fotográficas, entre otros, ya que presentan propiedades estabilizantes, espesantes, aglutinantes, dan resistencia, suavidad a los productos, es filtrante, absorbente, como adhesivo solubles en agua.

### 1.5.3 HARNINA DE MAÍZ

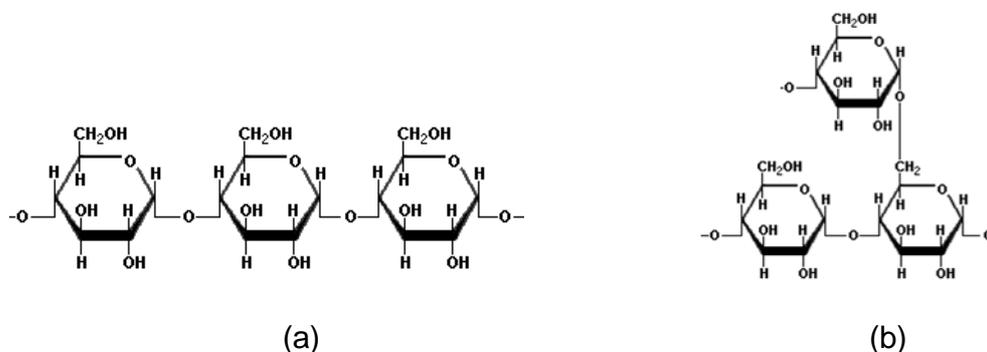
Es un polvo fino obtenido de la molienda del grano seco del maíz, está formado fundamentalmente por almidón y zeína, un tipo de proteína. Se presenta como un polvo amarillento con un sabor característico y agradable. Los datos presentados en la Tabla 12, son datos referentes al almidón, debido al alto porcentaje de este en el maíz, aproximadamente (71 %) en seco.

### 1.5.3.1 Propiedades

Los almidones son cadenas largas con unidades repetidas de glucosa, unidas mediante enlaces glicosídicos o hemiacetales (configuración  $\alpha$ ), formado por dos tipos de moléculas amilosa y la amilopectina.

La solubilidad del almidón en solventes polares se debe a los grupos hidroxílicos, sin embargo, debido a la tendencia del almidón a formar uniones de hidrógeno intermolecular de los hidroxilos del almidón se produce una solidificación de las soluciones concentradas de almidón. (Casey, 1991)

Al aumentar la temperatura del agua esta penetra más fácilmente en el almidón, experimentando un ligero hinchamiento de sus gránulos, en forma simultánea la amilosa es lixiviada del gránulo hinchado, razón por la cual la viscosidad de la dispersión aumenta a medida que se ponen en contacto los gránulos.



**Figura 17.** Estructura de la amilosa (a) y amilopectina (b)

(Zamora, 2008)

Al calentarse los gránulos de almidón sufren el proceso denominado gelatinización que consiste en el desordenamiento de las moléculas. En la harina de maíz se presenta una tendencia muy alta a la gelificación y aumento de la viscosidad a temperaturas entre los 62 °C y 72 °C.

La harina presenta adicionalmente pequeñas cantidades de calcio, magnesio, sodio, potasio entre otros que proceden de la parte externa del maíz durante la molienda.

### 1.5.3.1 Propiedades del almidón

**Tabla 12.** Propiedades físico químico del almidón

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Tamaño del gránulo	1E-5 a 2,5E-5	M
Fuerza de hinchazón (95 °C)	24	
Temperatura de gelatinización	62-72	°C
Solubilidad en agua fría	0,32	%
Humedad	11-13	%
Proteína	0,3-0,5	%
Ceniza	0,1	%

(Casey, 1991)

### 1.5.3.2 Usos y Aplicaciones

Por estas características se observa que se hace uso de la harina como adhesivo, formador de películas, estabilizante de espumas, aglutinante, entre otros. Sin embargo, en la actualidad se ha observado que puede ser usado también como un agente antiadherente.

Se recomienda que en el almacenamiento de la harina de maíz se considere:

- Vigilar la humedad de la zona pues se da una alteración del almidón.
- Tener cuidado con las plagas, larvas, gusanos, cucarachas, etc.
- Ventilar las harinas mediante el cambio de posición, principalmente cuando hay un aumento de la temperatura.

## **1.6 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO Y OPERACIÓN**

### **1.6.1 CARACTERÍSTICAS**

Entre las características a considerarse para el diseño y posteriormente durante la operación (Perry y Green, 2001).

Es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

#### **1.6.1.1 Uniformidad de la muestra**

El equipo debe asegurar un mezclado homogéneo para el lote, para lo cual se debe tomar en cuenta la relación entre el grado de mezcla y el tiempo de operación

#### **1.6.1.2 Tiempo de mezclado**

Es importante para alcanzar un alto grado de homogeneidad de la mezcla y alta eficiencia del mezclador.

#### **1.6.1.3 Carga y descarga**

Dado que la carga y descarga de los materiales conlleva un tiempo adicional al de mezcla, se debe tener presente disponer del material en localizaciones cercanas y en las cantidades adecuadas para evitar retrasos.

#### **1.6.1.4 Potencia**

Durante la operación del equipo se requerirá de la potencia necesaria para permitir que el equipo cumpla con las funciones de mezclado del material. Durante la

operación del equipo se presentan fuerzas y momentos que impedirán el movimiento para lo cual es necesario disponer de la potencia suficiente para vencerlas.

#### **1.6.1.5 Limpieza**

La facilidad, frecuencia, e intensidad de la limpieza son necesarias para la operación correcta del equipo tanto en la fase de mezclado como en el de carga y descarga del material.

#### **1.6.1.6 Rotura y desgaste de los aglomerados**

La rotura y desgaste de los aglomerados se dan mediante:

- Impacto
- Esfuerzos de compresión y cizalladura

#### **1.6.1.7 Formación de polvo**

Se minimizará la formación de polvos mediante:

- Uso de ingredientes menos purulentos.
- Ventilación adecuada para permitir la filtración del aire
- Carga y descarga del mezclador por dispositivos herméticos.
- Adición de líquidos en las mezclas que sean posibles.

#### **1.6.1.8 Carga electrostática**

Se debe procurar eliminar la carga electrostática ya que dificulta el mezclado de los materiales y la limpieza del equipo.

Se minimizarán el riesgo de carga electrostática de los materiales mediante:

- Adición de sólidos especiales con un alto coeficiente entre área superficial y peso.

- Adición de líquidos.
- Elección adecuada del material del equipo mezclador.
- Control de la humedad

#### **1.6.1.9 Desgaste del equipo**

El equipo sufre desgaste debido a la fricción y abrasión de las partes móviles por la presencia de los sólidos a ser mezclados. Es importante considerar el uso de recubrimientos resistentes que minimicen el desgaste

#### **1.6.1.10 Contaminación del producto**

Considerar la posibilidad de contaminación por lubricantes o durante el mantenimiento del equipo.

#### **1.6.1.11 Calentamiento o enfriamiento**

Debido a la fricción que ocurre durante la operación del equipo y las condiciones ambientales puede existir un calentamiento o enfriamiento que podría causar cambios en las propiedades de la mezcla. Por esta razón se dispone de mecanismos de control como:

- Agua, vapor o líquido refrigerado en la camisa y en el agitador interno.
- Aceite caliente
- Aceite térmico
- Calentadores eléctricos de contacto o radiantes.
- Aire caliente o frío en contacto directo con el producto.
- Calentamiento exterior del tambor por calefacción directa o indirecta.
- Líquidos que se evaporen como por ejemplo el amoníaco líquido
-

### **1.6.1.12 Flexibilidad**

La flexibilidad tiene que ver con la capacidad de operación del equipo, ya que el mezclador opera generalmente con el 50% de su capacidad “nominal o física”

### **1.6.1.13 Velocidad de rotación**

Será definida durante la operación del mezclador considerando la composición y propiedades de la mezcla para lograr una elevada homogeneidad.

## **1.7 CRITERIOS DE EFICIENCIA DE MEZCLADO**

Las propiedades de los materiales a mezclar, el equipo utilizado, las condiciones de operación son factores que influyen en la eficiencia del mezclado

### **1.7.1 INDICE DE MEZCLA**

El índice de mezcla relaciona el grado de homogeneidad con las propiedades de la mezcla requerida para así determinar el rendimiento del equipo.

Un método para determinar como varia la composición de las muestras durante el mezclado consiste en calcular la desviación estándar de cada fracción en muestras sucesivas. (Slevens, 1984).

La medición del funcionamiento del mezclador está basada en procedimientos estadísticos de un análisis de muestras puntuales tomadas de la mezcla en diferentes tiempos. El funcionamiento de un mezclador se caracteriza por:

- Tiempo
- Carga de energía
- Propiedades del producto final

Durante la operación de los mezcladores se actúa sobre dos o más materiales separados para interponerlos en una distribución al azar. Una vez que se ha alcanzado una distribución óptima, se puede considerar que la mezcla es completa para lo cual se evalúa el índice de mezclado o grado de mezclado. (Mc Cabe y Smith, 1975).

El grado de mezclado se mide mediante el análisis de muestras puntuales y comparando la desviación estándar estimada (S) con la desviación estándar para mezclado cero ( $\sigma_0$ ) según la fórmula:

$$I_p = \frac{S}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(N-1)\mu(1-\mu)}} \quad [1]$$

Donde:

S = Desviación estándar

$\sigma_0$  = Desviación estándar para mezclado cero

$I_p$  = Índice de mezclado

$x_i$  = Fracción del material trazador

$\bar{x}$  = Media

N = Número de muestras

$\mu$  = Fracción global del trazador en la mezcla.

Si existen diferencias entre los valores medidos de  $x_i$  y  $\bar{x}$ , la mezcla no es homogénea y su desviación estándar con respecto al valor medio de  $\bar{x}$  es una medida relativa del mezclado.

De esta manera se habla de una buena mezcla cuando el índice de mezclado va disminuyendo a medida que avanza la mezcla, llegando idealmente a un valor de cero. (Mc Cabe y Smith, 1975).

Hay que tener presente que la validación de estos resultados es solamente para ensayos de un material específico en un mezclador dado.

La eficacia de un determinado tipo de mezclador depende también de la naturaleza, consistencia del material que se ha de mezclar, puesto que el índice de mezcla está relacionado con las propiedades físicas del material objeto del mezclado y de la manera de tomar las muestras considerando la cantidad, el tamaño y sitio de toma de las muestras pues determina en gran medida la validez e interpretación del índice.

### **1.7.2 TIEMPO ÓPTIMO DE MEZCLADO**

El tiempo óptimo de mezclado es un parámetro que se obtiene al graficar el Índice de mezclado vs. Tiempo de mezclado, sirve para determinar el tiempo óptimo que se necesita para obtener el grado de mezcla adecuado, el mismo que depende de las características finales que se requiera que tenga el producto. (Helman, 1982).

Dicho parámetro influye en la homogeneidad de la mezcla debido a que en ciertas mezclas después de haber alcanzado el equilibrio entre las fuerzas segregativas y las del mezclado, si se continúa con la operación mas allá de dicho punto se rompe el equilibrio alcanzado y los productos comienzan a segregarse. (Mc Cabe y Smith, 1975).

Razón por la cual es muy importante controlar este tiempo óptimo de mezclado

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

Como paso previo para la selección, diseño y construcción del mezclador, se evaluaron propiedades físico-químicas de la materia prima como la densidad, humedad, tamaño de partícula entre otras, dada la importancia de estas características.

### **2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

#### **2.1.1 DENSIDAD**

Dada la ausencia de una norma específica para la medición de la densidad aparente del Nitrato de Amonio, Harina de Maíz y Aserrín, se consideró la metodología usada para el carbonato de sodio que se indica en la Norma INEN 1892, donde se hace uso de un recipiente cilíndrico con una capacidad de 500 cm<sup>3</sup>, al cual se lo llenó hasta que la materia prima rebose ligeramente y luego se lo pesó con todo el envase.

Este procedimiento se realizó para cada materia prima y en muestras paralelas, obteniendo los valores de masa presentados en la Tabla 28.

Una vez conocidas las densidades de cada material, y observando su cercanía a excepción del Aserrín se procedió hacer una mezcla de los tres materiales en las proporciones establecidas por Explocen C .A., las cuales no son indicadas por ser confidenciales. Esto se realizó debido a la importancia de conocer una densidad aparente aproximada para usarla en el diseño del mezclador.

La medición siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente y los resultados se presentan en la Tabla 29.

## 2.1.2 HUMEDAD

La determinación de la humedad se realizó siguiendo los procedimientos indicados en las normas INEN, específicas para cada una de las materias primas.

Para las pruebas se hizo uso de una estufa marca M emmet, perteneciente a Explocen C.A.

### 2.1.2.1 Nitrato de Amonio

Según la Norma INEN 222, se determinó el contenido de humedad del Nitrato de Amonio, para lo cual se colocó dos muestras en la Estufa a una temperatura de 90°C y por un tiempo de 4 horas.

Se calculó la humedad mediante la fórmula presentada en la Norma que se indica a continuación:

$$H = 100 \frac{m - m_1}{m} \quad [2]$$

Donde,

H = Contenido de Humedad, en porcentaje de Masa

m = Masa inicial, en g

m<sub>1</sub> = Masa final, en g

Aplicando la fórmula para cada muestra se obtuvo la humedad cuyos resultados son presentados en la Tabla 30.

### 2.1.2.2 ASERRÍN

Según la Norma INEN 1160, se determinó el contenido de humedad del Aserrín, para lo cual se colocó dos muestras en la Estufa a una temperatura de 103 °C y por un tiempo de 24 horas.

Se calculó la humedad mediante la fórmula que se indica a continuación:

$$H = 100 \frac{m - m_1}{m} \quad [3]$$

Donde,

H = Contenido de Humedad, en porcentaje de Masa

m = Masa inicial, en g

m<sub>1</sub> = Masa final, en g

Aplicando la fórmula para cada muestra se obtuvo la humedad cuyos resultados son presentados en la Tabla 31.

### 2.1.2.3 Harina de maíz

Según la Norma INEN 1513 para determinar el contenido de humedad de los granos de maíz, en el método de referencia básico se especifica que hay que realizar una molienda de los granos hasta convertirlos en harina, por lo que se comenzó desde este punto con la harina que tenemos como materia prima y se continuó el procedimiento, colocando dos muestras en la Estufa a una temperatura de 130 °C y por un tiempo de 4 horas.

Se calculó la humedad mediante la fórmula que se indica a continuación:

$$H = 100 \frac{m - m_1}{m} \quad [4]$$

Donde,

H = Contenido de Humedad, en porcentaje de Masa

m = Masa inicial, en g

m<sub>1</sub> = Masa final, en g

Aplicando la fórmula para cada muestra se obtuvo la humedad cuyos resultados son presentados en la Tabla 32.

#### 2.1.2.4 Cloruro de Sodio

Según la Norma INEN 49 para determinar el contenido de humedad del cloruro de sodio se siguió el procedimiento, colocando tres muestras en la Estufa a una temperatura de 250 °C y por un tiempo de 1 hora.

Se calculó la humedad mediante la fórmula que se indica a continuación:

$$\%H = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} * 100 \quad [5]$$

Donde,

%H = Contenido de Humedad, en porcentaje de Masa

$m_1$  = Masa inicial, en g

$m_2$  = Masa final, en g

$m$  = Masa del crisol vacío, en g

Aplicando la fórmula para cada muestra se obtuvo la humedad cuyos resultados son presentados en la Tabla 33.

#### 2.1.3 TAMAÑO DE LA PARTÍCULA

Para la determinación del tamaño de partícula se siguió el procedimiento descrito en la norma INEN 517, siendo esta norma direccionada para harinas de origen vegetal.

Se consideró el mismo procedimiento para las tres materias primas y la mezcla.

Se tomó 100 g de muestra, los cuales se colocaron en un tamiz vibratorio por un lapso de 5 minutos. Los tamices que componen el equipo para esta prueba son los de # 20, #30, #40 y #60.

El cálculo del porcentaje retenido, se lo realizó mediante la ecuación

$$\%MR = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100 \quad [6]$$

Donde:

%MR = Masa retenida, en porcentaje

m = masa de muestra, en g

$m_1$  = masa de tamiz sin muestra, en g

$m_2$  = masa de tamiz con muestra, en g

Los cálculos y sus gráficos respectivos se presentan en el Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5 y Anexo 6.

La materia prima analizada presenta variación en el tamaño de partícula, siendo este un problema en el mezclado debido a que existe segregación en las partículas. Por esta razón, es necesario moler tanto al aserrín como al maíz hasta obtener un tamaño de partícula similar.

Para acondicionar la materia prima se preparó mediante molienda en un molino de cuchillas marca Thomas, No de serie 720316. A la materia prima tratada se tamizó nuevamente siguiendo el proceso anterior.

Posteriormente, se procedió a realizar una mezcla en las proporciones establecidas por Explocen S. A. para llevar a cabo la prueba de tamizado de la mezcla. Dichos resultados serán necesarios para aplicar el método de Gy y de esta manera determinar el tamaño de muestra representativa.

## **2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MEZCLADOR PILOTO**

Para el diseño del mezclador cónico vertical es necesario definir ciertos parámetros fundamentales como la capacidad y el material a mezclar, los cuales determinan el material de construcción del mezclador, las revoluciones por minuto del tornillo sin fin y la potencia necesaria del motor para dar movimiento a los componentes que permiten mezclar la materia prima.

### 2.2.1 CAPACIDAD DEL MEZCLADOR

La capacidad del mezclador piloto estará definida por la masa de materia prima mínima, que permitan que los resultados obtenidos de las pruebas sean representativos, pudiendo usar esta información al momento de escalar el tamaño del mezclador.

Considerando el procedimiento expuesto en la Norma INEN 476, la cual establece el método de muestreo aleatorio o al azar para productos empaquetados o envasados; se dispone de la Tabla A1 que se presenta en el Anexo 7, mediante la cual se determinó el tamaño de muestra necesario para ser representativo.

Con dichas consideraciones, se tomó como referencia la capacidad de producción de dinamitas en la empresa Explocen C.A., la cual es de  $250 \frac{Kg}{h}$ . Adicionalmente, se conoce que el peso promedio para cada cartucho de dinamita es de 119 g y en cada lote se producen 10 cajas de dinamitas, las cuales contienen en su interior 210 cartuchos.

Se calculó el número de cartuchos de dinamitas por hora que se producen, haciendo uso de la relación presentada en la ecuación [7].

$$\frac{\text{Número de dinamitas}}{h} = \frac{\text{Capacidad de producción dinamitas (g)}}{\text{Peso de cada cartucho dinamita (g)}} \quad [7]$$

$$\frac{\text{Número de dinamitas}}{h} = \frac{250000 \frac{(g) \text{ dinamita}}{h}}{119 (g) \text{ dinamita}}$$

$$\frac{\text{Número de dinamitas}}{h} = 2100,84 \frac{\text{Dinamitas}}{h}$$

Mediante la Tabla A1 del Anexo 7, se determinó que para 2100 cartuchos de dinamita es necesario seleccionar 80 cartuchos para que los resultados obtenidos sean representativos del lote, requiriendo una masa total de 9520 g de material explosivo por hora.

Considerando las proporciones para la preparación de dinamita, se determinó que se requiere pre mezclar 8000 gramos de sólidos inertes cada hora.

### **2.2.2 MATERIA PRIMA**

Los sólidos inertes que forman parte de la mezcla para fabricar las dinamitas son:

- Nitrato de amonio
- Aserrín
- Harina de maíz

### **2.2.3 DIMENSIONAMIENTO DEL TORNILLO SIN FIN**

Definida la capacidad del mezclador y la materia prima a mezclar se siguió el procedimiento descrito en el Catálogo de Martin 1090, para el diseño del transportador de tornillo sin fin, así como también determinar las velocidades recomendadas y potencia necesaria.

#### **2.2.3.1 Procedimiento de diseño**

##### **- Características del material a ser transportado**

El material a ser transportado se clasificó según su tamaño, flotabilidad, abrasividad, corrosividad, etc. La materia prima a mezclar presenta las siguientes características, las mismas que se obtuvieron del catálogo de Martin 1090 y se encuentran en el Anexo 8.

- Nitrato de amonio: Material muy fino (0,016 in), flotabilidad intermedia, medianamente abrasivo, explosivo, higroscópico, medianamente corrosivo.
- Aserrín: Material fino (0,132in), lenta flotabilidad, medianamente abrasivo, higroscópico.
- Harina de maíz: Material fino (0,132in), flotabilidad media, medianamente abrasivo.

#### **- Capacidad requerida**

La capacidad requerida se estableció anteriormente la misma que es de 0,42 (ft<sup>3</sup>/h)

#### **- Distancia del material a ser transportada**

La distancia del material a ser transportado es de 18,36 in

#### **- Clasificación del material**

El material a ser transportado se clasificó de acuerdo al peso, código del material, factor (fm), porcentaje de alimentación, serie del componente, datos que se encuentran tabulados en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Características del material.

Material	Peso (lb/ft <sup>3</sup> )	Código del material	Factor de material (Fm)	Carga	Serie del componente
Nitrato de amonio	45-62	A40-35NTU	1,3	30 A *	3
Aserrín	10-13	B6-45UX	1,4	15	1
Harina de maíz	32-40	B6-35P	0,5	30 A	1

\*Capacidad de carga dependiendo de las propiedades del material (Martin 1090, 1993)

### - Capacidad de diseño

El nitrato de amonio así como también la harina de maíz tienen un porcentaje de carga establecido del 30%, como se puede observar en la Tabla 13.

Obteniendo este valor se ingresó a la Tabla 14 para determinar la capacidad a 1 rpm.

**Tabla 14.** Capacidades (ft<sup>3</sup>/hr) para transportadores de tornillo a 1rpm y max rpm

Carga	Diámetro tornillo sin fin (in)	Capacidad (ft <sup>3</sup> /hr)	Max rpm
		1 rpm	
30 % A	4	0,4	130
	6	1,49	120

(Martin 1090, 1993)

La capacidad a 1 rpm se obtuvo de los datos tabulados en el catálogo de Martin 1090, sin embargo, una limitante que se presenta se debe a que los diámetros del tornillo que se indican en la Tabla 14 y en el Anexo 9, son mayores a los que se usará en el equipo, razón por la cual se realizó un gráfico que relacione dicha

capacidad con el diámetro del tornillo. A partir de este gráfico se obtuvo la ecuación [8], la cual permite obtener valores a 1 rpm para diámetros de tornillo de menor capacidad.

En la Tabla 15 se encuentran tabulados los datos y la ecuación obtenida es la siguiente:

$$C\left(\frac{ft^3}{h}\right) = 0,008 \times (D_T)^3 - 0,023 \times (D_T)^2 + 0,144 \times D - 0,342 \quad [8]$$

En donde:

C= Capacidad a 1rpm, en  $\left(\frac{ft^3}{h}\right)$

$D_T$ = Diámetro tornillo, en in

**Tabla 15.** Capacidades (ft<sup>3</sup>/hr) para transportadores de tornillo a 1rpm y max rpm

Carga	Diámetro tornillo sin fin (in)	Capacidad (ft <sup>3</sup> /hr)	Max rpm
		1 rpm	
30 % A	2,6	0,0119	141
	3	0,099	138
	3,5	0,223	134
	4	1,42	130
	6	4,92	118
	9	6,8	102

(Martin 1090, 1993)

**- Revoluciones por minuto del tornillo sin fin (N)**

Para el cálculo de las revoluciones por minuto del tornillo sin fin, se utilizó la siguiente fórmula:

$$N = \frac{\text{Capacidad} \cdot \text{requerida} \frac{ft^3}{hr}}{\frac{ft^3}{hr} \text{alrpm}} \quad [9]$$

$$N = \frac{0,42 \frac{ft^3}{hr}}{0,01196 \frac{ft^3}{hr}} = 35 \text{ rpm del tornillo sin fin}$$

La velocidad de giro obtenida no considera factores como pasos del tornillo, tipos de hélice, número de paletas por paso, los cuales modifican dicha velocidad, razón por la cual es necesario corregirla.

La corrección se hizo mediante la capacidad equivalente

$$\text{Capacidad equivalente} = \text{Capacidad requerida} (ft^3/hr) * CF_1 * CF_2 * CF_3 \quad [10]$$

En donde:

$CF_1$  = Factor de capacidad debido a los pasos

$CF_2$  = Factor de capacidad debido al tipo de hélice

$CF_3$  = Factor de capacidad debido al número de paletas por paso

Dichos factores se encuentran tabulados en la Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18.

**Tabla 16.** Factor de capacidad para transportadores especiales con paso (Cf1)

Paso	Descripción	Cf1
Mitad	Paso=1/2 diámetro del tornillo	2,00

(Martin 1090, 1993)

**Tabla 17.** Factor de capacidad para transportadores especiales con hélice (Cf2)

Tipo de hélice	Porcentaje de carga en el transportador		
	15%	30%	45%
Ninguna	1,00	1,00	1,00

(Martin 1090, 1993)

**Tabla 18.** Factor de capacidad para transportadores especiales con paleta (Cf3)

Paletas estándar a 45°	Paletas por paso
Ninguno	1,00

(Martin 1090, 1993)

**- Capacidad equivalente**

Mediante la ecuación [10] se determinó la capacidad equivalente, obteniéndose el siguiente valor:

$$\text{Capacidad equivalente} = 0,84 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

Con la capacidad equivalente y la capacidad a 1 rpm se calculó las revoluciones por minuto del tornillo sin fin, mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\text{Capacidad requerida} \frac{ft^3}{hr}}{\frac{ft^3}{hr} a \text{rpm}} \quad [11]$$

$$N = \frac{0,84 \frac{ft^3}{hr}}{0,01196 \frac{ft^3}{hr}} = 70 \text{ rpm del tornillo sin fin}$$

Se obtuvo una velocidad de giro del tornillo sin fin de 70 rpm.

#### - Diámetro del tornillo sin fin

El diámetro del tornillo sin fin es función de la capacidad requerida, clasificación del material, porcentaje de carga.

Obtenidos estos datos y mediante la Tabla 15, se determinó el diámetro del tornillo sin fin, el cual tiene un valor de 2,6 in.

#### - Caballos de fuerza

Los caballos de fuerza requeridos para operar un transportador de tornillo vertical es función de tres factores, el necesario para impulsar el tornillo en vacío (HPf), el que se requiere para el desplazamiento del material (HPm) y el factor debido a la inclinación del tornillo (Hpi).

La ecuación para determinar los Hp Totales se indica a continuación

$$Hp_{Total} = \frac{(HPf + HPm + Hpi)Fo}{e} \quad [12]$$

En donde:

Fo = Factor de sobrecarga

E= Eficiencia

Dependiendo del material a ser transportado, diámetro del tornillo, tipo de rodamiento, tipo de hélice, número de paletas por paso se determinan los factores  $F_m$ ,  $F_d$ ,  $F_b$ ,  $F_f$ ,  $F_b$ ,  $F_o$ , dichos factores se encuentran en la Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21.

**Tabla 19.** Factor ( $F_m$ ) en función de las características del material.

Material	Factor $F_m$
Nitrato de amonio	1,3
Aserrín	1,4
Harina de maíz	0,5

(Martin 1090, 1993)

**Tabla 20.** Factor ( $F_d$ ) transportador de diámetro

Diámetro tornillo (in)	Factor $F_d$
2,6	10

(Martin 1090, 1993)

**Tabla 21.** Factor ( $F_b$ ) de rodamiento

Tipo de rodamiento		Factor ( $F_b$ )
H	Acero	4,4

(Martin 1090, 1993)

Los factores  $F_f$  y  $F_p$  tienen un valor de 1

Con los factores obtenidos se procedió al cálculo de  $HP_f$ ,  $HP_m$  y  $HP_i$  mediante las siguientes fórmulas:

- Caballos de fuerza necesarios para impulsar al tornillo en vacío ( $HP_f$ )

$$HP_f = \frac{LNFdFb}{1000000} \quad [13]$$

$$HP_f = \frac{1,53 \times 71 \times 10 \times 4,4}{1000000}$$

$$HP_f = 0,005$$

En donde:

L= Longitud total del transportador, en pies

N= Revoluciones por minuto

Fd= Factor del transportador de diámetro

Fb= Factor de rodamiento

- Caballos de fuerza necesarios para el desplazamiento del material ( $HP_m$ )

$$HP_m = \frac{CLWF_fF_mF_p}{1000000} \quad [14]$$

$$HP_m = \frac{0,42 \times 1,53 \times 41,74 \times 1 \times 1,31}{1000000}$$

$$HP_m = 3,5E - 5$$

En donde:

L= Longitud total del transportador, en pies

C= Capacidad, en  $ft^3/h$

W= Peso del material, en  $lb/ft^3$

Ff= Factor de hélice

Fm= Factor del material

Fp= Factor de paleta

- Caballos de fuerza debido a la inclinación del tornillo (Hpi)

$$Hpi = \frac{C_1 \times i}{33000} \quad [15]$$

$$Hpi = \frac{0,29 \times 1,53}{33000}$$

$$Hpi = 1,36E-05$$

En donde:

C<sub>1</sub>=Capacidad, en lb/min

I=Inclinación del tornillo, en ft

Obtenidos estos valores se procedió al cálculo de los Hp Totales, mediante la ecuación [12]

- Caballos de fuerza totales (HpTotal)

$$HPTotal = \frac{(0,005 + 3,5E - 5 + 1,36E - 5)3}{0,88}$$

$$HPTotal = 0,02$$

Dado que el mecanismo que genera el movimiento planetario y de rotación del tornillo sin fin tiene un peso representativo (16,6 kg), se ha calculado la potencia extra necesaria para dar movimiento al sistema a partir de una evaluación de torques.

El cálculo se lo realizó con la ecuación [16] presentada a continuación:

$$T = F \times d \quad [16]$$

En donde:

T = Torque, en Joule

F = Fuerza, en Newton

d = Distancia, en metros

Reemplazando los valores se tiene:

$$T = 162,8 \times 0,15$$

$$T = 24,42 \text{ J}$$

Para calcular la potencia se aplicó la ecuación [17]

$$P = \frac{T \times w}{746} \quad [17]$$

En donde:

P = Potencia, en hp

w = Velocidad angular, en radianes por segundo

Reemplazando los valores se tiene:

$$P = \frac{24,42 \times 2,20}{746}$$

$$P = 0,072 \text{ hp}$$

Considerando un factor de seguridad del 10 %, se obtiene una potencia de 0,08 hp.

La potencia total requerida para el sistema móvil del mezclador es de 0,1 hp.

### - Diámetro del eje

Para la determinación del diámetro del eje se graficó los valores que se encuentran tabulados en el catálogo de Martin 1090 en el Anexo 10 para poder encontrar una ecuación que me permita relacionar el diámetro del tornillo con el diámetro del eje, dado que los valores tabulados son para tornillos sin fin de gran capacidad.

Se obtuvieron los siguientes datos, con la siguiente ecuación de segundo orden:

$$D_{\text{eje}} = -0,041 \times (D_T)^2 + 0,784 \times D_T - 0,848 \quad [18]$$

En donde:

$D_{\text{eje}}$ =Diámetro del eje

$D_T$ = Diámetro del tornillo

**Tabla 22.** Dimensiones del diámetro del tornillo y diámetro del eje

Diámetro del tornillo (in)	Diámetro del eje (in)
2,6	0,9
4	1,63
6	2,38
9	2,88

(Martin 1090, 1993)

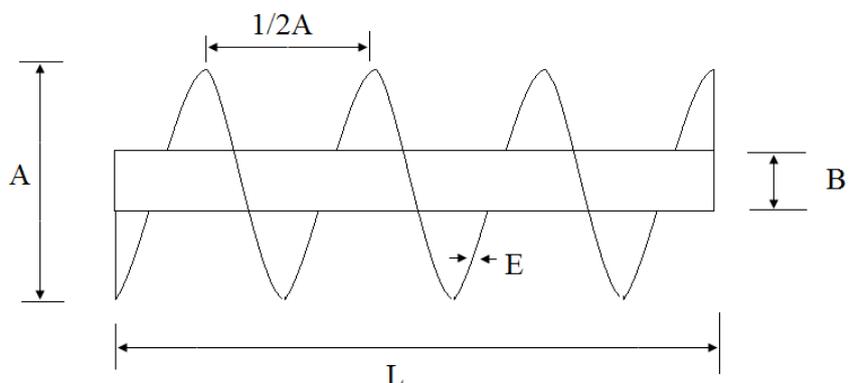
Con lo que se obtuvo las siguientes dimensiones para el eje del tornillo sin fin:

**Tabla 23.** Diámetro del eje y espesor de la hélice del tornillo sin fin

Diámetro del eje (in)	Espesor de la hélice (in)
0,9	0,155

#### 2.2.3.2 Dimensiones del tornillo sin fin

En la figura 18 y en la tabla 24 se presenta las dimensiones del tornillo sin fin



**Figura 18.** Dimensiones del tornillo sin fin

**Tabla 24.** Dimensiones del tornillo sin fin

Diámetro del tornillo (in)	Paso (in)	Diámetro del eje (in)	Espesor de la hélice (in)	Longitud (in)
A	$\frac{1}{2} A$	B	E	L
2,6	1,3	0,9	0,16	18,36

#### 2.2.4 DIMENSIONES DEL CONO

En base a la capacidad requerida la cual representa el 30% de carga en el mezclador, tiempo de mezclado y densidad de la mezcla se procedió al cálculo del volumen y la masa de los sólidos inertes, mediante la fórmula [19] y fórmula [20].

El tiempo de mezclado se definió en un valor de 20 minutos considerando la carga y descarga de los sólidos inertes

- **Volumen del cono para un 30 % de carga.**

$$V_c = C_r \times t_m$$

[19]

En donde:

$V_c$  = Volumen del cono con el 30 % de sólidos inertes, en  $m^3$

$C_r$  = Capacidad requerida, en  $\frac{m^3}{h}$

$T_m$  = tiempo de mezclado, en h

$$V_c = 0,012 \frac{m^3}{h} \times 0,33h$$

$$V_c = 0,004 m^3 \text{ (Mezclador con 30\% de mezcla)}$$

- **kg de mezcla para un 30 % de carga**

$$\text{kg mezcla} = \rho_m \times V_c \quad [20]$$

En donde:

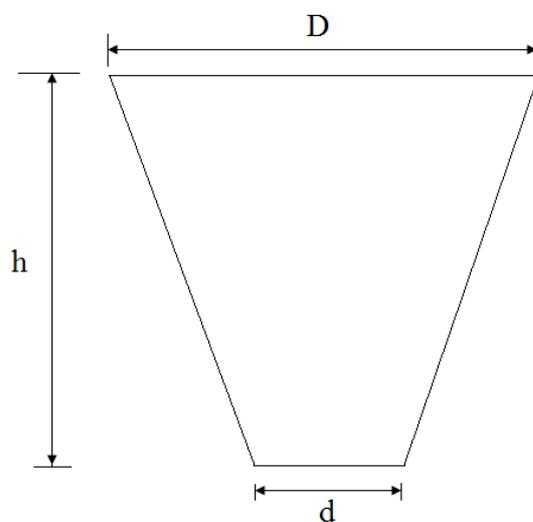
$\rho_m$  = Densidad de la mezcla, en  $\frac{kg}{m^3}$

$$\text{kg mezcla} = 668,69 \frac{kg}{m^3} \times 0,004 m^3$$

$$\text{kg mezcla} = 2,675 \text{ kg (30 \% de carga)}$$

El mezclador con el 30 % de sólidos inertes ocupa un volumen de  $0,004 m^3$ , con el 100 % de sólidos inertes, ocuparía un volumen de  $0,014 m^3$ .

Para el cálculo del volumen del cono se tiene la siguiente fórmula:



**Figura 19.** Dimensiones del cono

$$V_c = \frac{\pi \times h (D^2 + D \times d + d^2)}{12}$$

[21]

En donde:

$V_c$  = Volumen del cono, en  $m^3$

$D$  = Diámetro mayor, en m

$d$  = Diámetro menor, en m

$h$  = altura, en m

Mediante la fórmula [18] y con las siguientes dimensiones para el cono

**Tabla 25.** Dimensiones del cono

<b>Diámetro Mayor (D)</b> <b>(m)</b>	<b>Diámetro menor (d)</b> <b>(m)</b>	<b>Altura (h)</b> <b>(m)</b>
0,3	0,07	0,47

Se obtiene un volumen de  $0,014 m^3$

### **2.2.5 SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MEZCLADOR**

La selección del material del mezclador va a depender de las características de la materia prima a mezclar, debido a las propiedades corrosivas del nitrato de amonio se construyó tanto el trasportador del tornillo sin fin como el cono en acero inoxidable AISI 304 de espesor 1/8 in.

### **2.2.6 CONSTRUCCIÓN DEL MEZCLADOR**

Con las dimensiones obtenidas anteriormente, el análisis de los diferentes tipos de mezcladores y la selección del material adecuado para el mezclado de los sólidos inertes se procedió con la construcción del mezclador.

### **2.2.7 TAMAÑO DE MUESTRA**

Es necesario determinar la cantidad de muestra a tomar y cómo realizarlo para que el resultado cumpla con las especificaciones requeridas, es decir que sea representativa de todo el lote.

Mediante la teoría de Gy se puede determinar la cantidad mínima de muestra necesaria para obtener el mínimo error de muestreo.

La cantidad de muestra mínima a tomar es de 172,25 g según la teoría de Gy, en el Anexo 11 se presenta el cálculo para la determinación del tamaño de muestra mínimo.

Se analizaron 14 tiempos, lo que representa tomar 12,3 g de muestra para cada tiempo.

La norma INEN 51 establece que cada muestra debe contener 10 g y ser aforada a 1000 cm<sup>3</sup> para la determinación de la concentración de cloruro de sodio, lo que representa tomar una única muestra de 10 g para cada tiempo en el mezclador o tomar pequeñas porciones de muestra de diferentes secciones del mezclador hasta completar los 10 g, estos dos procedimientos no permiten evaluar el grado de

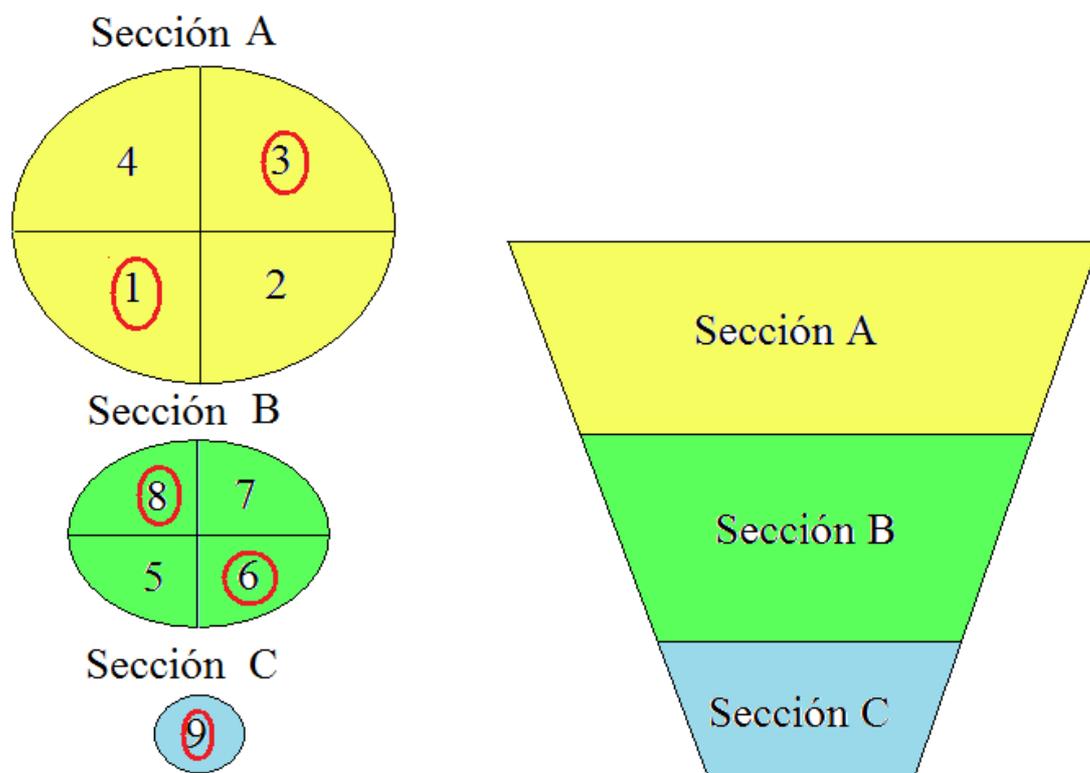
mezclado de las diferentes secciones del mezclador, razón por la cual se decidió tomar 5 muestras de 2,5 g cada una, en diferentes secciones del mezclador, para cada tiempo.

Se realizaron pruebas para comprobar que los 2,5 g de muestra aforado a 250 cm<sup>3</sup> consumen los mismos ml de titulante que los 10 g de muestra aforado a 1000 cm<sup>3</sup>, los resultados se indican a continuación en la tabla 26.

**Tabla 26.** Nitrato de plata (ml) gastados para 2,5 y 10 g de muestra

Matraz (ml)	Primera prueba		Réplica		Cloruro (ppm)
	Muestra (g)	Nitrato Ag (ml)	Muestra (g)	Nitrato Ag (ml)	
1000	10,0035	0,35	10,0015	0,35	49,63
250	2,5038	0,35	2,5017	0,35	49,63

En lo que respecta a la toma de muestras, al mezclador se lo dividió en 3 secciones (A, B, C), las secciones A y B se las dividió en cuatro porciones y a la sección C se la dividió en una porción, de las que se tomaron al azar 5 porciones (1, 3, 6, 8 y 9) de la siguiente manera:

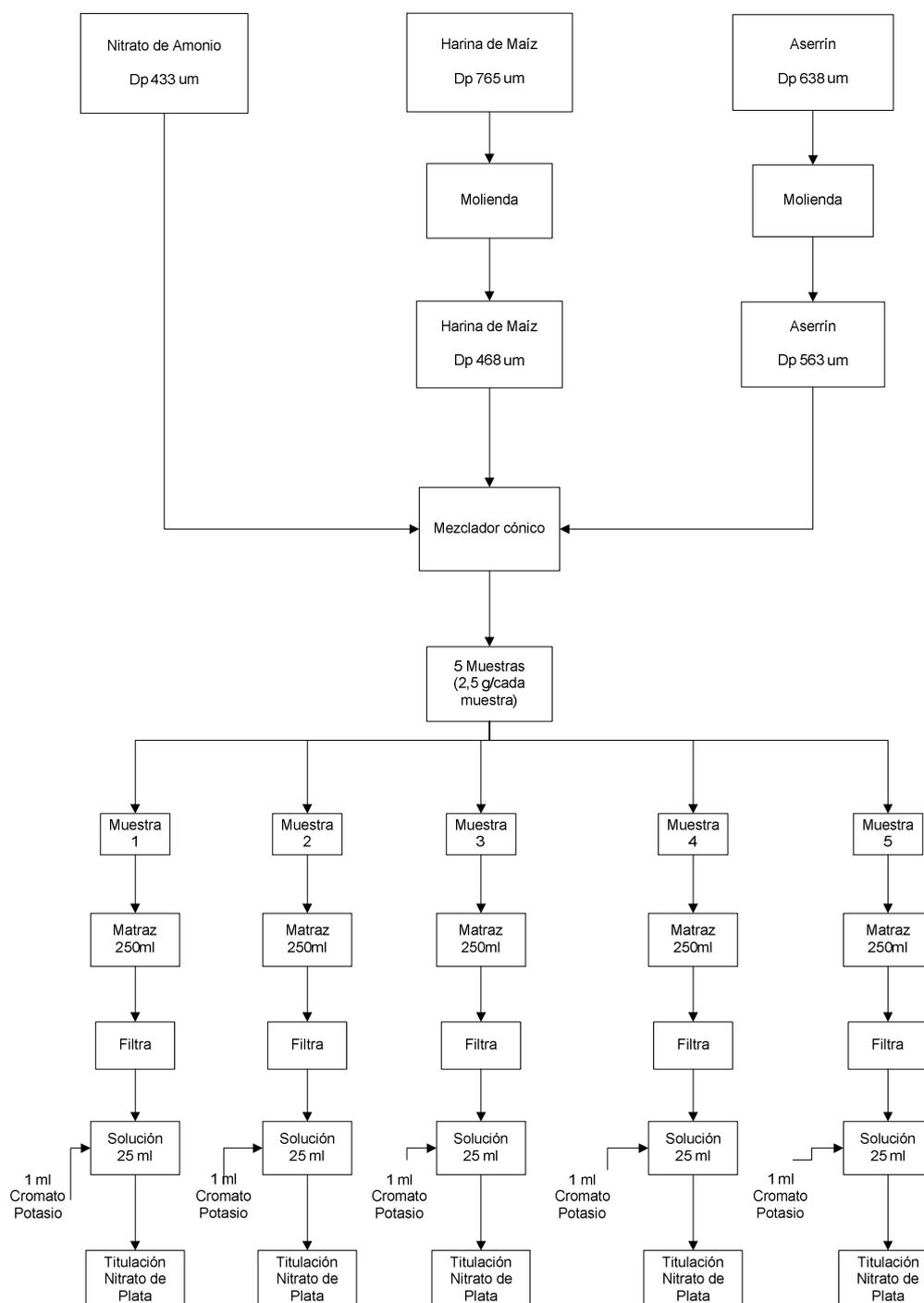


**Figura 20.** Secciones del mezclador para la toma de muestras

La toma de muestra en las diferentes secciones del mezclador se la realizó mediante un toma muestras cilíndrico de doble tubo concéntrico, el cual tiene una abertura en su interior que coincide con el tubo exterior, el diámetro del tubo interior es ligeramente menor al tubo externo.

Como trazador para el análisis de la eficiencia del mezclador se eligió al cloruro de sodio.

### 2.2.8 MARCHA ANALÍTICA



**Figura 21.** Marcha analítica para determinar la concentración de cloruros mediante el método volumétrico

### 2.2.9 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### **2.2.9.1 Carga en el mezclador con el 30 %**

1. Se pesó alrededor de 2,675 kg de nitrato de amonio, aserrín y harina de maíz, previamente molido de acuerdo a las formulaciones establecidas por Explocen C.A.
2. Se colocó la materia prima en el mezclador, en primer lugar el nitrato de amonio, seguido por el aserrín y por último la harina de maíz.
3. Se colocó el trazador (Cloruro de sodio)
4. Se encendió el mezclador
5. Se detuvo el mezclador a los 10 segundos
6. Se tomó 5 muestras con el toma muestras de las diferentes secciones del mezclador, de aproximadamente 2,5 g cada muestra.
7. Se colocó las muestras en recipientes herméticamente cerrados y bien identificados para su posterior análisis
8. Se encendió nuevamente el mezclador y se detuvo a los 20 segundos
9. Se colocó las muestras en recipientes herméticamente cerrados para su posterior análisis
10. Se tomaron las muestras en intervalos de 10 segundos, hasta que transcurrió 60 segundos de mezclado. Después de dicho tiempo se tomaron muestras cada minuto hasta los 8 minutos.
11. A las muestras tomadas anteriormente se las fraccionó por cuarteo, hasta obtener los 2,5 g para el análisis.

### **2.2.9.2 Carga en el mezclador con el 50 %**

1. Se pesó alrededor de 4,681 kg de nitrato de amonio, aserrín y harina de maíz, previamente molido de acuerdo a las formulaciones establecidas por Explocen C.A.
2. Se continuó a partir del numeral dos del procedimiento realizado con un 30 % de carga.

Respecto al análisis de las muestras, se siguió el procedimiento descrito en la norma INEN 51, la cual establece el método para determinar el contenido de cloruro de sodio en la sal común, este método se basa en la precipitación del cloruro de plata, los reactivos y el procedimiento se detalla a continuación:

**Reactivos:**

- Solución 0,1 N de nitrato de plata
- Solución al 5 % de cromato de potasio

**Procedimiento:**

1. Se pesó 10 g de muestra, disolverlos en agua destilada y aforar la solución obtenida a 1000 cm<sup>3</sup>.
2. Se tomó una alícuota de 25 cm<sup>3</sup> y se transfirió a un matraz erlenmeyer de 250 cm<sup>3</sup>.
3. Se añadió 1 cm<sup>3</sup> de solución al 5 % de cromato de potasio
4. Se tituló con la solución 0,1 N de nitrato de plata hasta que dé un color café-rojizo, registrando el volumen consumido.
5. Se tabularon los datos y se presentaron en ppm de cloruro

Debido a que la materia prima está constituida por aserrín, harina de maíz y nitrato de amonio es necesario filtrar la solución antes de tomar la alícuota de 25 cm<sup>3</sup> y como se explicó anteriormente se tomaron 2,5 g de muestra para el análisis.

### 2.3 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS A DIFERENTES VELOCIDADES

La velocidad de giro del tornillo sin fin así como también el porcentaje de carga en el mezclador son dos parámetros fundamentales a tomar en consideración para obtener una buena homogenización del producto final, además de las características mencionadas anteriormente.

Según los resultados obtenidos en el diseño del mezclador la velocidad calculada del tornillo sin fin es de 70 rpm considerando un 30 % de carga. Para determinar la influencia de la velocidad de giro del tornillo sin fin, en el tiempo óptimo de mezclado, se realizaron pruebas a dos diferentes velocidades de giro, una velocidad de giro de 55 rpm y una velocidad de giro de 85 rpm.

Luego de realizadas las pruebas a estas velocidades se determinó el tiempo óptimo al cual la mezcla presenta la mejor homogenización.

Conocida esta velocidad se procedió a analizar la influencia de la cantidad de carga para lo cual se hizo pruebas incrementando al 50 % la carga contenida en el mezclador.

Mediante las ecuaciones presentadas a continuación, se calculó la concentración de ión cloruro en ppm para cada una de las muestras.

$$N_{\text{Cloruro}} = \frac{N_{\text{Nitratoplata}} V_{\text{Nitratoplata}}}{V_{\text{cloruro}}} \quad [22]$$

Donde:

$N_{\text{Cloruro}}$  = Normalidad de cloruro, en equivalentes por litro.

$N_{\text{Nitratoplata}}$  = Normalidad de Nitrato de Plata, en equivalentes por litro.

$V_{\text{Nitratoplata}}$  = Volumen de Nitrato de plata usado en la titulación, en mililitros.

$V_{\text{Cloruro}}$  = Volumen de solución de Cloruro, en mililitros.

$$C_{\text{Cl}} = \frac{N_{\text{Cloruro}} \times PM}{1} \times 1000 \quad [23]$$

Donde:

$C_{\text{Cl}}$  = Concentración de cloruro, en ppm.

$N_{\text{Cloruro}}$  = Normalidad de cloruro, en equivalentes por litro.

PM = Peso molecular del cloruro, en gramos por mol.

## 2.4 FRACCIÓN GLOBAL MEDIA

El parámetro para determinar la eficacia del mezclador, es mediante la homogenización de los sólidos. La evaluación se lleva a cabo usando un trazador que es el cloruro de sodio. La presencia del trazador como medio evaluador se ve plasmada en el índice de mezclado y en la determinación del tiempo óptimo de mezcla.

La cantidad usada de trazador se lo conoce como la fracción global media, representada con el símbolo ( $\mu$ ) y cuyo valor es del 1% de la masa de sólidos presentes en el mezclador.

Debido a que se realizan pruebas con diferentes masas de sólidos, en dependencia del porcentaje de carga, en la Tabla 27 se indica las masas de cloruro de sodio colocadas en cada una de las mismas.

**Tabla 27. Gramos de trazador a diferentes porcentajes de carga del mezclador**

Carga en el mezclador (%)	Cloruro de Sodio (g)
30	26,75
50	46,81

## 2.5 ÍNDICE DE MEZCLADO

Una vez definida la fracción global media y con los datos de concentración de ión cloruro en ppm obtenidas de la titulación con nitrato de plata, para cada una de las condiciones de velocidad de giro del tornillo y el porcentaje de carga, se realizó el cálculo del índice de mezclado usando la ecuación [1].

Los resultados tabulados para las velocidades de giro de 55 rpm, 70 rpm y 85 rpm con un 30% de carga se presentan en la Tabla 58, Tabla 59 y Tabla 60, respectivamente. Finalmente, en la Tabla 61, se presentan los valores correspondientes al mezclado a 70 rpm y 50% de carga.

Los cálculos pertinentes para la obtención del índice de mezclado de cada condición se presentan en el Anexo 13.

## 2.6 TIEMPO DE MEZCLADO ÓPTIMO

Con los resultados de los índices de mezclado se graficó la relación entre el índice de mezclado y el tiempo, los cuales se presentan en la Figura 26, Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

La homogeneidad de la mezcla se logra cuando el índice de mezclado, teóricamente, tiene un valor de cero; en la realidad se llega a un valor cercano a cero y el tiempo óptimo es considerado cuando se presenta una tendencia a estabilizarse el valor del

índice. En cada uno de los gráficos se localizó el tiempo al cual inicia esa tendencia a estabilizarse, presentándose los tiempos en la Tabla 62.

Como un método de comparación y validación del método empleado, se entregó al Departamento de Ciencias Nucleares de la Escuela Politécnica Nacional cada una de las muestras tomadas en el mezclado a una velocidad de 70 rpm y 30% de carga para que se realice un análisis espectrofotométrico, cuyos resultados de concentración de cloruro se presenta en el Anexo 14

Siguiendo la metodología de cálculo anterior se obtuvo el índice de mezclado a partir de los resultados obtenidos del análisis espectrofotométrico.

Se presenta en el Anexo 15 una comparación entre los valores de concentración de cloruro en ppm obtenidos por titulación y espectrofotometría para cada una de las secciones.

## **2.7 PRUEBAS DE VELOCIDAD DE DETONACIÓN**

La velocidad de detonación es la velocidad a la que viaja la onda de detonación a través de la columna del explosivo, su determinación se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma Española UNE EN 13631-14, la cual se basa en la medición del tiempo en que viaja la onda para pasar entre dos sensores que están separados una distancia conocida.

Se realizó un premezclado de los sólidos inertes tanto manualmente, como empleando el mezclador a las diferentes condiciones de operación. Las mezclas fueron completadas con la nitroglicerina, la cual fue añadida y posteriormente mezclada durante 15, 20, 25 y 30 minutos, siguiendo los procedimientos de seguridad propios de Explocen C. A. Una vez finalizadas las diferentes mezclas se encartucharon en dinamitas de 7 pulgadas de longitud y  $1\frac{1}{8}$  de pulgada de diámetro,

manteniendo las dimensiones que se comercializan, y usando el equipo VOD Meter, se procedió a medir la velocidad de detonación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

##### 3.1.1 DENSIDAD

Las masas obtenidas para cada materia prima y la mezcla de los tres materiales en las proporciones establecidas por Explocen C.A. se presentan tabuladas a continuación.

**Tabla 28.** Valores de masa pesados para cada material y la densidad aparente.  
(V= 500 cm<sup>3</sup>)

Material	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso promedio (g)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Nitrato de amonio	365,1357	364,9131	365,0244	0,7300
Aserrín	154,9834	155,0768	155,0301	0,3101
Harina de Maíz	324,9689	324,9735	324,9712	0,6499

**Tabla 29.** Valores de masa pesados de la mezcla y la densidad aparente.  
(V= 500 cm<sup>3</sup>)

Material	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso promedio (g)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Mezcla de materiales	334,1765	334,5139	334,3452	0,6687

##### 3.1.2 HUMEDAD

A continuación se presenta los resultados obtenidos al seguir los diferentes procedimientos para obtener la humedad de las materias primas.

### 3.1.2.1 Nitrato de amonio

**Tabla 30.** Masa inicial y final para el Nitrato de Amonio  
(T = 90 °C, t=4 h)

Muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Humedad (%)
Muestra 1	3,0175	3,0156	0,064
Muestra 2	2,9814	2,9797	0,057
<b>Promedio</b>			0,0605

### 3.1.2.2 Aserrín

**Tabla 31.** Masa inicial y final para el Aserrín  
(T=103 °C, t= 24 h)

Muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Humedad (%)
Muestra 1	46,3524	45,5273	1,78
Muestra 2	43,9005	43,0576	1,92
<b>Promedio</b>			1,85

### 3.1.2.3 Harina de maíz

**Tabla 32.** Masa inicial y final para la Harina de maíz  
(T = 130 °C, t = 4 h)

Muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Humedad (%)
Muestra 1	44,3396	39,5775	10,74
Muestra 2	42,0445	38,0335	9,54
<b>Promedio</b>			10,14

### 3.1.2.4 Cloruro de sodio

**Tabla 33.** Masa inicial y final para el Cloruro de Sodio  
(T = 250 °C, t = 1 h)

<b>Muestra</b>	<b>Masa del Crisol vacío (g)</b>	<b>Masa Inicial (g)</b>	<b>Masa Final (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>
Muestra 1	36,3384	46,2853	46,2833	0,020
Muestra 2	33,2752	43,6770	43,6736	0,033
Muestra 3	33,9495	43,9734	43,9710	0,024
<b>Promedio</b>				0,026

El nitrato de amonio, aserrín y harina de maíz son materiales que absorben humedad con relativa facilidad, razón por la cual es importante evitar el contacto de los mismos con el ambiente, para así evitar la formación de grumos obteniendo un mejor mezclado.

### 3.1.3 TAMAÑO DE LA PARTÍCULA

#### 3.1.3.1 Nitrato de amonio

La masa pesada de la primera prueba y la réplica se presentan en la Tabla 34 y Tabla 35, respectivamente:

**Tabla 34.** Masas de los tamices para la primera prueba. (Nitrato de Amonio)

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacio (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,12	443,72
600	30	428,25	434,76
425	40	403,79	412,88
250	60	382,19	399,33
	Fondo	367,7	430,64

**Tabla 35.** Masas de los tamices para la réplica. (Nitrato de Amonio)

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacio (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,12	444,15
600	30	428,25	434,94
425	40	403,79	413,25
250	60	382,19	400,27
	Fondo	367,7	428,72

En la Tabla 36 se resumen los tamaños de partícula para los diferentes porcentajes de retención y el promedio para las dos mediciones hechas.

**Tabla 36.** Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos (Nitrato de Amonio)

	<b>Primera Prueba (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Réplica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Promedio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>%Retenido</b>			
5	830	845	838
10	630	645	638
20	425	440	433

### 3.1.3.2 Harina de maíz

La masa pesada de la primera prueba y la réplica se presentan en la Tabla 37 y Tabla 38, respectivamente:

**Tabla 37.** Masas de los tamices para la primera prueba. (Harina de Maíz)

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacio (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,15	439,53
600	30	428,28	479,06
425	40	403,82	405,06
250	60	382,17	396,28
	Fondo	367,69	401,26

**Tabla 38.** Masas de los tamices para la réplica. (Harina de Maíz)

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacio (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,19	440,04
600	30	428,28	485,63
425	40	403,81	406,8
250	60	382,19	400,68
	Fondo	367,71	388,2

En la Tabla 39 se resume los tamaños de partícula para los diferentes porcentajes de retención y el promedio para las dos mediciones hechas.

**Tabla 39.** Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos (Harina de Maíz)

	<b>Primera Prueba</b>	<b>Réplica</b>	<b>Promedio</b>
<b>%Retenido</b>	<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>
5	825	830	828
10	805	810	808
20	760	770	765

### 3.1.3.3 Aserrín

La masa pesada de la primera prueba y la réplica se presentan en la Tabla 40 y Tabla 41, respectivamente:

**Tabla 40.** Masas de los tamices para la primera prueba. (Aserrín)

(t = 5 min)

<b>Dp</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacío</b>	<b>Tamiz + Muestra</b>
<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>		<b>(g)</b>	<b>(g)</b>
850	20	439,17	443,14
600	30	428,28	447,82
425	40	403,81	428,9
250	60	382,16	407,37
	Fondo	367,71	394,35

**Tabla 41.** Masas de los tamices para la réplica. (Aserrín)

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacío (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,17	443,76
600	30	428,28	448,18
425	40	403,81	429,16
250	60	382,16	406,77
	Fondo	367,71	393,71

En la Tabla 42 se resume los tamaños de partícula para los diferentes porcentajes de retención y el promedio para las dos mediciones hechas.

**Tabla 42.** Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos (Aserrín)

<b>%Retenido</b>	<b>Primera Prueba (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Réplica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Promedio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
5	840	850	845
10	765	770	768
20	635	640	638

De los sólidos inertes se observó que el tamaño de partícula d80 varía para el aserrín, la harina de maíz y el nitrato de amonio, siendo los dos primeros de mayor tamaño. Esto ocasionará que durante el proceso de mezclado se produzca una segregación sin obtener la homogeneidad deseada. Por esta razón, es necesario moler tanto al aserrín como al maíz hasta obtener un tamaño de partícula similar.

### 3.1.3.4 Materia prima molida

#### 3.1.3.4.1 Harina de maíz molido

La masa pesada de la primera prueba y la réplica se presentan en la Tabla 43 y Tabla 44, respectivamente:

**Tabla 43.** Masas de los tamices para la primera prueba (Harina de Maíz molido).  
(t = 5 min)

Dp ( $\mu\text{m}$ )	# Tamiz	Tamiz Vacío (g)	Tamiz + Muestra (g)
850	20	439,18	439,29
600	30	428,31	428,94
425	40	403,81	429,97
250	60	382,22	428,59
	Fondo	367,7	394,64

**Tabla 44.** Masas de los tamices para la réplica (Harina de Maíz molido).  
(t = 5 min)

Dp ( $\mu\text{m}$ )	# Tamiz	Tamiz Vacío (g)	Tamiz + Muestra (g)
850	20	439,22	439,29
600	30	428,29	428,91
425	40	403,84	435,29
250	60	382,21	424,22
	Fondo	367,68	393,8

En la Tabla 45 se resumen los tamaños de partícula para los diferentes porcentajes de retención y el promedio para las dos mediciones hechas.

**Tabla 45.** Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos (Harina de Maíz molido)

<b>%Retenido</b>	<b>Primera Prueba (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Réplica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Promedio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
5	550	560	555
10	520	530	525
20	460	475	468

#### 3.1.3.4.2 Aserrín molido

La masa pesada de la primera prueba y la réplica se presentan en la Tabla 46 y Tabla 47, respectivamente:

**Tabla 46.** Masas de los tamices para la primera prueba (Aserrín molido).

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacío (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,18	442,05
600	30	428,3	443,38
425	40	403,83	424,65
250	60	382,19	406,61
	Fondo	367,69	404,61

**Tabla 47.** Masas de los tamices para la réplica (Aserrín molido).

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacio (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,21	441,73
600	30	428,3	441,88
425	40	403,84	421,99
250	60	382,2	410,01
	Fondo	367,7	405,8

En la Tabla 48 se resumen los tamaños de partícula para los diferentes porcentajes de retención y el promedio para las dos mediciones hechas.

**Tabla 48.** Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos (Aserrín molido)

<b>%Retenido</b>	<b>Primera Prueba (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Réplica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Promedio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
5	810	800	805
10	720	700	710
20	575	550	563

Con los resultados obtenidos, podemos observar que el tamaño de partícula de las tres materias primas tiene valores muy cercanos, lo que facilita la mezcla de los mismos disminuyendo las segregaciones que puedan darse.

### 3.1.3.5 Mezcla

La masa pesada de la primera prueba y la réplica se presentan en las Tablas 49 y Tabla 50, respectivamente:

**Tabla 49.** Masas de los tamices para la primera prueba. (Mezcla)

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacio (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,2	443,95
600	30	428,31	435,52
425	40	403,85	413,46
250	60	382,19	400,04
	Fondo	367,63	428,41

**Tabla 50.** Masas de los tamices para la réplica. (Mezcla)

(t = 5 min)

<b>Dp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacio (g)</b>	<b>Tamiz + Muestra (g)</b>
850	20	439,19	443,53
600	30	428,31	434,86
425	40	403,85	414,5
250	60	382,19	399,51
	Fondo	367,68	428,83

En la Tabla 51 se resumen los tamaños de partícula para los diferentes porcentajes de retención y el promedio para las dos mediciones hechas.

**Tabla 51.** Tamaño de partícula para 5, 10, 20 % de retenidos (Mezcla)

%Retenido	Primera Prueba	Réplica	Promedio
	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )
5	835	820	828
10	650	625	638
20	450	445	448

## 3.2 ANALISIS DE MUESTRAS A DIFERENTES VELOCIDADES

### 3.2.1 PRUEBAS A 70 RPM DEL TORNILLO SIN FIN Y 30% DE CARGA

En la Tabla 52 se indica la cantidad de titulante gastado en ml para una velocidad del sin fin de 70 rpm y 30 % de carga.

**Tabla 52.** Nitrato de plata (ml) gastados a 70 rpm y 30% carga

Tiempo	Nitrato de plata (ml)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	2,10	2,05	0	0	0
10	1,05	0,75	0,65	0,45	0
20	0,65	0,55	0,50	0,60	0
30	0,55	0,65	0,60	0,35	0,15
40	0,60	0,50	0,45	0,45	0,25
50	0,60	0,55	0,50	0,50	0,40
60	0,60	0,50	0,45	0,50	0,40
120	0,45	0,45	0,55	0,55	0,40
180	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
240	0,45	0,45	0,45	0,40	0,40
300	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40
360	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
420	0,45	0,40	0,45	0,40	0,40
480	0,45	0,40	0,45	0,40	0,40

Al aplicar las ecuaciones [20] y [21] se obtienen los resultados presentados en el Tabla 53.

**Tabla 53.** Concentración del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga

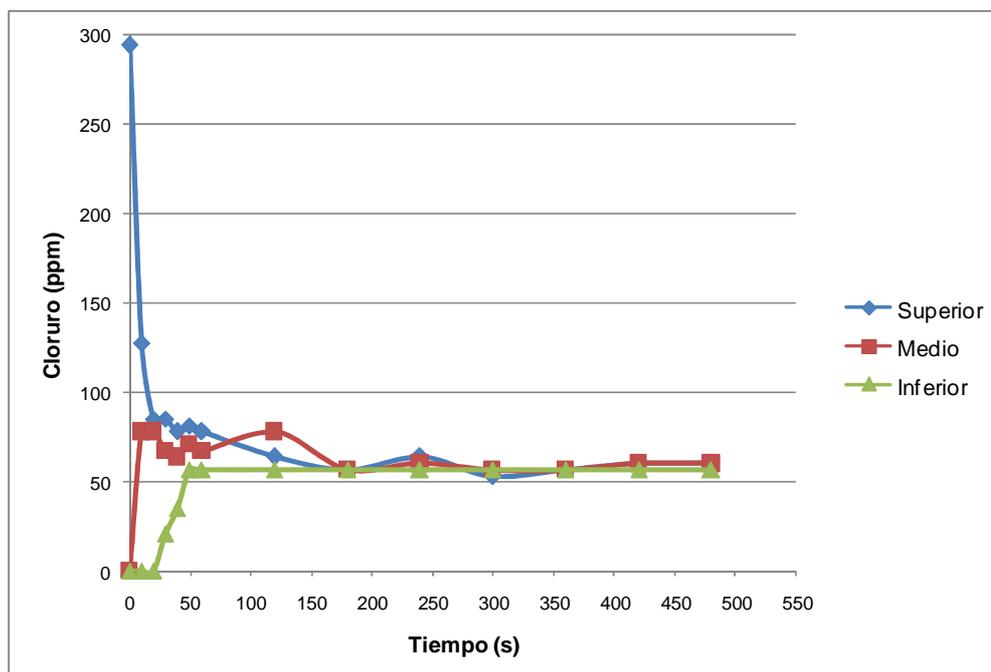
<b>Tiempo</b>	<b>Cloruro (ppm)</b>				
	<b>Sección A</b>		<b>Sección B</b>		<b>Sección C</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>0</b>	297,78	290,69	0	0	0
<b>10</b>	148,89	106,35	92,17	63,81	0
<b>20</b>	92,17	77,99	70,90	85,08	0
<b>30</b>	77,99	92,17	85,08	49,63	21,27
<b>40</b>	85,08	70,90	63,81	63,81	35,45
<b>50</b>	85,08	77,99	70,90	70,90	56,72
<b>60</b>	85,08	70,90	63,81	70,90	56,72
<b>120</b>	63,81	63,81	77,99	77,99	56,72
<b>180</b>	56,72	56,72	56,72	56,72	56,72
<b>240</b>	63,81	63,81	63,81	56,72	56,72
<b>300</b>	49,63	56,72	56,72	56,72	56,72
<b>360</b>	56,72	56,72	56,72	56,72	56,72
<b>420</b>	63,81	56,72	63,81	56,72	56,72
<b>480</b>	63,81	56,72	63,81	56,72	56,72

De la Tabla 53 se calcula la concentración media de cada una de las secciones en sus respectivos tiempos, los cuales se encuentran tabulados en la Tabla 54 y representados en la figura 22.

**Tabla 54.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga

<b>Tiempo</b>	<b>Cloruro (ppm)</b>		
	<b>Sección A (Superior)</b>	<b>Sección B (Medio)</b>	<b>Sección C (Inferior)</b>
<b>0</b>	294,24	0	0
<b>10</b>	127,62	77,99	0
<b>20</b>	85,08	77,99	0
<b>30</b>	85,08	67,36	21,27
<b>40</b>	77,99	63,81	35,45
<b>50</b>	81,54	70,90	56,72
<b>60</b>	77,99	67,36	56,72
<b>120</b>	63,81	77,99	56,72
<b>180</b>	56,72	56,72	56,72
<b>240</b>	63,81	60,27	56,72
<b>300</b>	53,18	56,72	56,72
<b>360</b>	56,72	56,72	56,72
<b>420</b>	60,27	60,27	56,72
<b>480</b>	60,27	60,27	56,72

A las condiciones de operación, con una velocidad de giro de 70 rpm y 30% de carga, cuyos resultados se muestran en la figura 22, se observa que inicialmente existe una distribución de los sólidos en cada una de las secciones; aproximadamente en un tiempo de 190 segundos se aprecia una tendencia a estabilizarse la concentración de cloruro, lo cual implica una homogenización de la mezcla.



**Figura 22.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador

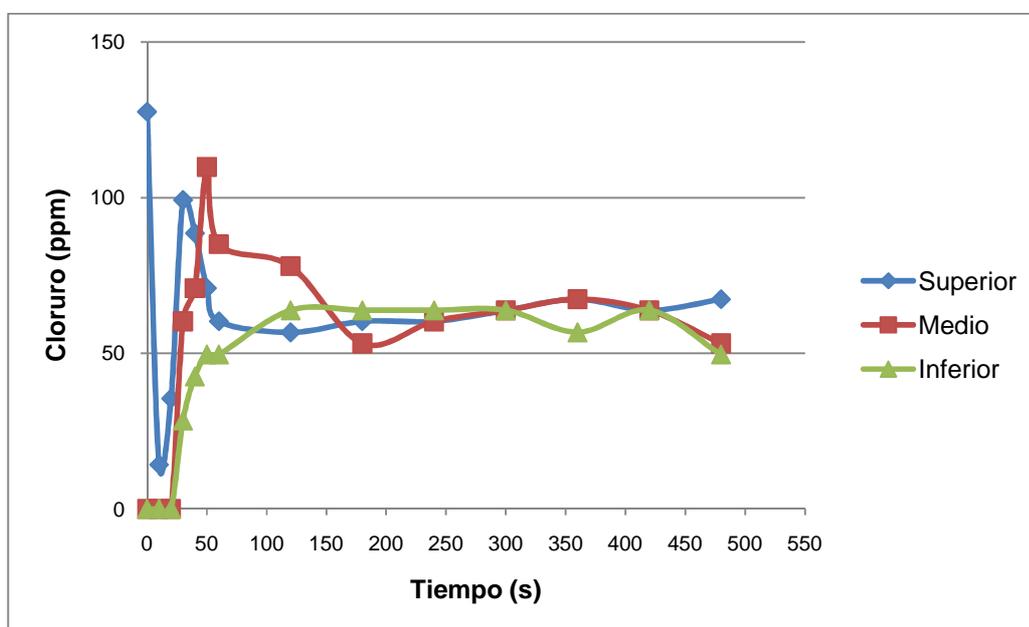
En las siguientes tablas y gráficos se presentan las concentraciones del ion cloruro en ppm para las velocidades de giro de 55 rpm y 85 rpm a un 30 % de carga y finalmente a una velocidad de giro de 70 rpm con 50 % de carga.

Las tablas con los consumos de Nitrato de Plata para las respectivas condiciones de giro del tornillo y carga en el mezclador, se encuentran en el Anexo 12

### 3.2.2 PRUEBA A 55 RPM DEL TORNILLO SIN FIN Y 30 % DE CARGA

**Tabla 55.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 55 rpm y 30% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)		
	Sección A (Superior)	Sección B (Medio)	Sección C (Inferior)
0	127,62	0	0
10	14,18	0	0
20	35,45	0	0
30	99,26	60,27	28,36
40	88,63	70,90	42,54
50	70,90	109,90	49,63
60	60,27	85,08	49,63
120	56,72	77,99	63,81
180	60,27	53,18	63,81
240	60,27	60,27	63,81
300	63,81	63,81	63,81
360	67,36	67,36	56,72
420	63,81	63,81	63,81
480	67,36	53,18	49,63



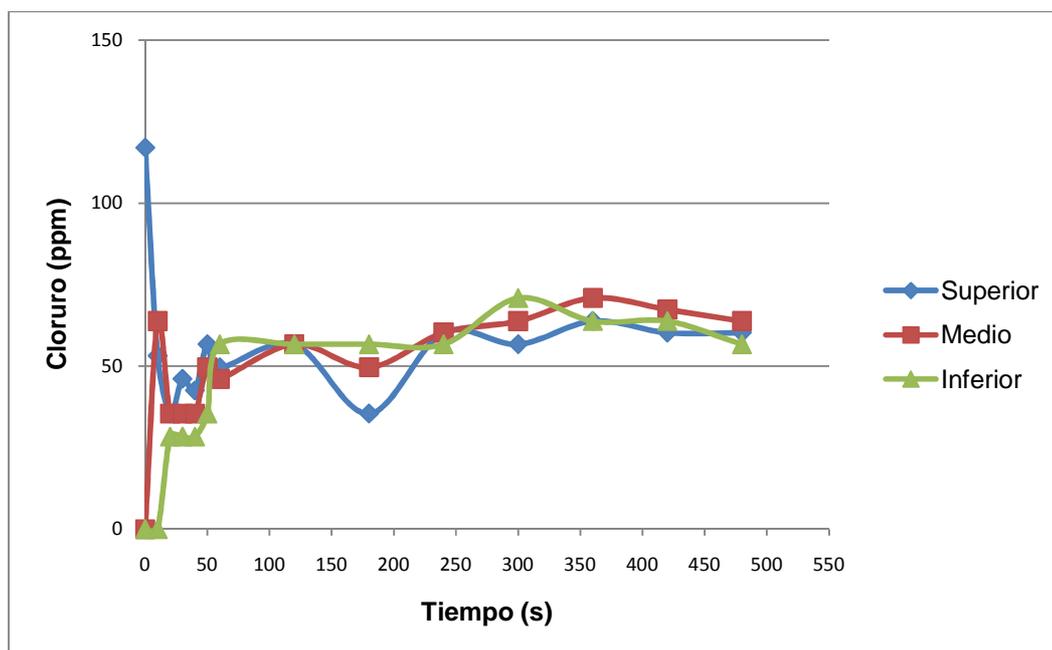
**Figura 23.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 55 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador

Las pruebas realizadas a 55 rpm y 30% de carga, cuyos resultados se muestran en la figura 23, presenta una distribución altamente variable en los primeros minutos, disminuyendo la intensidad de movilización de las partículas sin lograr una tendencia a estabilizar la concentración del trazador en las secciones; por el contrario, al aumentar el tiempo de mezclado se observa una tendencia de segregación de las partículas.

### 3.2.3 PRUEBAS A 85 RPM DEL TORNILLO SIN FIN Y 30 % DE CARGA

**Tabla 56.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 85 rpm y 30% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)		
	Sección A (Superior)	Sección B (Medio)	Sección C (Inferior)
0	116,985	0	0
10	53,175	63,81	0
20	35,45	35,45	28,36
30	46,085	35,45	28,36
40	42,54	35,45	28,36
50	56,72	49,63	35,45
60	49,63	46,085	56,72
120	56,72	56,72	56,72
180	35,45	49,63	56,72
240	60,265	60,265	56,72
300	56,72	63,81	70,9
360	63,81	70,9	63,81
420	60,265	67,355	63,81
480	60,265	63,81	56,72



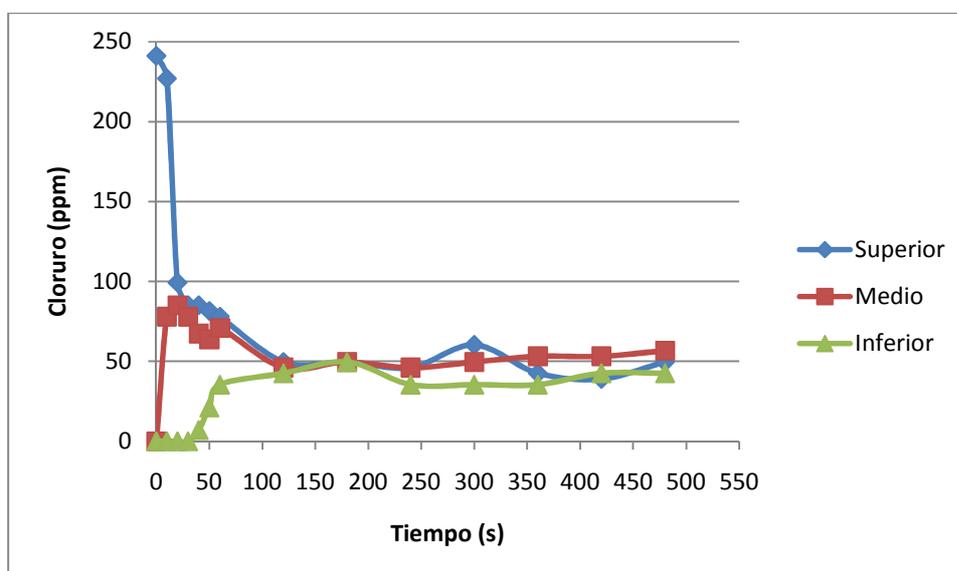
**Figura 24.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 85 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador

Al operar el mezclador a una velocidad de giro de 85 rpm y 30% de carga, se observa en la figura 24, un comportamiento donde la distribución de las partículas varía moderadamente permitiendo que al transcurrir el tiempo se pueda observar una tendencia a estabilizarse la concentración del cloruro; sin embargo, es mayor al observado en los resultados obtenidos a 70 rpm.

### 3.2.4 PRUEBAS A 70 RPM DEL TORNILLO SIN FIN Y 50 % DE CARGA

**Tabla 57.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 50% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)		
	Sección A (Superior)	Sección B (Medio)	Sección C (Inferior)
0	241,06	0	0
10	226,88	77,99	0
20	99,26	85,08	0
30	85,08	77,99	0
40	85,08	67,355	7,09
50	81,535	63,81	21,27
60	77,99	70,9	35,45
120	49,63	46,085	42,54
180	49,63	49,63	49,63
240	46,085	46,085	35,45
300	60,265	49,63	35,45
360	42,54	53,175	35,45
420	38,995	53,175	42,54
480	49,63	56,72	42,54



**Figura 25.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 50 % de carga, en diferentes secciones del mezclador

Una variante de evaluación fue el incrementar la capacidad de carga del mezclador por lo que se realizó pruebas en condiciones de operación, con una velocidad de giro de 70 rpm y un 50% de carga. Los resultados obtenidos son plasmados en la figura 25, observando una distribución de las partículas moderada similar a lo que ocurre al operar a 70 rpm y 30% de carga, diferenciándose fundamentalmente en que la tendencia a estabilizarse la concentración de cloruro ocurre a un tiempo mayor.

### 3.3 ÍNDICE DE MEZCLADO

A partir de los resultados de las concentraciones de cloruro presentados, se evalúa la homogeneidad de la mezcla y el tiempo óptimo que deberá permanecer en el mezclador mediante el cálculo del índice de mezclado, permitiendo conocer por esta variable que al ser más próxima a un valor de cero, más homogénea será la mezcla.

**Tabla 58.** Índice de mezcla para 55 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga

Tiempo (s)	Índice de mezcla
0	0,07071
10	0,00932
20	0,02205
30	0,03174
40	0,01984
50	0,02754
60	0,01723
120	0,01300
180	0,00599
240	0,00392
300	0,00001
360	0,00599
420	0,00001
480	0,00934

**Tabla 59.** Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Índice de mezcla</b>
0	0,16266
10	0,05580
20	0,03765
30	0,02966
40	0,01824
50	0,01062
60	0,01061
120	0,00959
180	0,00001
240	0,00393
300	0,00320
360	0,00001
420	0,00392
480	0,00391

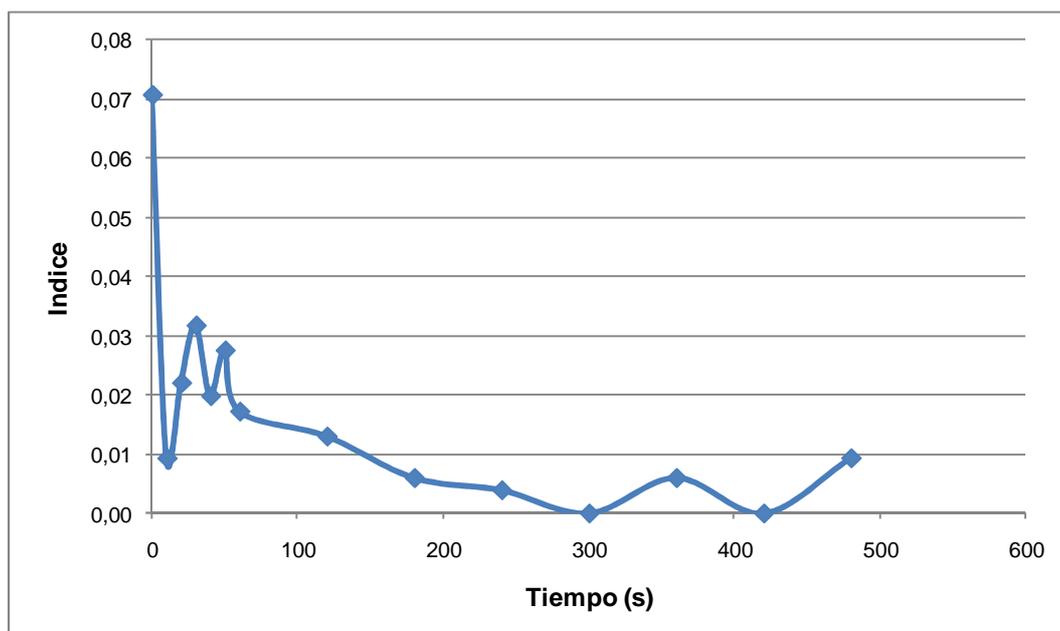
**Tabla 60.** Índice de mezcla para 85 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Índice de mezcla</b>
0	0,06730
10	0,02977
20	0,00784
30	0,01087
40	0,01551
50	0,01011
60	0,00506
120	0,00001
180	0,00960
240	0,00814
300	0,00784
360	0,00392
420	0,00505
480	0,00390

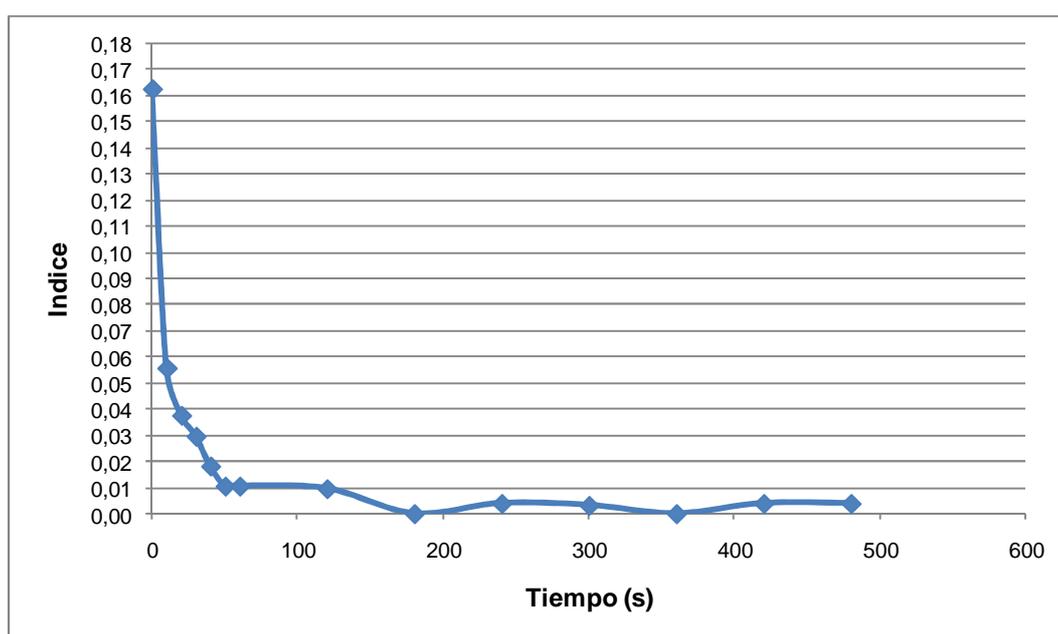
**Tabla 61.** Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 50 % de carga

Tiempo (s)	Índice de mezcla
0	0,13331
10	0,10245
20	0,04787
30	0,03765
40	0,03293
50	0,02549
60	0,01932
120	0,00393
180	0,00001
240	0,00598
300	0,01061
360	0,00816
420	0,00816
480	0,00599

### 3.4 TIEMPO DE MEZCLADO ÓPTIMO

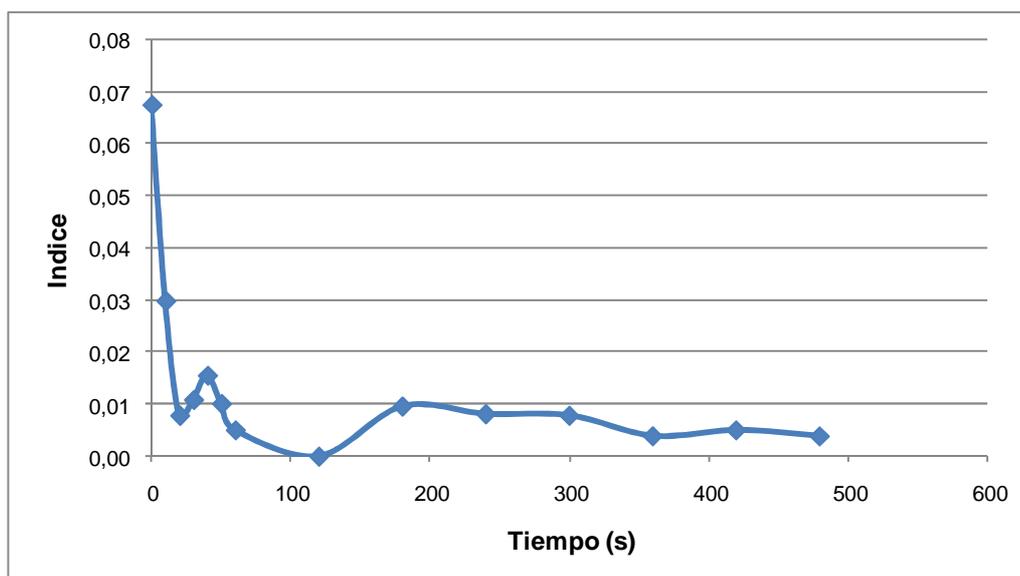
**Figura 26.** Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 55 rpm y 30 % de carga

A las condiciones de operación de 55 rpm y 30% de carga, se representó en la figura 26 la relación entre el índice de mezclado y el tiempo, de lo cual al trazar una curva de tendencia como se muestra en la figura del Anexo 16, la mezcla presenta tendencia a homogenizarse, a partir de los 350 segundos. Sin embargo, la homogeneidad se pierde, puesto que a los 420 segundos la mezcla inicia un proceso de segregación.



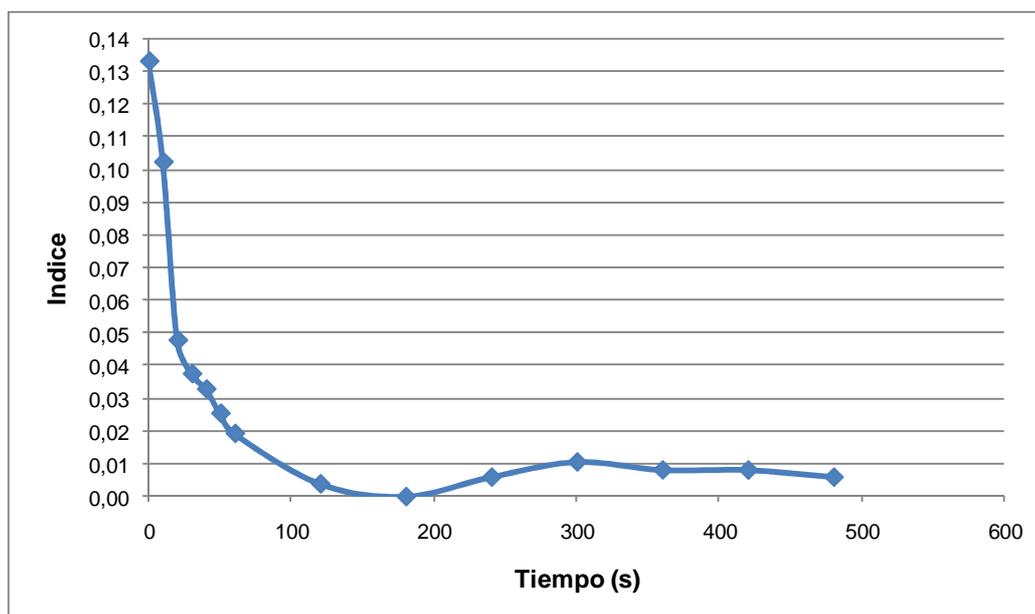
**Figura 27.** Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 70 rpm y 30 % de carga

En la figura 27 se indica la relación entre el índice de mezclado y el tiempo al operar el equipo a 70 rpm y 30% de carga. En la figura del Anexo 17 se observa que el grado de disociación tiende a disminuir, llegando a índices estables a partir de los 190 segundos.



**Figura 28.** Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 85 rpm y 30 % de carga

La figura 28 representa los resultados cuando se opera el mezclador a 85 rpm y 30% de carga. Se puede observar en la curva indicada en la figura del Anexo 18 una tendencia a lograr la homogeneidad a corto tiempo, sin embargo, instantáneamente surge una tendencia de separación de los componentes y posteriormente a estabilizarse a un tiempo de 360 segundos.



**Figura 29.** Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 70 rpm y 50 % de carga

Al operar a 70 rpm y 50% de carga, en la figura 29 se observa una tendencia progresiva a la homogenización en el tiempo. Sin embargo, a los 200 segundos tiende a segregarse levemente para estabilizarse aproximadamente a los 330 segundos, como se evidencia en la figura del Anexo 19.

**Tabla 62.** Tiempo óptimo de mezclado para distintas rpm y % de carga

<b>Rpm y % de capacidad</b>	<b>Tiempo óptimo de mezclado (segundos)</b>
55 rpm y 30 % de carga	350
70 rpm y 30 % de carga	190
85 rpm y 30 % de carga	360
70 rpm y 50 % de carga	330

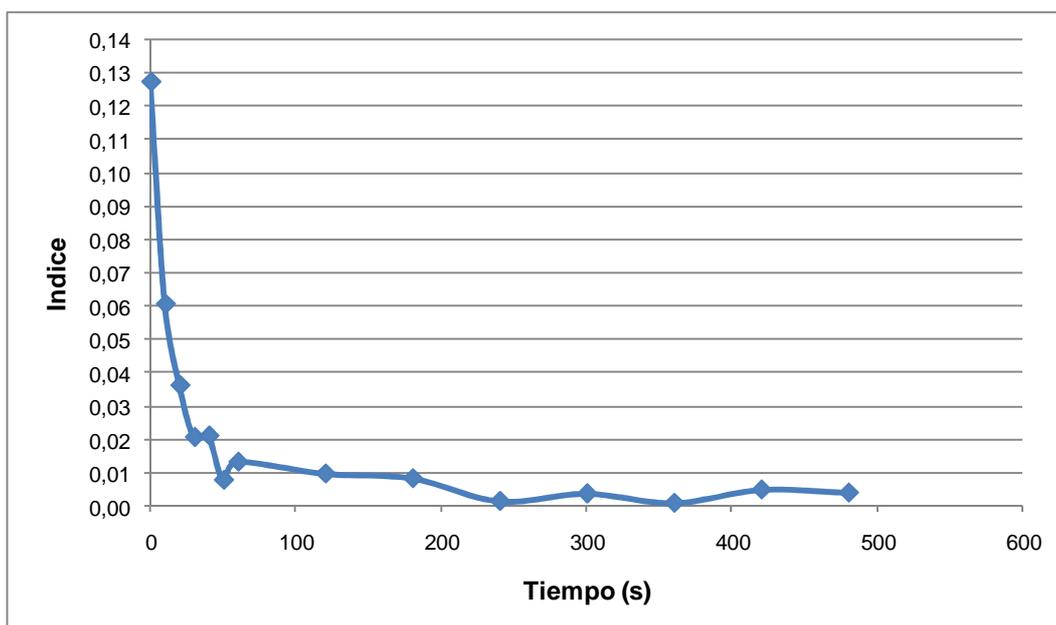
Mediante los resultados de los tiempos óptimos, resumidos en la Tabla 62, y lo observado en las gráficas previamente mencionadas se determina que las condiciones de operación óptimas son a 70 rpm y 30% de carga, dado que se

requiere de menor tiempo para alcanzar una homogeneidad excelente. La homogenización también es posible al operar a 85 rpm y 30% de carga y 70 rpm y 50% de carga, requiriendo mayores tiempos.

Al conocer las condiciones de operación óptimas se procedió a validar el método volumétrico empleado, haciendo uso de un análisis espectrofotométrico de las muestras tomadas a 70 rpm y 30% de carga, cuyos resultados fueron tratados para calcular el índice de mezclado que se muestra en la figura 30.

**Tabla 63.** Índice de mezcla por espectrofotometría para 70 rpm y 30 % carga

<b>Tiempo</b>	<b>Índice</b>
0	0,12759
10	0,06079
20	0,03635
30	0,02079
40	0,02119
50	0,00789
60	0,01334
120	0,00980
180	0,00840
240	0,00154
300	0,00381
360	0,00101
420	0,00497
480	0,00408



**Figura 30.** Variación del Índice de mezclado con el tiempo para 70 rpm y 30 % de carga, analizado mediante espectrofotometría

La tendencia, observada en la figura del Anexo 19, nos muestra que se estabiliza a un tiempo de 180 segundos con una homogeneidad excelente, corroborando adicionalmente la selección de las condiciones de operación, puesto que los tiempos óptimos presentan una variación de 10 segundos.

### 3.5 VELOCIDAD DE DETONACIÓN

Los valores de las velocidades de detonación medidas a las diferentes condiciones de operación se presentan a continuación:

**Tabla 64.** Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla manual

Min	Velocidad de detonación (m/s)			
	1	2	3	4
15	3333	3448	3125	3226
20	3333	3333	3226	3125
25	3226	3333	3226	3333
30	3448	3333	3226	3333

**Tabla 65.** Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla manual

Min	Velocidad de detonación (m/s)		
	1	2	3
15	3470	3680	3450
20	3684	3495	3584
25	3668	3561	3624
30	3753	3697	3601

**Tabla 66.** Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.

Min	Velocidad de detonación (m/s)			
	1	2	3	4
15	3378	3322	3333	3322
20	3378	3401	3355	3401
25	3378	3401	3350	3401
30	3448	3389	3412	3389

**Tabla 67.** Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.

Min	Velocidad de detonación (m/s)			
	1	2	3	4
15	3552	3627	3590	3584
20	3645	3654	3607	3632
25	3691	3656	3640	3675
30	3725	3657	3687	3692

**Tabla 68.** Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 55 rpm y 30% de carga.

Min	Velocidad de detonación (m/s)		
	1	2	3
15	3687	3603	3590
20	3348	3576	3471
25	3421	3421	3603
30	3484	3631	3716

**Tabla 69.** Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 85 rpm y 30% de carga.

Min	Velocidad de detonación (m/s)			
	1	2	3	4
15	3744	3717	3617	3800
20	3661	3661	3579	3566
25	3463	3661	3633	3647
30	3633	3593	3566	3579

**Tabla 70.** Velocidad de detonación en cartuchos con pre mezcla usando el equipo a 70 rpm y 50% de carga.

Min	Velocidad de detonación (m/s)		
	1	2	3
15	3510	3746	3549
20	3510	3614	3590
25	3536	3746	3603
30	3617	3523	3645

Los valores medios de velocidad de detonación y la desviación estándar son presentados a continuación.

**Tabla 71.** Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla manual

<b>Min</b>	<b>Media (X)</b>	<b>Desv. Est. (D)</b>
<b>15</b>	3283	138,97
<b>20</b>	3254	99,84
<b>25</b>	3280	61,78
<b>30</b>	3335	90,66

**Tabla 72.** Velocidad de detonación media y desviación estándar de los cartuchos con premezcla manual

<b>Min</b>	<b>Media (X)</b>	<b>Desv. Est. (D)</b>
<b>15</b>	3533	127,41
<b>20</b>	3588	94,55
<b>25</b>	3618	53,78
<b>30</b>	3684	76,87

**Tabla 73.** Velocidad de detonación media y Desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.

<b>Min</b>	<b>Media (X)</b>	<b>Desv. Est. (D)</b>
<b>15</b>	3339	26,68
<b>20</b>	3384	22,02
<b>25</b>	3383	24,23
<b>30</b>	3410	27,86

**Tabla 74.** Velocidad de detonación media y Desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 70 rpm y 30% de carga.

<b>Min</b>	<b>Media (X)</b>	<b>Desv. Est. (D)</b>
<b>15</b>	3588	30,75
<b>20</b>	3635	20,44
<b>25</b>	3666	22,22
<b>30</b>	3690	27,85

**Tabla 75.** Velocidad de detonación media y Desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 55 rpm y 30% de carga.

<b>Min</b>	<b>Media (X)</b>	<b>Desv. Est. (D)</b>
<b>15</b>	3627	52,65
<b>20</b>	3465	114,12
<b>25</b>	3482	105,08
<b>30</b>	3610	117,37

**Tabla 76.** Velocidad de detonación media y Desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 85 rpm y 30% de carga.

<b>Min</b>	<b>Media (X)</b>	<b>Desv. Est. (D)</b>
<b>15</b>	3720	76,58
<b>20</b>	3617	51,37
<b>25</b>	3601	92,71
<b>30</b>	3593	29,01

**Tabla 77.** Velocidad de detonación media y Desviación estándar de los cartuchos con premezcla usando el equipo a 70 rpm y 50% de carga.

<b>Min</b>	<b>Media (X)</b>	<b>Desv. Est. (D)</b>
<b>15</b>	3602	126,51
<b>20</b>	3571	54,45
<b>25</b>	3628	107,27
<b>30</b>	3595	63,91

La desviación estándar indica que al usar la premezcla manual existen variaciones más elevadas de la velocidad entre cartuchos del mismo lote. En el caso de la premezcla realizada a 55 rpm y 30% de carga se observa que los resultados de las desviaciones son elevados, además existe una mayor dispersión en los resultados cuando se hace una mezcla con la nitroglicerina en tiempos entre 20 y 30 minutos. Este comportamiento concuerda con la figura 26, donde se evidencia que al

mantener mayor tiempo en mezclado propicia una segregación de la materia prima, lo cual puede afectar en las características finales del explosivo.

En el caso de la premezcla realizada a 85 rpm y 30% de carga, se muestra que existen desviaciones considerables en las mediciones realizadas, sin embargo, al hacer la mezcla por 30 minutos tiende a disminuir esa desviación de los valores de las velocidades. Esto guarda relación con lo observado al realizar el premezclado a estas condiciones de operación en los que al mantener mayor tiempo en mezclado tiende a ser homogénea la mezcla, como se evidencia en la figura 28.

Al operar a 70 rpm y 50% de carga para la premezcla se evidencia una tendencia de la desviación de aumentar y disminuir, siendo estas características no idóneas en los productos fabricados. Dicho comportamiento guarda relación con lo observado en la curva de la figura 29 del premezclado, donde se observa que la premezcla tiene un comportamiento en el que se tiende a lograr la homogeneidad de la mezcla, pero en etapas del mezclado se produce el efecto contrario al presentarse pequeñas variaciones debidas a una segregación de la mezcla.

Con la premezcla realizada a las condiciones óptimas definidas de 70 rpm y 30% de carga, se observa que en los diferentes tiempos de mezclado con la nitroglicerina la desviación entre los valores de las velocidades de detonación obtenidos son bajas y muy cercanas en los diferentes tiempos. Dichos resultados se justifican puesto que como se evidencia en la figura 27, el premezclado mantiene la homogeneidad a lo largo del tiempo, la misma que no varía al añadir la nitroglicerina, obteniendo unas buenas características del producto final.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- El diseño del mezclador cónico define dos parámetros importantes: La capacidad requerida de  $0,012 \text{ m}^3/\text{h}$ , así como también el material a mezclar. Dado que los sólidos inertes presentan grandes variaciones en el tamaño de partícula originando segregación en el mezclado, fue necesario un tratamiento previo de molienda de las materias primas hasta un tamaño de partícula de aproximadamente  $440 \text{ }\mu\text{m}$ .
- El material que se seleccionó para la construcción del tornillo sin fin y del cono es acero inoxidable AISI 304, debido a la resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza y propiedades antichispa del material.
- Las condiciones de operación óptima son de  $70 \text{ rpm}$  y  $30\%$  de carga, obtenidos de los cálculos del diseño, las cuales permitieron lograr una disminución en la variabilidad de la velocidad de detonación de los cartuchos de dinamita, generando así una mejora en la calidad del producto al obtener explosivos con menor variabilidad a la que se manejaba.
- Las velocidades de detonación de los productos obtenidos a las diferentes condiciones, evidenció que la velocidad de  $3720 \text{ m/s}$ , es la más elevada de todas, cuando se usó la mezcla realizada con la nitroglicerina por un tiempo de 15 minutos y con la pre mezcla obtenida a las condiciones de operación de  $85 \text{ rpm}$  y  $30\%$  de carga. Considerando, por otra parte, la desviación de las velocidades de detonación se demostró que al realizar la mezcla de la nitroglicerina con la premezcla a las condiciones óptimas por un tiempo de 20 minutos se logró la menor desviación, valor que fue de  $20,44 \text{ m/s}$ .

- La titulación con el nitrato de plata es un método fácil de implementar a nivel de laboratorio, relativamente barato y con una sensibilidad aceptable, lo que permitió identificar claramente las mejores condiciones de operación del mezclador con lo que se obtuvo una buena homogenización del material a mezclar. El método de titulación con nitrato de plata se lo validó mediante una prueba espectrofotométrica, obteniendo como resultado una variación de diez segundos en los tiempos óptimos de premezclado.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- En la utilización del mezclador cónico vertical tomar en consideración, que el tamaño de partícula debe ser muy similar, aproximadamente 440  $\mu\text{m}$ , para que en el proceso no se presente segregación de los materiales y se logre alcanzar la homogeneidad.
- En la etapa de escalado del mezclador a nivel industrial, considerar la importancia de usar acero inoxidable AISI 304, dado que otros metales pueden sufrir corrosión contaminando la premezcla y creando una situación de riesgo durante la mezcla con la nitroglicerina.
- Durante las pruebas de la velocidad de detonación llevar a cabo el cumplimiento de las siguientes disposiciones de seguridad:
  - o Mantener las distancias de seguridad y permanecer en un sitio seguro mientras se realiza la explosión de las cargas explosivas.
  - o Usar el equipo de protección adecuado (Casco, gafas, botas, tapones auditivos)
  - o Llevar por separado los fulminantes y los explosivos.

- La persona encargada de manipular los explosivos deberá ser un técnico calificado.
  - En el lugar de las detonaciones se deberá colocar señales informativas que impidan el paso de personas e informe que se está trabajando con explosivos. De esta manera se salvaguarda la integridad personal y de los trabajadores cercanos.
  - Llevar un segmento de mecha lenta de la misma longitud que la del estopín, como un testigo.
- Tomar en cuenta que el método de titulación es específico para las materias primas a ser mezcladas y hace uso de un trazador particular, si hay cambios en los sólidos se debe buscar otro método que sea el adecuado y que no genere interferencias adicionales. Controlar que el pH de la muestra a titular sea neutro ya que en medio ácido existirá interferencia por la generación de dicromato y bicromato y en medio básico la precipitación de hidróxido de plata. Además, considerar la sensibilidad al reconocer el cambio de color en el punto de viraje

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aulton, M., 2002, "The Science of dosage form design ", Segunda Edición, pp. 181, 183, 186.
2. Badger, W. y Banchemo, J., 1955, "Introduction to Chemical Engineering", Mc Graw Hill, pp. 609-612.
3. Casey, J., 1991, "Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química", Editorial Limusa, Vol. I, México, D. F., pp. 34, 35, 185, 505.
4. Casey, J., 1991, "Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química", Editorial Limusa, Vol III, México, D. F., pp. 34, 38, 289.
5. Cooper, P., 1996, " Explosives Engineering", USA, pp. 50, 61
6. Du Pont, 1983, "Manual para el uso de explosivos ", Segunda edición, Editorial Regina de los Ángeles, México, D.F., pp. 45-51.
7. Fellows, P., 2000, "Tecnología del Procesado de los Alimentos", Editorial Acribia, Zaragoza, España, pp. 97, 98
8. Gennaro, A., "Farmacia Industrial", Veinteava edición, Editorial Médica Paramericana, pp. 808, 809.
9. Hach, 1992, "Water Analysis Handbook", Segunda edición, Colorado, USA, pp. 152, 153.
10. Helman, J., 1982, "Farmacotecnia, Teoría y Práctica", Editorial Continental, Tomo 4, México, pp. 1215-1219.

11. Lieberman, H. y Lachman, L., 1891, " Pharmaceutical Dosage Form: Tablets", N. Y., p. 3
12. Lucion, C., 2003, "Muestreo de materiales fragmentados", Minería, Metalurgia y Medio Ambiente, pp. 15-18.
13. Mc Cabe, W. y Smith, J., 1975, "Operaciones Básicas de Ingeniería Química", Editorial Reverté, Barcelona, España. Pp. 891- 898
14. Naoúm, P., 1998, "Nitroglycerine and Nitroglycerine Explosives", Las Vegas, Nevada, pp., 264, 282, 285
15. Norma Ecuatoriana INEN 222, 1977, "Fertilizantes. Determinación del contenido de humedad", Instituto Ecuatoriano de Normalización.
16. Norma Ecuatoriana INEN 1513, 1987, "Granos y Cereales. Determinación del contenido de humedad", Instituto Ecuatoriano de Normalización.
17. Norma Ecuatoriana INEN 1160, 1983, "Maderas. Determinación del contenido de humedad", Instituto Ecuatoriano de Normalización.
18. Norma Ecuatoriana INEN 49, 1973, "Sal común. Determinación de la humedad", Instituto Ecuatoriano de Normalización.
19. Norma Ecuatoriana INEN 51, 1973, "Sal común. Determinación del cloruro de sodio", Instituto Ecuatoriano de Normalización.

20. Norma Ecuatoriana INEN 476, 1980, "Productos empaquetados o envasados. Método de Muestreo al Azar", Instituto Ecuatoriano de Normalización.
21. Norma Española UNE EN 13631-13, 2003, "Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Determinación de la densidad"
22. Perry, H. y Green, W., 2001, "Manual del Ingeniero Químico", Mc Graw Hill, Vol III, Cap. 19, pp. 12, 17, 19.
23. Rudolf, M., 1993, "Explosives", Cuarta edición, Alemania, pp., 10, 11, 12.
24. Skoog, D., West, D., y Holler, J., 1995, "Química Analítica", Sexta Edición, Editorial McGraw Hill, México, pp. 2-5.
25. Slevens, C., 1984, "Feed Manufacturing Problems", Manhattan, Kansas, pp. 3, 4, 5.
26. Sprocket y Gear, Inc., 1993, "Martin Catalog 1090", Arlington, Texas, 1993., pp, H4-H23, H72, H73.
27. Suceska, M., 1995, "Test Methods for Explosives", Editorial Springer-Verlag, New York, p 93
28. Ulrich, G., 1986, "Procesos de Ingeniería Química", Editorial Interamericana- McGraw-Hill, México, pp. 76-79.
29. Vogel, A., 1960, "Química Analítica Cuantitativa", Editorial Kapelus, Vol 1, Buenos Aires, pp. 352, 353, 354.
30. Yinon, J. y Zitrin, S., 1993, "Modern Methods and Applications in Analysis of Explosives", Editorial Offices, pp. 12, 19

### 31. Documentos de internet

32. Emjuvi, 2007 “Maquinaria para la Industria”,  
<http://www.fabricas.com/emjuvi/asp>, (Febrero, 2010).
33. Farmacotecnia, Facultad de Química Farmacéutica, 2004 “Mezclado”,  
[http://docencia.udea.edu.co/qf/farmacotecnia/03/03\\_equipos.html](http://docencia.udea.edu.co/qf/farmacotecnia/03/03_equipos.html), (Febrero, 2010).
34. Labal, 2005, “Agitadora Mezcladora de Tambor “,  
<http://www.lavallab.com/es/laboratory-blender/drum-shaker.htm>, (Febrero, 2010).
35. Littleford, “Mezcladores, Secadores tipo Nauta”,  
<http://www.mezcladores.com/946/694.html>, (Febrero, 2010).
36. LLeal, “Mezclado de sólidos”,  
[http://www.lleal.com/productos\\_interior.php](http://www.lleal.com/productos_interior.php), (Febrero, 2010).
37. Nu-con, 2010, “Equipo de Mezclado de Polvo “,  
<http://www.nucon.com/es/powder-handling/blending/>, (Febrero, 2010).
38. Zamora Antonio, 2008, “Carbohidratos o Glúcidos“,  
<http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos2.html>, (Febrero, 2010).

# **ANEXOS**

## ANEXO I

### Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para el nitrato de amonio

#### Primera prueba

**Tabla 78.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba  
con Nitrato de Amonio  
(t = 5 min)

<b>Materia Prima: Nitrato de Amonio</b>						
<b>Tiempo: 5 min</b>						
<b>Dp</b>	<b>Núm Tamiz</b>	<b>Tamiz Vacío</b>	<b>Tamiz + Muestra</b>	<b>Muestra</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumul Retenido</b>
<b>(um)</b>		<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>		
850	20	439,12	443,72	4,6	4,59	4,59
600	30	428,25	434,76	6,51	6,49	11,08
425	40	403,79	412,88	9,09	9,06	20,14
250	60	382,19	399,33	17,14	17,09	37,24
	Fondo	367,7	430,64	62,94	62,76	100,00
	Total			100,28		

El cálculo del porcentaje retenido, se lo realiza mediante la ecuación [6]

$$\%MR = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100 \quad [6]$$

Donde:

%MR = Masa retenida, en porcentaje

m = masa de muestra, en g

m<sub>1</sub> = masa de tamiz sin muestra, en g

m<sub>2</sub> = masa de tamiz con muestra, en g

Ejemplo de cálculo, para Nitrato de Amonio primera prueba con tamiz #20

$$\%MR = \frac{443,72 - 439,12}{100,28} \times 100$$

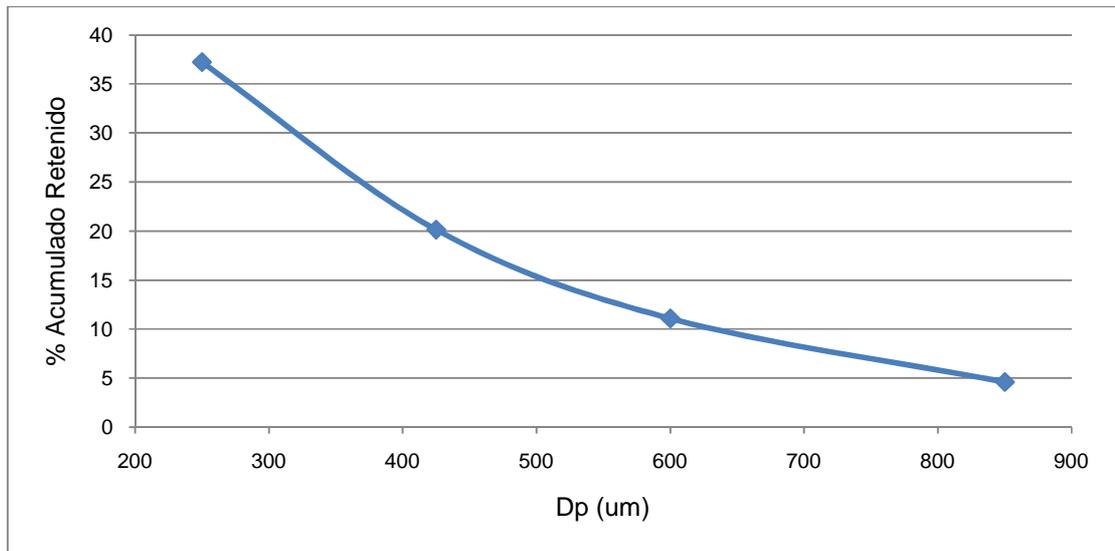
$$\%MR = 4,6$$

### Réplica

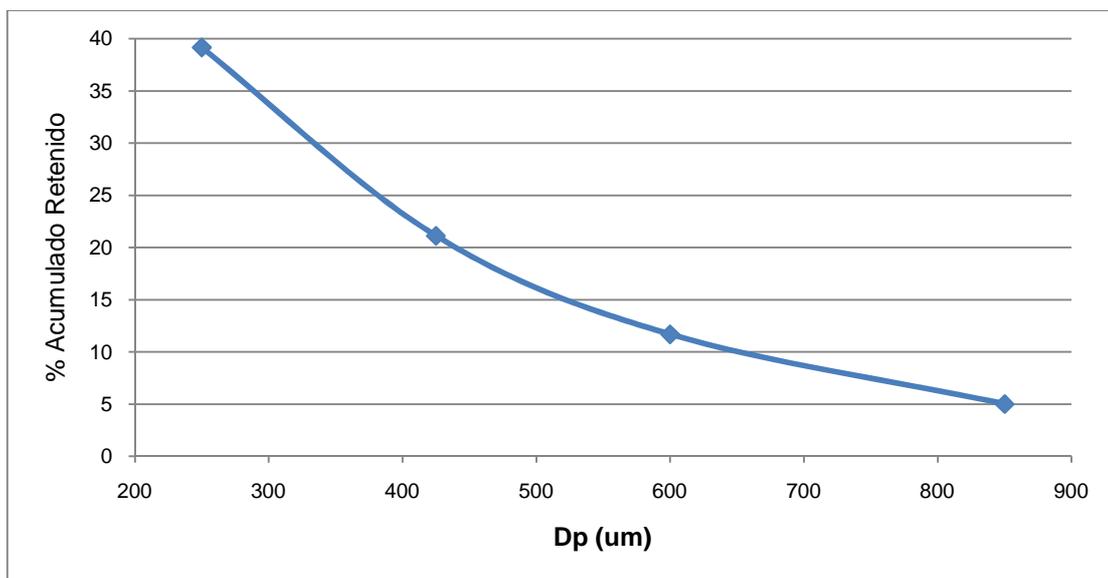
**Tabla 79.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Nitrato de Amonio  
(t = 5 min)

Materia Prima: Nitrato de Amonio						
Tiempo: 5 min						
Dp (um)	Núm Tamiz	Tamiz Vacío (g)	Tamiz + Muestra (g)	Muestra (g)	% Retenido	% Acumul Retenido
850	20	439,12	444,15	5,03	5,02	5,02
600	30	428,25	434,94	6,69	6,67	11,69
425	40	403,79	413,25	9,46	9,43	21,12
250	60	382,19	400,27	18,08	18,03	39,15
	Fondo	367,7	428,72	61,02	60,85	100,00
	Total			100,28		

A continuación se representa gráficamente, los datos tabulados en la Tabla 78 y Tabla 79.



**Figura 31.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Nitrato de Amonio.



**Figura 32.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la réplica con Nitrato de Amonio.

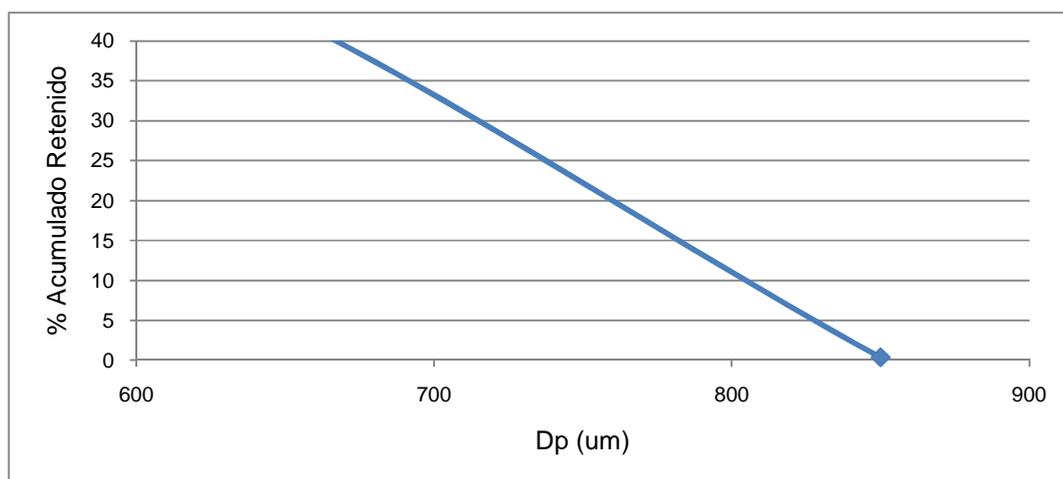
## ANEXO II

### Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para la harina de maíz

#### Primera prueba

**Tabla 80.** Masas de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Harina de Maíz (t = 5 min)

Materia Prima: Harina de maíz						
Tiempo: 5 min						
Dp ( $\mu\text{m}$ )	Núm Tamiz	Tamiz Vacío (g)	Tamiz + Muestra (g)	Muestra (g)	% Retenido	% Acumul Retenido
850	20	439,15	439,53	0,38	0,38	0,38
600	30	428,28	479,06	50,78	50,74	51,12
425	40	403,82	405,06	1,24	1,24	52,36
250	60	382,17	396,28	14,11	14,10	66,46
	Fondo	367,69	401,26	33,57	33,54	100,00
	Total			100,08		

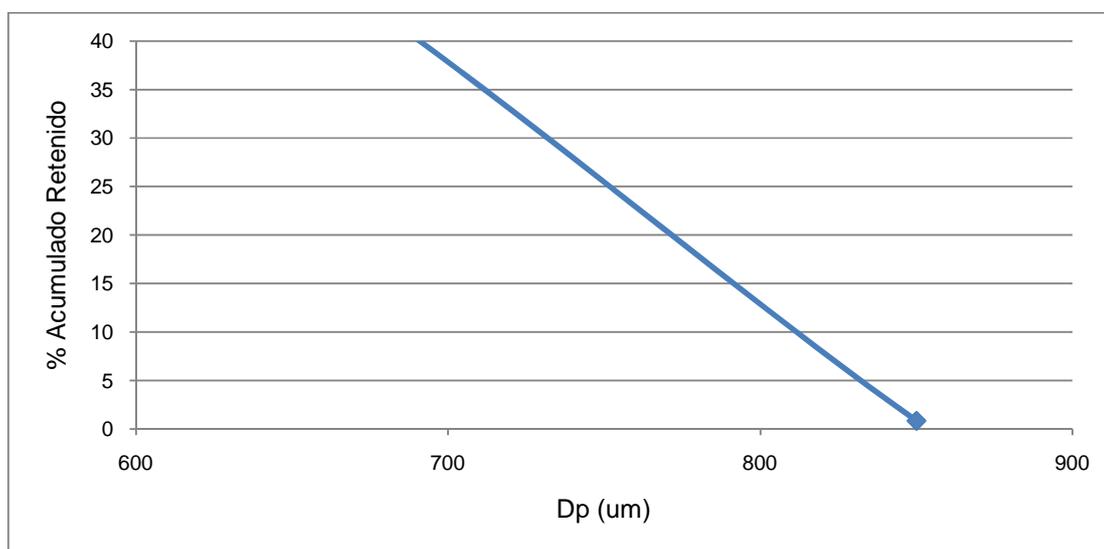


**Figura 33.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la primera prueba con Harina de Maíz.

## Réplica Harina de Maíz

**Tabla 81.** Masas de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Harina de Maíz  
(t = 5 min)

Materia Prima: Harina de maíz						
Tiempo: 5 min						
Dp ( $\mu\text{m}$ )	Núm Tamiz	Tamiz Vacío (g)	Tamiz + Muestra (g)	Muestra (g)	% Retenido	% Acumul Retenido
850	20	439,19	440,04	0,85	0,85	0,85
600	30	428,28	485,63	57,35	57,25	58,10
425	40	403,81	406,8	2,99	2,98	61,09
250	60	382,19	400,68	18,49	18,46	79,54
	Fondo	367,71	388,2	20,49	20,46	100,00
	Total			100,17		



**Figura 34.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la réplica con Harina de Maíz.

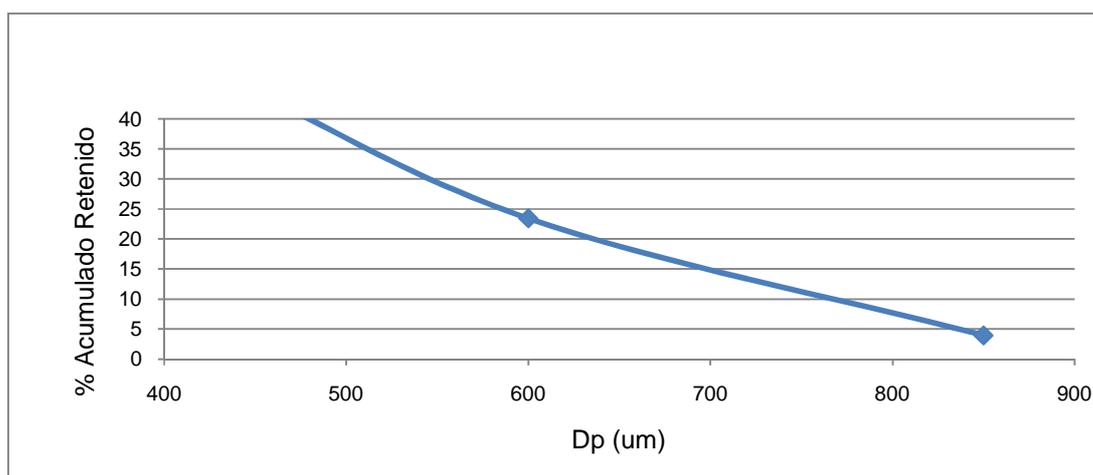
## ANEXO III

### Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para el aserrín

#### Primera prueba

**Tabla 82.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Aserrín  
(t = 5 min)

Materia Prima: Aserrín						
Tiempo: 5						
Dp	Núm Tamiz	Tamiz Vacío	Tamiz + Muestra	Muestra	% Retenido	% Acumul Retenido
(um)		(g)	(g)	(g)		
850	20	439,17	443,14	3,97	3,95	3,95
600	30	428,28	447,82	19,54	19,45	23,40
425	40	403,81	428,9	25,09	24,98	48,38
250	60	382,16	407,37	25,21	25,10	73,48
	Fondo	367,71	394,35	26,64	26,52	100,00
	Total			100,45		

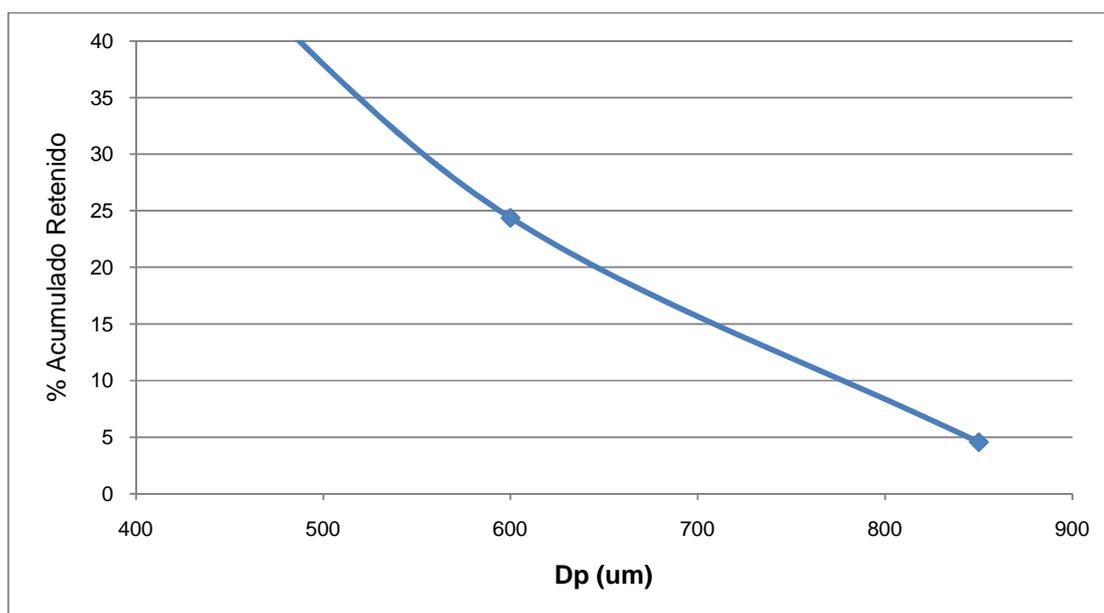


**Figura 35.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula (um), para la primera prueba con Aserrín.

## Réplica Aserrín

**Tabla 83.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Aserrín  
(t = 5 min)

Materia Prima: Aserrín						
Tiempo: 5 min						
Dp ( $\mu\text{m}$ )	Núm Tamiz	Tamiz Vacío (g)	Tamiz + Muestra (g)	Muestra (g)	% Retenido	% Acumul Retenido
850	20	439,17	443,76	4,59	4,57	4,57
600	30	428,28	448,18	19,90	19,81	24,38
425	40	403,81	429,16	25,35	25,24	49,62
250	60	382,16	406,77	24,61	24,50	74,12
	Fondo	367,71	393,71	26,00	25,88	100,00
	Total			100,45		



**Figura 36.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para réplica con Aserrín.

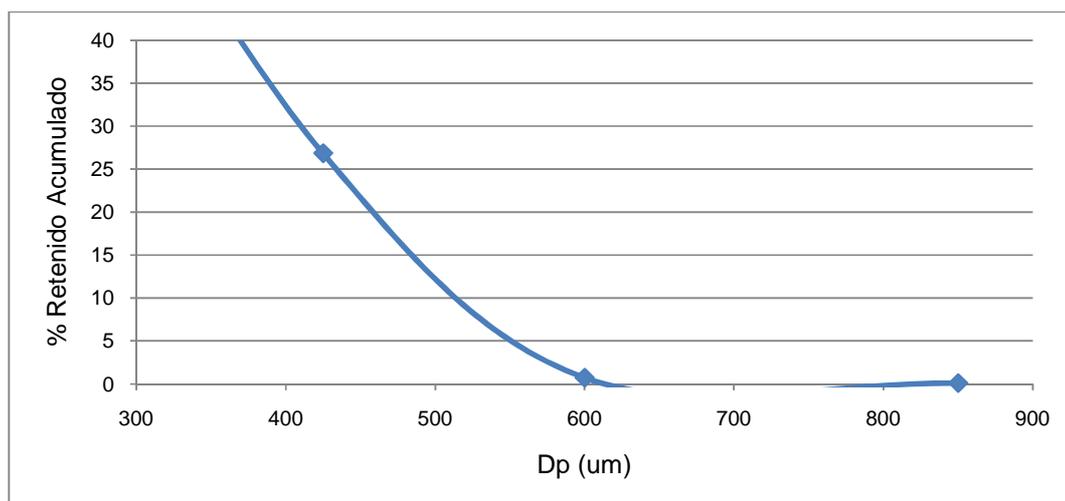
## ANEXO IV

### Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para la harina de maíz molido

#### Primera prueba

**Tabla 84.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Harina de Maíz molido (t = 5 min)

Materia Prima: Harina de maíz molido						
Tiempo: 5 min						
Dp	Núm Tamiz	Tamiz Vacío	Tamiz + Muestra	Muestra	% Retenido	% Acumul Retenido
( $\mu\text{m}$ )		(g)	(g)	(g)		
850	20	439,18	439,29	0,11	0,11	0,11
600	30	428,31	428,94	0,63	0,63	0,74
425	40	403,81	429,97	26,16	26,11	26,84
250	60	382,22	428,59	46,37	46,27	73,12
	Fondo	367,7	394,64	26,94	26,88	100,00
	Total			100,21		

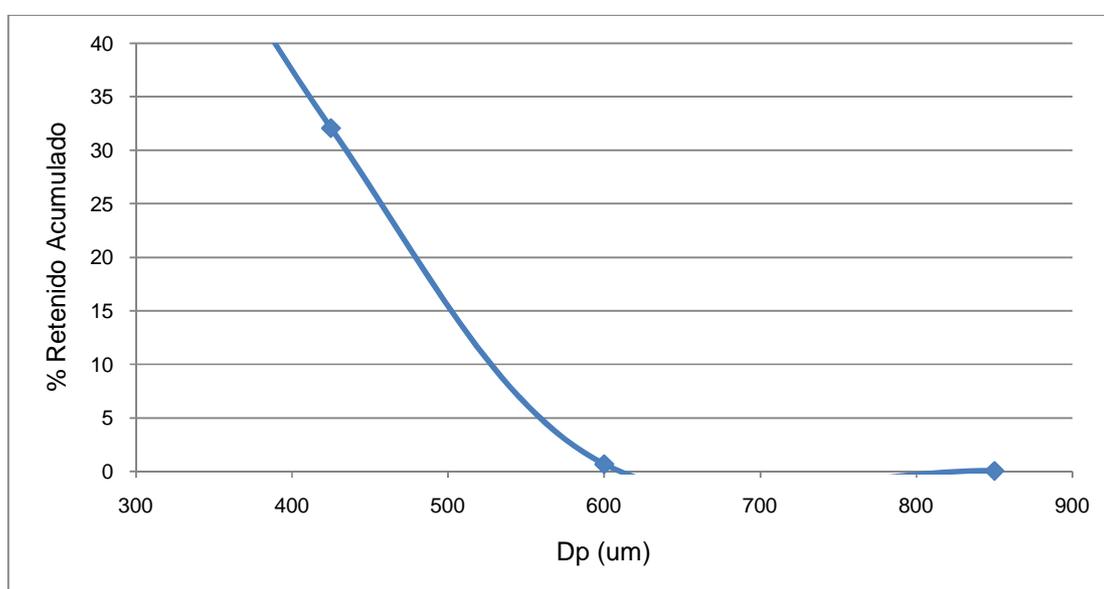


**Figura 37.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la primera prueba con Harina de Maíz molido.

## Réplica Harina de Maíz Molido

**Tabla 85.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Harina de Maíz molido  
(t = 5 min)

Materia Prima: Harina de maíz molido						
Tiempo: 5 min						
Dp	Núm Tamiz	Tamiz Vacío	Tamiz + Muestra	Muestra	% Retenido	% Acumul Retenido
( $\mu\text{m}$ )		(g)	(g)	(g)		
850	20	439,22	439,29	0,07	0,07	0,07
600	30	428,29	428,91	0,62	0,62	0,69
425	40	403,84	435,29	31,45	31,37	32,05
250	60	382,21	424,22	42,01	41,90	73,95
	Fondo	367,68	393,8	26,12	26,05	100,00
	Total			100,27		



**Figura 38.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la primera prueba con Harina de Maíz.

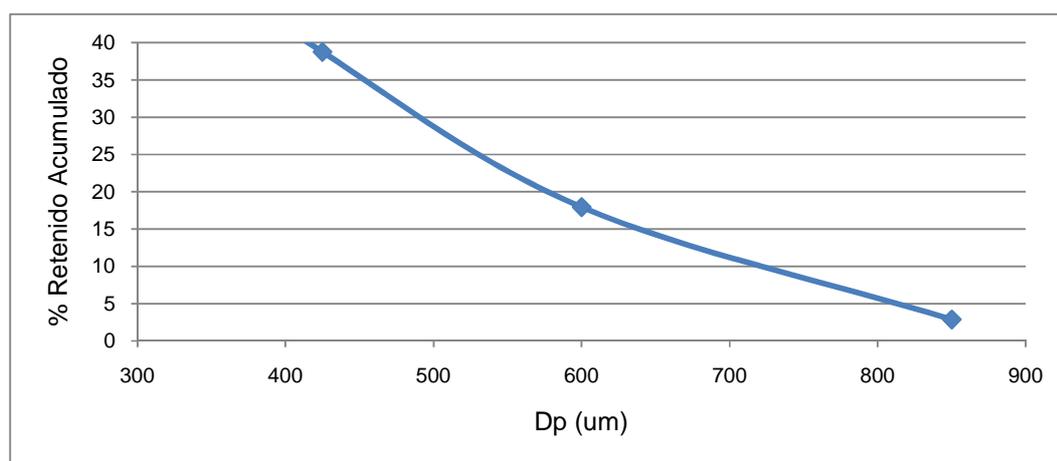
## ANEXO V

### Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para el aserrín molido

#### Primera prueba

**Tabla 86.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con Aserrín molido  
(t = 5 min)

Materia Prima: Aserrín						
Tiempo: 5 min						
Dp	Núm Tamiz	Tamiz Vacío	Tamiz + Muestra	Muestra	% Retenido	% Acumul Retenido
( $\mu\text{m}$ )		(g)	(g)	(g)		
850	20	439,18	442,05	2,87	2,87	2,87
600	30	428,3	443,38	15,08	15,06	17,93
425	40	403,83	424,65	20,82	20,80	38,73
250	60	382,19	406,61	24,42	24,39	63,12
	Fondo	367,69	404,61	36,92	36,88	100,00
	Total			100,11		

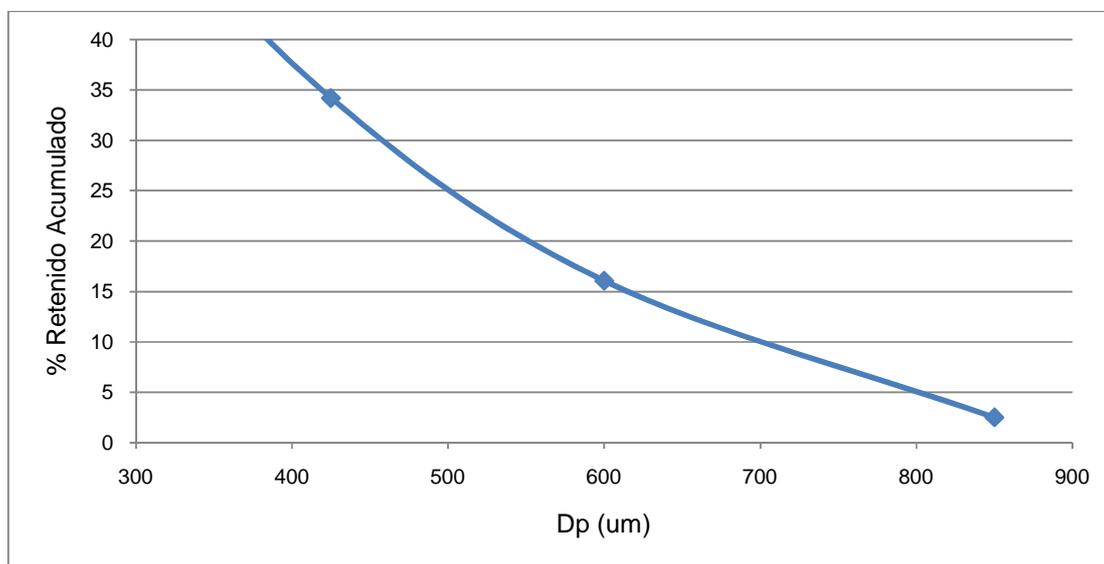


**Figura 39.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la primera prueba con Aserrín molido.

## Réplica Aserrín molido

**Tabla 87.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con Aserrín molido  
(t = 5 min)

Materia Prima: Aserrín						
Tiempo: 5 min						
Dp	Núm Tamiz	Tamiz Vacío	Tamiz + Muestra	Muestra	% Retenido	% Acumul Retenido
( $\mu\text{m}$ )		(g)	(g)	(g)		
850	20	439,21	441,73	2,52	2,52	2,52
600	30	428,3	441,88	13,58	13,56	16,07
425	40	403,84	421,99	18,15	18,12	34,20
250	60	382,2	410,01	27,81	27,77	61,96
	Fondo	367,7	405,8	38,1	38,04	100,00
	Total			100,16		



**Figura 40.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la réplica con Aserrín molido.

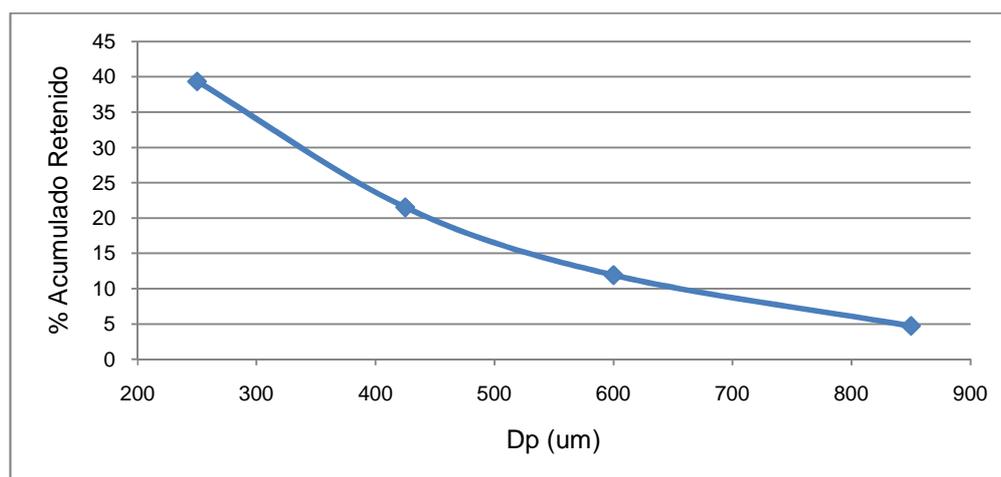
## ANEXO VI

### Tamaño de partícula, cálculos y gráficos para la mezcla

#### Primera prueba

**Tabla 88.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la primera prueba con la mezcla  
(t = 5 min)

Mezcla						
Tiempo: 5 min						
Dp ( $\mu\text{m}$ )	Núm Tamiz	Tamiz Vacio (g)	Tamiz + Muestra (g)	Muestra (g)	% Retenido	% Acumul Retenido
850	20	439,2	443,95	4,75	4,74	4,74
600	30	428,31	435,52	7,21	7,20	11,94
425	40	403,85	413,46	9,61	9,59	21,53
250	60	382,19	400,04	17,85	17,81	39,34
	Fondo	367,63	428,41	60,78	60,66	100,00
	Total			100,2		

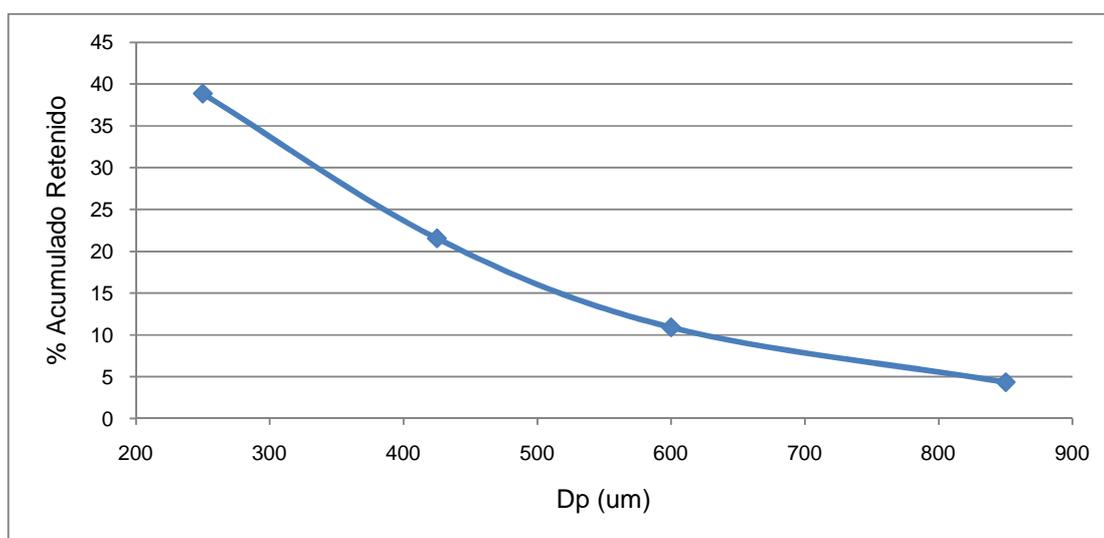


**Figura 41.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la primera prueba con la mezcla.

## Réplica mezcla

**Tabla 89.** Masa de los tamices y porcentaje acumulado para la réplica con la mezcla  
(t = 5 min)

Mezcla						
Tiempo: 5 min						
Dp	Núm Tamiz	Tamiz Vacío	Tamiz + Muestra	Muestra	% Retenido	% Acumul Retenido
( $\mu\text{m}$ )		(g)	(g)	(g)		
850	20	439,19	443,53	4,34	4,34	4,34
600	30	428,31	434,86	6,55	6,55	10,89
425	40	403,85	414,5	10,65	10,65	21,54
250	60	382,19	399,51	17,32	17,32	38,86
	Fondo	367,68	428,83	61,15	61,14	100,00
	Total			100,01		



**Figura 42.** Porcentaje acumulado retenido en función del diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ ), para la réplica con la mezcla.

## ANEXO VII

### Método de muestreo aleatorio o al azar para productos empaquetados o envasados, norma inen 476

**Tabla 90.** Tamaño de muestra para productos empaquetados o envasados

Tamaño del lote			Tamaño de la muestra
menos	de	50	5
de 51	a	90	8
91	a	150	13
151	a	280	20
281	a	500	35
501	a	1 200	50
1 201	a	3 200	80
3 201	a	10 000	125
10 001	a	35 000	200
35 001	a	150 000	315
150 001	a	500 000	500
500 000	a	más	1 000

(Inen 476, 1980)

## ANEXO VIII

## Características del material a ser transportado

Tabla 91. Características del material

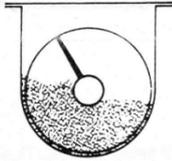
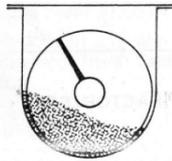
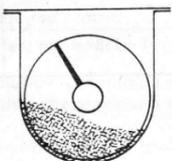
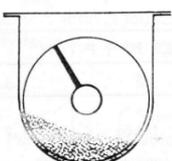
Major Class	Material Characteristics Included	Code Designation	
Density	Bulk Density, Loose	Actual Lbs/CF	
Size	Very Fine No. 200 Sieve (.0029") And Under No. 100 Sieve (.0059") And Under No. 40 Sieve (.016") And Under	A200 A100 A40	
	Fine No. 6 Sieve (.132") And Under	B6	
	Granular	½" And Under (6 Sieve to ½") 3" And Under (½ to 3") 7" And Under (3" to 7")	C½ D3 D7
		Lumpy 16" And Under (0" to 16") Over 16" To Be Specified X=Actual Maximum Size	D16 DX
	Irregular	Stringy, Fibrous, Cylindrical, Slabs, Etc.	E
Flowability	Very Free Flowing	1	
	Free Flowing	2	
	Average Flowability	3	
	Sluggish	4	
Abrasiveness	Mildly Abrasive	5	
	Moderately Abrasive	6	
	Extremely Abrasive	7	
Miscellaneous Properties Or Hazards	Buils Up and Hardens Generates Static Electricity Decomposes—Deteriorates in Storage Flammability Becomes Plastic or Tends to Soften Very Dusty Aerates and Becomes a Fluid Explosiveness Stickiness—Adhesion Contaminable, Affecting Use Degradable, Affecting Use Gives Off Harmful or Toxic Gas or Fumes Highly Corrosive Mildly Corrosive Hygroscopic Interlocks, Mats or Agglomerates Oils Present Packs Under Pressure Very Light and Fluffy—May Be Windswept Elevated Temperature	F G H J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z	

(Martin 1090, 1993)

## ANEXO IX

## Capacidad del tornillo sin fin a 1 revolución por minuto

Tabla 92. Diámetro del tornillo sin fin en función de la capacidad para 1 rpm y rpm máxima.

TROUGH LOADING		SCREW DIA. INCH	CAPACITY CUBIC FEET PER HOUR (Full Pitch)		MAX. RPM
			AT ONE RPM	AT MAX RPM	
45%		4	0.62	114	184
		6	2.23	368	165
		9	8.2	1270	155
		10	11.4	1710	150
		12	19.4	2820	145
		14	31.2	4370	140
		16	46.7	6060	130
		18	67.6	8120	120
		20	93.7	10300	110
		24	164.0	16400	100
30% A		4	0.41	53	130
		6	1.49	180	120
		9	5.45	545	100
		10	7.57	720	95
		12	12.9	1160	90
		14	20.8	1770	85
		16	31.2	2500	80
		18	45.0	3380	75
		20	62.5	4370	70
		24	109.0	7100	65
30% B		4	0.41	29	72
		6	1.49	90	60
		9	5.45	300	55
		10	7.6	418	55
		12	12.9	645	50
		14	20.8	1040	50
		16	31.2	1400	45
		18	45.0	2025	45
		20	62.8	2500	40
		24	109.0	4360	40
15%		4	0.21	15	72
		6	0.75	45	60
		9	2.72	150	55
		10	3.8	210	55
		12	6.46	325	50
		14	10.4	520	50
		16	15.6	700	45
		18	22.5	1010	45
		20	31.2	1250	40
		24	54.6	2180	40
30	108.0	3780	35		

(Martin 1090, 1993).

## ANEXO X

### Diámetro del eje del transportador de tornillo sin fin

**Tabla 93. Dimensiones del tornillo sin fin**

SCREW DIAM.	CPLNG. DIAM.	SIZE PART NO. CONVEYOR MOUNTED	SIZE PART NO. FLIGHTING ONLY	D PIPE SIZE		FLIGHT THICKNESS		H CPLNG. BEARING LENGTH	STD. LENGTH FT.-IN.	AVERAGE WEIGHT			
				IN- SIDE	OUT- SIDE	F INSIDE	G OUTSD.			COMPLETE SCREW FLIGHTING ONLY			
										STD. LENGTH	PER FT.	STD. LENGTH	PER FT.
4	1	4H206*	4HF206*	1 1/4	1 5/8	3/16	3/32	1 1/2	9-10 1/2	40	4	16	1.3
6	1 1/2	6H304**	6HF 304**	2	2 3/8	1/8	1/16	2	9-10	52	5	14	1.4
	1 1/2	6H308**	6HF 308**	2	2 3/8	1/8	1/16	2	9-10	62	6	28	2.8
	1 1/2	6H312**	6HF 312**	2	2 3/8	3/8	3/16	2	9-10	72	7	42	4.3
8	1 1/2	8H306**	8HF 306**	2	2 3/8	3/16	3/32	2	9-10	70	7	31	3.2
	1 1/2	8H312**	8HF 312**	2	2 3/8	3/8	3/16	2	9-10	101	10	65	6.1
9	2	9H406**	9HF 406**	2 1/2	2 7/8	3/16	3/32	2	9-10	91	9	30	3.0
	2	9H412**	9HF 412**	2 1/2	2 7/8	3/8	3/16	2	9-10	121	12	60	6.6
	2	9H414**	9HF 414**	2 1/2	2 7/8	7/16	7/32	2	9-10	131	13	70	6.3
10	1 1/2	10H306**	10HF 306**	2	2 3/8	3/16	3/32	2	9-10	81	8	48	4.9
	2	10H412**	10HF 412**	2 1/2	2 7/8	3/8	3/16	2	9-10	130	13	76	7.7
12	2	12H408**	12HF 408**	2 1/2	2 7/8	1/4	1/8	2	11-10	140	12	67	5.7
	2	12H412**	12HF 412**	2 1/2	2 7/8	3/8	3/16	2	11-10	180	15	102	8.6
12	2 7/16	12H508**	12HF 508**	3	3 1/2	1/4	1/8	3	11-9	168	14	64	5.4
	2 7/16	12H512**	12HF 512**	3	3 1/2	3/8	3/16	3	11-9	198	17	96	8.2
14	3	12H614**	12HF 614**	3 1/2	4	7/16	7/32	3	11-9	220	18	112	9.3
14	2 7/16	14H508**	14HF 508**	3	3 1/2	1/4	1/8	3	11-9	170	14	84	7.1
	3	14H614**	14HF 614**	3 1/2	4	7/16	7/32	3	11-9	254	22	132	11.2
16	3	16H610**	16HF 610**	3 1/2	4	5/16	5/32	3	11-9	228	19	120	10.0
	3	16H614**	16HF 614**	4	4 1/2	7/16	7/32	3	11-9	285	24	154	11.7
18	3	18H610**	18HF 610**	3 1/2	4	5/16	5/32	3	11-9	282	24	167	13.9

\* R FOR RIGHT HAND      \* L FOR LEFT HAND

(Martin 1090, 1993).

## ANEXO XI

### Cálculo del tamaño de muestra mínimo para que sea representativo del lote, mediante la teoría de gy.

Mediante la ecuación [22], se calcula el tamaño de muestra mínimo

$$M = \frac{(C \times d^3)}{t^2} \quad [22]$$

En donde:

M = Tamaño de muestra mínimo, en g

d = Dimensión de la abertura del tamiz con un retenido entre 5 y 10% , en cm

t = Error medio de muestreo para un umbral de confianza de 95%

C = Factor de partícula

C = f g l m, en donde:

f = Factor de forma

g = Factor granulométrico

l = Factor de liberación

m = Factor mineralógico

$$m = \left( \frac{(1-a)}{a} \right) \times ((1-a)r + ad)$$

En donde:

a = Proporción en peso del componente crítico

r = Densidad del mineral valioso, en  $\frac{g}{cm^3}$

d = Densidad del mineral ganga, en  $\frac{g}{cm^3}$

**Ejemplo de cálculo:**

**Factor mineralógico (m)**

$$m = \left( \frac{(1-a)}{a} \right) \times ((1-a)r + ad)$$

$$m = \left( \frac{(1-0,01)}{0,01} \right) \times ((1-0,01)2,163 + (0,01 \times 0,668))$$

$$m = 212,66$$

**Factor de partícula ( C )**

$$C = f g l m$$

$$C = 0,5 \times 0,25 \times 1 \times 212,66$$

$$C = 26,58$$

**Tamaño de muestra mínimo (M)**

$$M = \frac{(C \times d^3)}{t^2}$$

$$M = \frac{(26,58 \times 0,06^3)}{0,01^2}$$

$$M = 57,42$$

Por razones de seguridad se tiene que:

$$M_{\text{real}} = 3 \times M_{\text{Gy}}$$

$$M_{\text{real}} = 3 \times 57,42$$

$$M_{\text{real}} = 172,25 \text{ (g)}$$

## ANEXO XII

### Consumo de nitrato de plata y cálculo de las ppm del ion cloruro para las diferentes velocidades de giro del tornillo sin fin.

#### Pruebas realizadas a 70 rpm y 30 % capacidad

En la siguiente tabla se indica la cantidad de titulante gastado en ml para una velocidad del sin fin de 70 rpm y 30 % de carga.

**Tabla 94.** Nitrato de plata (ml) gastados a 70 rpm y 30% carga

Tiempo	Nitrato de plata (ml)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	2,1	2,05	0	0	0
<b>10</b>	1,05	0,75	0,65	0,45	0
<b>20</b>	0,65	0,55	0,5	0,6	0
<b>30</b>	0,55	0,65	0,6	0,35	0,15
<b>40</b>	0,6	0,5	0,45	0,45	0,25
<b>50</b>	0,6	0,55	0,5	0,5	0,4
<b>60</b>	0,6	0,5	0,45	0,5	0,4
<b>120</b>	0,45	0,45	0,55	0,55	0,4
<b>180</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>240</b>	0,45	0,45	0,45	0,4	0,4
<b>300</b>	0,35	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>360</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>420</b>	0,45	0,4	0,45	0,4	0,4
<b>480</b>	0,45	0,4	0,45	0,4	0,4

Mediante los datos obtenidos anteriormente y las ecuaciones presentadas a continuación, se procede a calcular la concentración de ión cloruro en ppm para cada una de las muestras.

Ejemplo de cálculo

**Tiempo 10 segundos a 70 rpm y 30 % de carga**

**Cálculo de la Normalidad del ión cloruro**

$$N_{\text{Cloruro}} = \frac{N_{\text{Nitratoplata}} V_{\text{Nitratoplata}}}{V_{\text{cloruro}}} \quad [20]$$

Donde:

$N_{\text{Cloruro}}$  = Normalidad de cloruro, en equivalentes por litro.

$N_{\text{Nitratoplata}}$  = Normalidad de Nitrato de Plata, en equivalentes por litro.

$V_{\text{Nitratoplata}}$  = Volumen de Nitrato de plata usado en la titulación, en mililitros.

$V_{\text{Cloruro}}$  = Volumen de solución de Cloruro, en mililitros.

$$N_{\text{Cloruro}} = \frac{0,1 \times 1,05}{25}$$

$$N_{\text{Cloruro}} = 0,0042 \frac{\text{eqq} - \text{g}}{\text{L}}$$

En la Tabla 95 se encuentran tabulados los datos de la normalidad del ión cloruro para 70 rpm y 30 % de carga.

**Tabla 95.** Normalidad del ión cloruro a 70 rpm y 30 % de carga.

Tiempo	Normalidad del ión cloruro (eqq-g/L)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	0,0084	0,0082	0	0	0
10	0,0042	0,003	0,0026	0,0018	0
20	0,0026	0,0022	0,002	0,0024	0
30	0,0022	0,0026	0,0024	0,0014	0,0006
40	0,0024	0,002	0,0018	0,0018	0,001
50	0,0024	0,0022	0,002	0,002	0,0016
60	0,0024	0,002	0,0018	0,002	0,0016
120	0,0018	0,0018	0,0022	0,0022	0,0016
180	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
240	0,0018	0,0018	0,0018	0,0016	0,0016
300	0,0014	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
360	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
420	0,0018	0,0016	0,0018	0,0016	0,0016
480	0,0018	0,0016	0,0018	0,0016	0,0016

**Cálculo de la concentración en ppm del ión cloruro**

$$C_{Cl} = \frac{N_{\text{cloruro}} \times PM}{1} \times 1000 \quad [21]$$

Donde:

$C_{Cl}$  = Concentración de cloruro, en ppm.

$N_{\text{cloruro}}$  = Normalidad de cloruro, en equivalentes por litro.

PM = Peso molecular del cloruro, en gramos por mol.

$$C_{Cl} = \frac{0,0042 \times 35,45}{1} \times 1000$$

$$C_{Cl} = 148, 89 \text{ ppm}$$

En la Tabla 96 se encuentran tabulados la concentración del ión cloruro en ppm para 70 rpm y 30 % de carga.

**Tabla 96.** Concentración del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	297,78	290,69	0	0	0
10	148,89	106,35	92,17	63,81	0
20	92,17	77,99	70,90	85,08	0
30	77,99	92,17	85,08	49,63	21,27
40	85,08	70,90	63,81	63,81	35,45
50	85,08	77,99	70,90	70,90	56,72
60	85,08	70,90	63,81	70,90	56,72
120	63,81	63,81	77,99	77,99	56,72
180	56,72	56,72	56,72	56,72	56,72
240	63,81	63,81	63,81	56,72	56,72
300	49,63	56,72	56,72	56,72	56,72
360	56,72	56,72	56,72	56,72	56,72
420	63,81	56,72	63,81	56,72	56,72
480	63,81	56,72	63,81	56,72	56,72

De la Tabla 96 se calcula la concentración media de cada una de las secciones en sus respectivos tiempos, mediante la siguiente expresión:

### Sección A

$$C_{\text{media}} = \frac{C_{1A} + C_{2A}}{2}$$

$$C_{\text{media}} = \frac{148,89 + 106,35}{2}$$

$$C_{\text{media}} = 127,62 \text{ ppm}$$

Los resultados se encuentran tabulados en la Tabla 97.

**Tabla 97.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 30% de carga

<b>Tiempo</b>	<b>Cloruro (ppm)</b>		
	<b>Sección A (Superior)</b>	<b>Sección B (Medio)</b>	<b>Sección C (Inferior)</b>
<b>0</b>	294,24	0	0
<b>10</b>	127,62	77,99	0
<b>20</b>	85,08	77,99	0
<b>30</b>	85,08	67,36	21,27
<b>40</b>	77,99	63,81	35,45
<b>50</b>	81,54	70,90	56,72
<b>60</b>	77,99	67,36	56,72
<b>120</b>	63,81	77,99	56,72
<b>180</b>	56,72	56,72	56,72
<b>240</b>	63,81	60,27	56,72
<b>300</b>	53,18	56,72	56,72
<b>360</b>	56,72	56,72	56,72
<b>420</b>	60,27	60,27	56,72
<b>480</b>	60,27	60,27	56,72

### Pruebas a 55 rpm y 30 % capacidad

**Tabla 98.** Nitrato de plata (ml) gastados a 55 rpm y 30% carga

Tiempo	Nitrato de plata (ml)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	0,95	0,85	0	0	0
10	0,15	0,05	0	0	0
20	0,35	0,15	0	0	0
30	0,75	0,65	0,5	0,35	0,2
40	0,65	0,6	0,55	0,45	0,3
50	0,55	0,45	0,8	0,75	0,35
60	0,45	0,4	0,65	0,55	0,35
120	0,45	0,35	0,6	0,5	0,45
180	0,45	0,4	0,4	0,35	0,45
240	0,4	0,45	0,45	0,4	0,45
300	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
360	0,45	0,5	0,5	0,45	0,4
420	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
480	0,5	0,45	0,4	0,35	0,35

**Tabla 99.** Normalidad del ión cloruro a 55 rpm y 30 % de carga.

Tiempo	Normalidad del ión cloruro (eqq-g/L)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	0,0038	0,0034	0	0	0
10	0,0006	0,0002	0	0	0
20	0,0014	0,0006	0	0	0
30	0,003	0,0026	0,002	0,0014	0,0008
40	0,0026	0,0024	0,0022	0,0018	0,0012
50	0,0022	0,0018	0,0032	0,003	0,0014
60	0,0018	0,0016	0,0026	0,0022	0,0014
120	0,0018	0,0014	0,0024	0,002	0,0018
180	0,0018	0,0016	0,0016	0,0014	0,0018
240	0,0016	0,0018	0,0018	0,0016	0,0018
300	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
360	0,0018	0,002	0,002	0,0018	0,0016
420	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
480	0,002	0,0018	0,0016	0,0014	0,0014

**Tabla 100.** Concentración del ión cloruro en ppm a 55 rpm y 30% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	134,71	120,53	0	0	0
<b>10</b>	21,27	7,09	0	0	0
<b>20</b>	49,63	21,27	0	0	0
<b>30</b>	106,35	92,17	70,90	49,63	28,36
<b>40</b>	92,17	85,08	77,99	63,81	42,54
<b>50</b>	77,99	63,81	113,44	106,35	49,63
<b>60</b>	63,81	56,72	92,17	77,99	49,63
<b>120</b>	63,81	49,63	85,08	70,90	63,81
<b>180</b>	63,81	56,72	56,72	49,63	63,81
<b>240</b>	56,72	63,81	63,81	56,72	63,81
<b>300</b>	63,81	63,81	63,81	63,81	63,81
<b>360</b>	63,81	70,90	70,90	63,81	56,72
<b>420</b>	63,81	63,81	63,81	63,81	63,81
<b>480</b>	70,90	63,81	56,72	49,63	49,63

**Tabla 101.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 55 rpm y 30% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)		
	Superior	Medio	Inferior
<b>0</b>	127,62	0	0
<b>10</b>	14,18	0	0
<b>20</b>	35,45	0	0
<b>30</b>	99,26	60,27	28,36
<b>40</b>	88,63	70,90	42,54
<b>50</b>	70,90	109,90	49,63
<b>60</b>	60,27	85,08	49,63
<b>120</b>	56,72	77,99	63,81
<b>180</b>	60,27	53,18	63,81
<b>240</b>	60,27	60,27	63,81
<b>300</b>	63,81	63,81	63,81
<b>360</b>	67,36	67,36	56,72
<b>420</b>	63,81	63,81	63,81
<b>480</b>	67,36	53,18	49,63

### Pruebas a 85 rpm y 30 % capacidad

**Tabla 102.** Nitrato de plata (ml) gastados a 85 rpm y 30% carga

Tiempo	Nitrato de plata (ml)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	0,65	1,00	0,00	0,00	0,00
<b>10</b>	0,25	0,50	0,45	0,45	0,00
<b>20</b>	0,20	0,30	0,20	0,30	0,20
<b>30</b>	0,40	0,25	0,25	0,25	0,20
<b>40</b>	0,20	0,40	0,15	0,35	0,20
<b>50</b>	0,45	0,35	0,35	0,35	0,25
<b>60</b>	0,35	0,35	0,30	0,35	0,40
<b>120</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>180</b>	0,25	0,25	0,35	0,35	0,40
<b>240</b>	0,45	0,40	0,35	0,50	0,40
<b>300</b>	0,45	0,35	0,45	0,45	0,50
<b>360</b>	0,45	0,45	0,50	0,50	0,45
<b>420</b>	0,45	0,40	0,50	0,45	0,45
<b>480</b>	0,40	0,45	0,45	0,45	0,40

**Tabla 103.** Normalidad del ión cloruro a 85 rpm y 30 % de carga.

Tiempo	Normalidad del ión cloruro (eqq-g/L)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	0,0026	0,0040	0,0000	0,0000	0,0000
<b>10</b>	0,0010	0,0020	0,0018	0,0018	0,0000
<b>20</b>	0,0008	0,0012	0,0008	0,0012	0,0008
<b>30</b>	0,0016	0,0010	0,0010	0,0010	0,0008
<b>40</b>	0,0008	0,0016	0,0006	0,0014	0,0008
<b>50</b>	0,0018	0,0014	0,0014	0,0014	0,0010
<b>60</b>	0,0014	0,0014	0,0012	0,0014	0,0016
<b>120</b>	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
<b>180</b>	0,0010	0,0010	0,0014	0,0014	0,0016
<b>240</b>	0,0018	0,0016	0,0014	0,0020	0,0016
<b>300</b>	0,0018	0,0014	0,0018	0,0018	0,0020
<b>360</b>	0,0018	0,0018	0,0020	0,0020	0,0018
<b>420</b>	0,0018	0,0016	0,0020	0,0018	0,0018
<b>480</b>	0,0016	0,0018	0,0018	0,0018	0,0016

**Tabla 104.** Concentración del ión cloruro en ppm a 85 rpm y 30% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	92,17	141,80	0,00	0,00	0,00
<b>10</b>	35,45	70,90	63,81	63,81	0,00
<b>20</b>	28,36	42,54	28,36	42,54	28,36
<b>30</b>	56,72	35,45	35,45	35,45	28,36
<b>40</b>	28,36	56,72	21,27	49,63	28,36
<b>50</b>	63,81	49,63	49,63	49,63	35,45
<b>60</b>	49,63	49,63	42,54	49,63	56,72
<b>120</b>	56,72	56,72	56,72	56,72	56,72
<b>180</b>	35,45	35,45	49,63	49,63	56,72
<b>240</b>	63,81	56,72	49,63	70,90	56,72
<b>300</b>	63,81	49,63	63,81	63,81	70,90
<b>360</b>	63,81	63,81	70,90	70,90	63,81
<b>420</b>	63,81	56,72	70,90	63,81	63,81
<b>480</b>	56,72	63,81	63,81	63,81	56,72

**Tabla 105.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 85 rpm y 30% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)		
	Superior	Medio	Inferior
<b>0</b>	116,99	0,00	0,00
<b>10</b>	53,18	63,81	0,00
<b>20</b>	35,45	35,45	28,36
<b>30</b>	46,09	35,45	28,36
<b>40</b>	42,54	35,45	28,36
<b>50</b>	56,72	49,63	35,45
<b>60</b>	49,63	46,09	56,72
<b>120</b>	56,72	56,72	56,72
<b>180</b>	35,45	49,63	56,72
<b>240</b>	60,27	60,27	56,72
<b>300</b>	56,72	63,81	70,90
<b>360</b>	63,81	70,90	63,81
<b>420</b>	60,27	67,36	63,81
<b>480</b>	60,27	63,81	56,72

### Pruebas realizadas a 70 rpm y 50 % capacidad

**Tabla 106.** Nitrato de plata (ml) gastados a 70 rpm y 50% carga

Tiempo	Nitrato de plata (ml)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	1,75	1,65	0	0	0
<b>10</b>	1,65	1,55	0,45	0,65	0
<b>20</b>	0,5	0,9	0,5	0,7	0
<b>30</b>	0,55	0,65	0,5	0,6	0
<b>40</b>	0,65	0,55	0,45	0,5	0,05
<b>50</b>	0,55	0,6	0,4	0,5	0,15
<b>60</b>	0,5	0,6	0,45	0,55	0,25
<b>120</b>	0,35	0,35	0,3	0,35	0,3
<b>180</b>	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
<b>240</b>	0,35	0,3	0,3	0,35	0,25
<b>300</b>	0,4	0,45	0,35	0,35	0,25
<b>360</b>	0,3	0,3	0,35	0,4	0,25
<b>420</b>	0,3	0,25	0,4	0,35	0,3
<b>480</b>	0,35	0,35	0,4	0,4	0,3

**Tabla 107.** Normalidad del ión cloruro a 70 rpm y 50 % de carga.

Tiempo	Normalidad del ión cloruro (eqq-g/L)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	0,007	0,0066	0	0	0
<b>10</b>	0,0066	0,0062	0,0018	0,0026	0
<b>20</b>	0,002	0,0036	0,002	0,0028	0
<b>30</b>	0,0022	0,0026	0,002	0,0024	0
<b>40</b>	0,0026	0,0022	0,0018	0,002	0,0002
<b>50</b>	0,0022	0,0024	0,0016	0,002	0,0006
<b>60</b>	0,002	0,0024	0,0018	0,0022	0,001
<b>120</b>	0,0014	0,0014	0,0012	0,0014	0,0012
<b>180</b>	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
<b>240</b>	0,0014	0,0012	0,0012	0,0014	0,001
<b>300</b>	0,0016	0,0018	0,0014	0,0014	0,001
<b>360</b>	0,0012	0,0012	0,0014	0,0016	0,001
<b>420</b>	0,0012	0,001	0,0016	0,0014	0,0012
<b>480</b>	0,0014	0,0014	0,0016	0,0016	0,0012

**Tabla 108.** Concentración del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 50% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	248,15	233,97	0	0	0
<b>10</b>	233,97	219,79	63,81	92,17	0
<b>20</b>	70,9	127,62	70,9	99,26	0
<b>30</b>	77,99	92,17	70,9	85,08	0
<b>40</b>	92,17	77,99	63,81	70,9	7,09
<b>50</b>	77,99	85,08	56,72	70,9	21,27
<b>60</b>	70,9	85,08	63,81	77,99	35,45
<b>120</b>	49,63	49,63	42,54	49,63	42,54
<b>180</b>	49,63	49,63	49,63	49,63	49,63
<b>240</b>	49,63	42,54	42,54	49,63	35,45
<b>300</b>	56,72	63,81	49,63	49,63	35,45
<b>360</b>	42,54	42,54	49,63	56,72	35,45
<b>420</b>	42,54	35,45	56,72	49,63	42,54
<b>480</b>	49,63	49,63	56,72	56,72	42,54

**Tabla 109.** Concentración promedio del ión cloruro en ppm a 70 rpm y 50% de carga

Tiempo	Cloruro (ppm)		
	Superior	Medio	Inferior
<b>0</b>	241,06	0	0
<b>10</b>	226,88	77,99	0
<b>20</b>	99,26	85,08	0
<b>30</b>	85,08	77,99	0
<b>40</b>	85,08	67,36	7,09
<b>50</b>	81,54	63,81	21,27
<b>60</b>	77,99	70,90	35,45
<b>120</b>	49,63	46,09	42,54
<b>180</b>	49,63	49,63	49,63
<b>240</b>	46,09	46,09	35,45
<b>300</b>	60,27	49,63	35,45
<b>360</b>	42,54	53,18	35,45
<b>420</b>	38,99	53,18	42,54
<b>480</b>	49,63	56,72	42,54

## ANEXO XIII

### Índice de mezclado para cada una de las condiciones de velocidad de giro del tornillo sin fin y porcentaje de carga

#### Pruebas realizadas a 70 rpm y 30 % de carga

Para realizar el cálculo del índice de mezclado se requiere el porcentaje de cloruro en cada muestra, estos datos se encuentran tabulados en la Tabla 100.

**Tabla 110.** Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga

	%Cloruro				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
<b>0</b>	2,97	2,90	0,00	0,00	0,00
<b>10</b>	1,49	1,06	0,92	0,64	0,00
<b>20</b>	0,92	0,78	0,71	0,85	0,00
<b>30</b>	0,78	0,92	0,85	0,50	0,21
<b>40</b>	0,85	0,71	0,64	0,64	0,35
<b>50</b>	0,85	0,78	0,71	0,71	0,57
<b>60</b>	0,85	0,71	0,64	0,71	0,57
<b>120</b>	0,64	0,64	0,78	0,78	0,57
<b>180</b>	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
<b>240</b>	0,64	0,64	0,64	0,57	0,57
<b>300</b>	0,50	0,57	0,57	0,57	0,57
<b>360</b>	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
<b>420</b>	0,64	0,57	0,64	0,57	0,57
<b>480</b>	0,64	0,57	0,64	0,57	0,57

El índice de mezclado se calcula mediante la ecuación [1]

$$I_p = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(N-1)\mu(1-\mu)}} \quad (1)$$

Donde:

$I_p$  = Índice de mezclado

$x_i$  = Fracción del material trazador

$\bar{x}$  = Media

$N$  = Número de muestras

$\mu$  = Fracción global del trazador en la mezcla.

### Ejemplo de cálculo

**Tabla 111.** Ejemplo de cálculo para 10 segundos a 70 rpm y 30 % de carga

$X_i$	$\bar{X}$	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$	$\sum(X_i - \bar{X})^2$
0,01488	0,00822	0,00666	4,43397E-05	0,00012
0,01063		0,00241	5,81052E-06	
0,00921		0,00099	9,82479E-07	
0,00637		-0,00184	3,39597E-06	
0,00000		-0,00822	6,75305E-05	

$$I_p = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(N - 1)\mu(1 - \mu)}}$$

$$I_p = \sqrt{\frac{0,00012}{(5 - 1) \times 0,01 \times (1 - 0,01)}}$$

$$I_p = 0,055$$

**Tabla 112.** Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga

Tiempo	$\bar{X}$	$\sum (X_i - \bar{X})^2$	Índice
0	0,01176	1,04E-03	0,16266
10	0,00822	1,22E-04	0,05580
20	0,00652	5,56E-05	0,03765
30	0,00652	3,45E-05	0,02966
40	0,00637	1,30E-05	0,01824
50	0,00722	4,42E-06	0,01062
60	0,00694	4,41E-06	0,01061
120	0,00680	3,61E-06	0,00959
180	0,00567	1,74E-12	0,00001
240	0,00609	6,04E-07	0,00393
300	0,00553	4,00E-07	0,00320
360	0,00567	1,23E-12	0,00001
420	0,00595	6,02E-07	0,00392
480	0,00595	6,00E-07	0,00391

**85 rpm y 30 % de carga****Tabla 113.** Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 85 rpm y 30 % de carga

Tiempo	%Cloruro				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	0,92	1,42	0,00	0,00	0,00
10	0,35	0,71	0,64	0,64	0,00
20	0,28	0,43	0,28	0,42	0,28
30	0,57	0,35	0,35	0,35	0,28
40	0,28	0,57	0,21	0,50	0,28
50	0,64	0,50	0,50	0,50	0,35
60	0,50	0,50	0,43	0,50	0,57
120	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
180	0,35	0,35	0,50	0,50	0,57
240	0,64	0,57	0,50	0,71	0,57
300	0,64	0,50	0,64	0,64	0,71
360	0,64	0,64	0,71	0,71	0,64
420	0,64	0,57	0,71	0,64	0,64
480	0,57	0,64	0,64	0,64	0,57

**Tabla 114.** Índice de mezcla para 85 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga

Tiempo	$\bar{X}$	$\sum (X_i - \bar{X})^2$	Índice
0	0,00469	1,78E-04	0,06730
10	0,00468	3,47E-05	0,02977
20	0,00340	2,41E-06	0,00784
30	0,00382	4,63E-06	0,01087
40	0,00368	9,43E-06	0,01551
50	0,00496	4,01E-06	0,01011
60	0,00496	1,00E-06	0,00506
120	0,00567	6,77E-12	0,00001
180	0,00453	3,61E-06	0,00960
240	0,00595	2,60E-06	0,00814
300	0,00623	2,41E-06	0,00784
360	0,00666	6,02E-07	0,00392
420	0,00637	1,00E-06	0,00505
480	0,00609	5,97E-07	0,00390

**55 rpm y 30 % de carga****Tabla 115.** Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 55 rpm y 30 % de carga

Tiempo	%Cloruro				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	1,35	1,20	0,00	0,00	0,00
10	0,21	0,07	0,00	0,00	0,00
20	0,50	0,21	0,00	0,00	0,00
30	1,06	0,92	0,71	0,50	0,28
40	0,92	0,85	0,78	0,64	0,43
50	0,78	0,64	1,13	1,06	0,50
60	0,64	0,57	0,92	0,78	0,50
120	0,64	0,50	0,85	0,71	0,64
180	0,64	0,57	0,57	0,50	0,64
240	0,57	0,64	0,64	0,57	0,64
300	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
360	0,64	0,71	0,71	0,64	0,57
420	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
480	0,71	0,64	0,57	0,50	0,50

**Tabla 116.** Índice de mezcla para 55 rpm del tornillo sin fin y 30 % de carga

Tiempo	$\bar{X}$	$\sum (X_i - \bar{X})^2$	Índice
0	0,00510	1,96E-04	0,07071
10	0,00057	3,40E-06	0,00932
20	0,00142	1,91E-05	0,02205
30	0,00694	3,95E-05	0,03174
40	0,00722	1,54E-05	0,01984
50	0,00822	2,97E-05	0,02754
60	0,00680	1,16E-05	0,01723
120	0,00666	6,62E-06	0,01300
180	0,00581	1,41E-06	0,00599
240	0,00609	6,03E-07	0,00392
300	0,00637	8,10E-12	0,00001
360	0,00652	1,41E-06	0,00599
420	0,00638	1,87E-12	0,00001
480	0,00581	3,42E-06	0,00934

**70 rpm y 50 % de capacidad****Tabla 117.** Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 70 rpm y 50 % de capacidad

Tiempo	%Cloruro				
	Sección A		Sección B		Sección C
	1	2	3	4	5
0	2,48	2,34	0,00	0,00	0,00
10	2,34	2,20	0,64	0,92	0,00
20	0,71	1,27	0,71	0,99	0,00
30	0,78	0,92	0,71	0,85	0,00
40	0,92	0,78	0,64	0,71	0,07
50	0,78	0,85	0,57	0,71	0,21
60	0,71	0,85	0,64	0,78	0,35
120	0,50	0,50	0,42	0,50	0,42
180	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
240	0,50	0,42	0,42	0,50	0,35
300	0,57	0,64	0,50	0,50	0,35
360	0,43	0,42	0,50	0,57	0,35
420	0,43	0,35	0,57	0,50	0,43
480	0,50	0,50	0,57	0,57	0,42

**Tabla 118.** Índice de mezcla para 70 rpm del tornillo sin fin y 50 % de carga

Tiempo	$\bar{X}$	$\sum (X_i - \bar{X})^2$	Índice
0	0,00963	6,97E-04	0,13331
10	0,01218	4,11E-04	0,10245
20	0,00736	8,98E-05	0,04787
30	0,00652	5,56E-05	0,03765
40	0,00623	4,25E-05	0,03293
50	0,00623	2,55E-05	0,02549
60	0,00665	1,46E-05	0,01932
120	0,00467	6,04E-07	0,00393
180	0,00496	1,33E-12	0,00001
240	0,00439	1,40E-06	0,00598
300	0,00510	4,41E-06	0,01061
360	0,00453	2,61E-06	0,00816
420	0,00453	2,61E-06	0,00816
480	0,00510	1,41E-06	0,00599

## ANEXO XIV

### Concentración del ión cloruro en ppm mediante método espectrofotométrico

**Tabla 119.** Concentración del ion cloruro en ppm analizados mediante el método  
espectrofotométrico

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NUCLEARES**  
**LABORATORIO DE AGUAS Y MICROBIOLOGIA**  
 Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte. Calle Ladrón de Guevara E11-253  
 Tel.: (00593-2)2 507144 Ext. 273. Telefax: (00593-2)2 567848. Apartado 17-01-2759  
 Quito - Ecuador



Quito, 27 de agosto de 2010

Nº de Informe: LAM/IR/2010/050  
Orden de Trabajo Nº: PG/17/I-01-044/10

#### Resultados de los análisis de cloruros

Identificación de las muestras	Cloruros (mg Cl/l)
1	221
11	122
16	84
6	2
9	2
19	4
21	78
28	70
29	12
31	59
36	67
39	28
41	74
46	68
49	35
51	54
56	53
59	40
61	65
66	70
71	41
76	60
79	47
81	66
86	50
89	54
91	56
96	58
99	55
103	55
106	62

NOTA: Para todos los ensayos físico-químicos se utilizan procedimientos internos debidamente documentados, los cuales, están basados en los Photometric Procedures descritos en el HACH Water Analysis Handbook 2ª Edición y en los métodos normalizados estándar Standard Methods 16th Edition APHA-AWWA-WPCF. Para la determinación del DQO y pH, se utiliza el procedimiento interno LAM/POE/20 y el método potenciométrico LAM/POE/34, los cuales se encuentran validados; la incertidumbre expandida calculada es 9.8 mg O<sub>2</sub>/l, y 0.189 con un k=2, respectivamente.

Informe de resultados del análisis físico-químico. Hoja 3 de 4

**Tabla 120.** Concentración del ion cloruro en ppm analizados mediante el método espectrofotométrico

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NUCLEARES**  
**LABORATORIO DE AGUAS Y MICROBIOLOGIA**

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte. Calle Ladrón de Guevara E11-253  
 Tel.: (00593-2)2 507144 Ext. 273. Telefax: (00593-2)2 567848. Apartado 17-01-2759  
 Quito - Ecuador

Quito, 27 de agosto de 2010

N° de Informe: LAM/IR/2010/050  
 Orden de Trabajo N°: PG/17/f-01-044/10

**Resultados de los análisis de cloruros**

Identificación de las muestras	Cloruros (mg Cl/l)
109	56
111	53
116	55
119	54
121	64
128	63
129	55
131	57
138	65
139	60

Técnico Responsable de los análisis: Srta. Nicole Ortiz

Firma: 

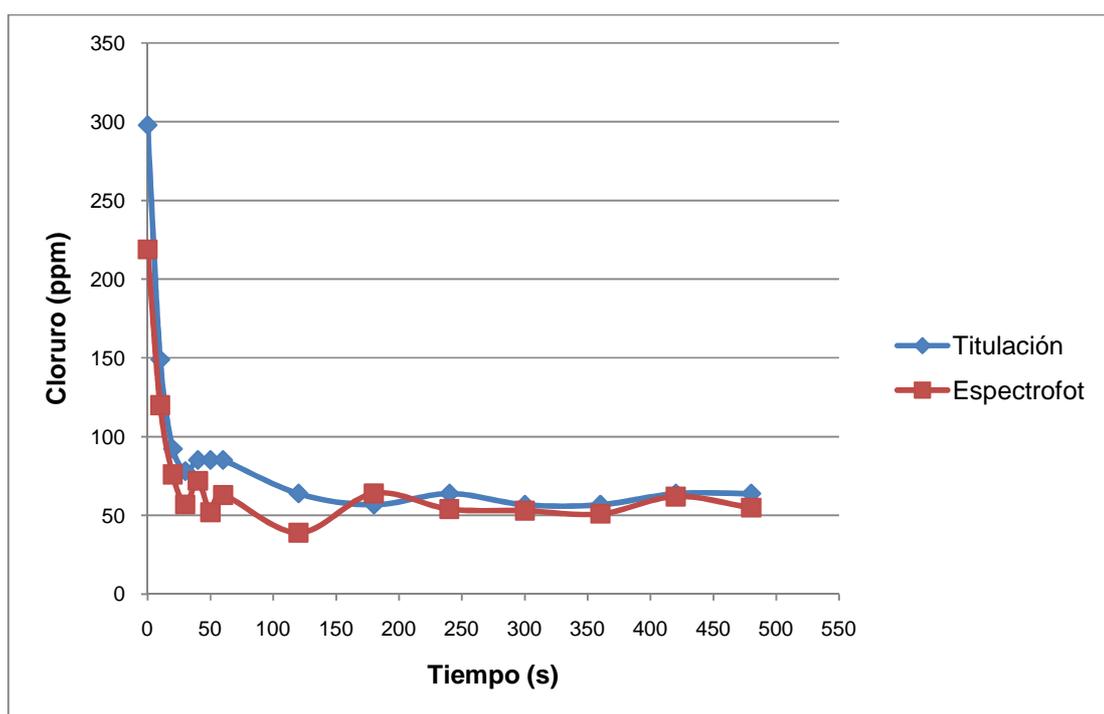
  
 Ing. Trajano Ramírez



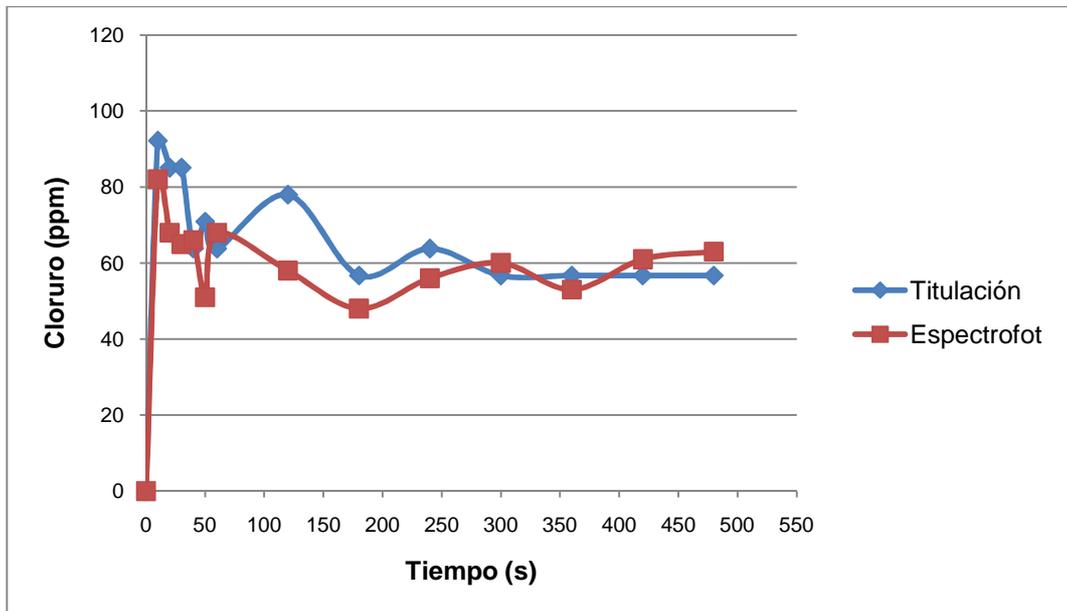
NOTA: Para todos los ensayos físico – químicos se utilizan procedimientos internos debidamente documentados, los cuales, están basados en los Photometric Procedures descritos en el HACH Water Analysis Handbook 2ª Edition y en los métodos normalizados estándar Standard Methods 16th Edition APHA-AWWA-WPCF. Para la determinación del DQO y pH, se utiliza el procedimiento interno LAM/POE/20 y el método potenciométrico LAM/POE/34, los cuales se encuentran validados; la incertidumbre expandida calculada es 9.8 mg O<sub>2</sub>/l, y 0.189 con un k=2, respectivamente.

Informe de resultados del análisis físico-químico. Hoja 4 de 4

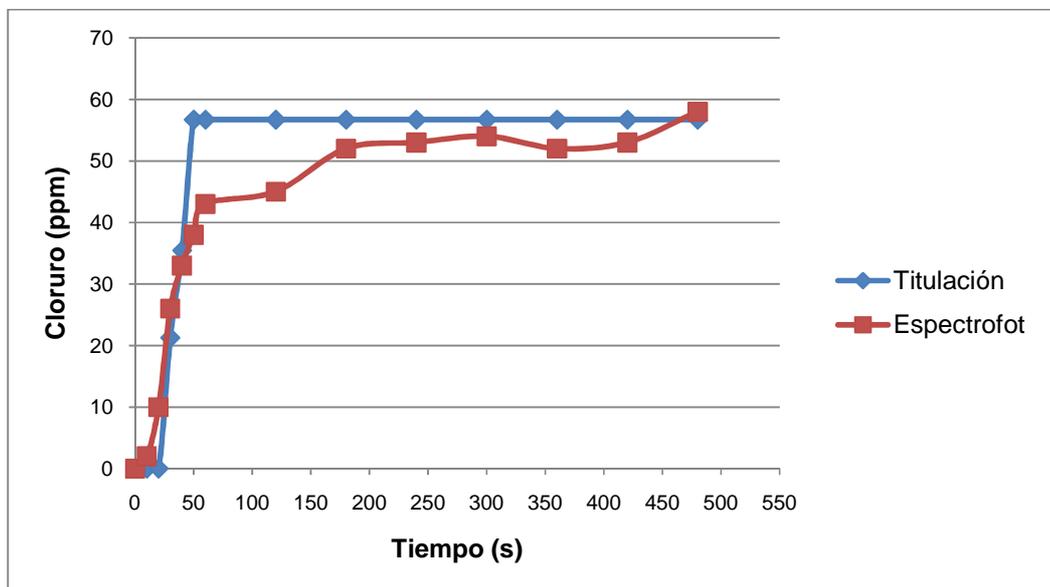
## ANEXO XV

**Comparación de la concentración del ión cloruro empleando el método de titulación con nitrato de plata y el método espectrofotométrico**

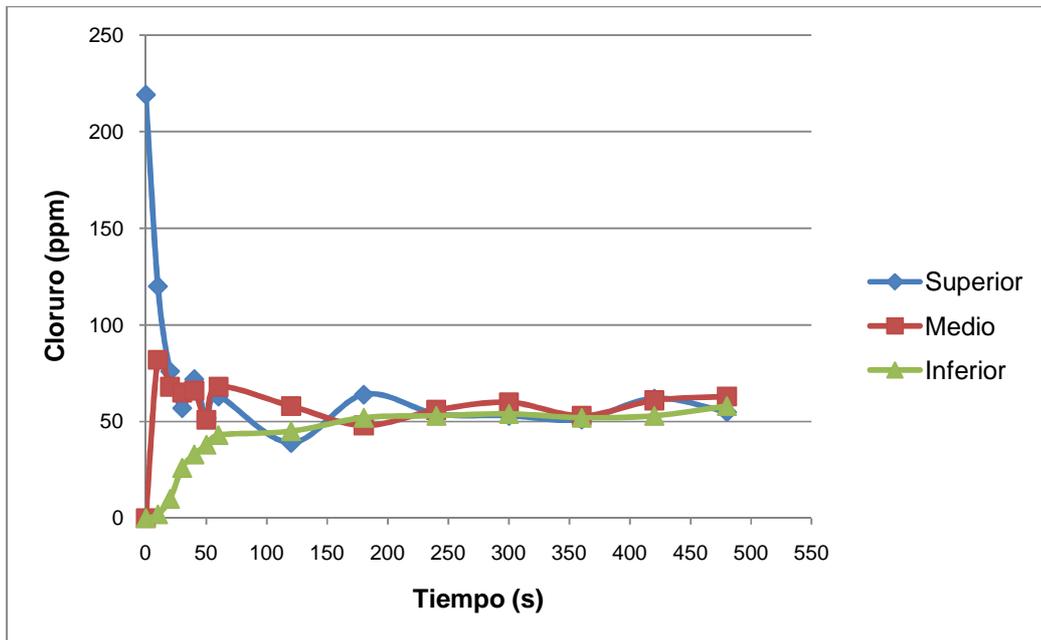
**Figura 43.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, para la sección superior del mezclador, analizado mediante titulación y espectrofotometría.



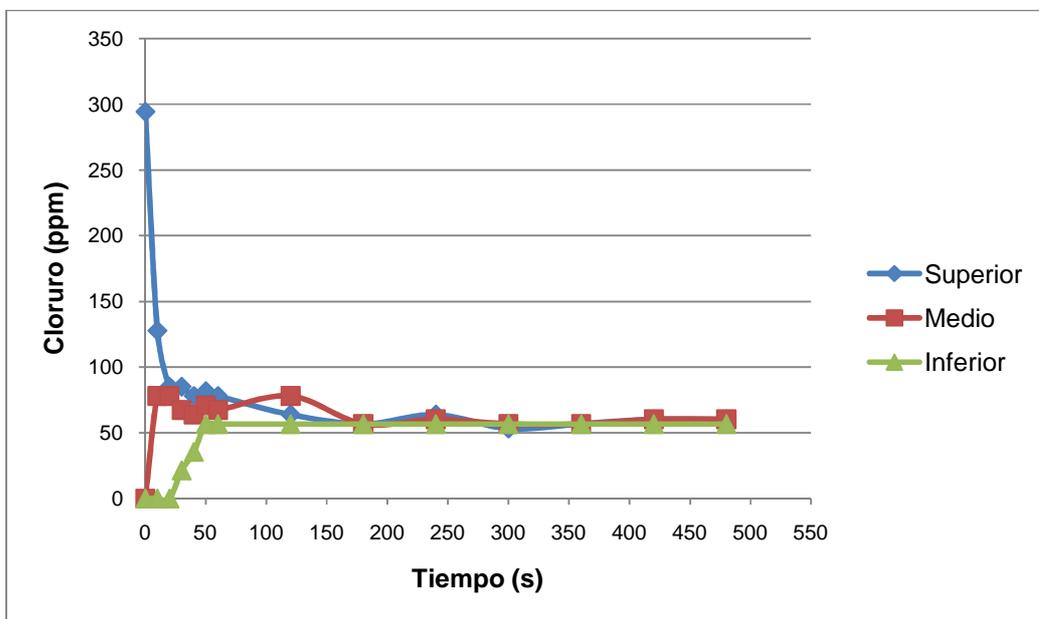
**Figura 44.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, para la sección media del mezclador, analizado mediante titulación y espectrofotometría.



**Figura 45.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, para la sección inferior del mezclador, analizado mediante titulación y espectrofotometría.



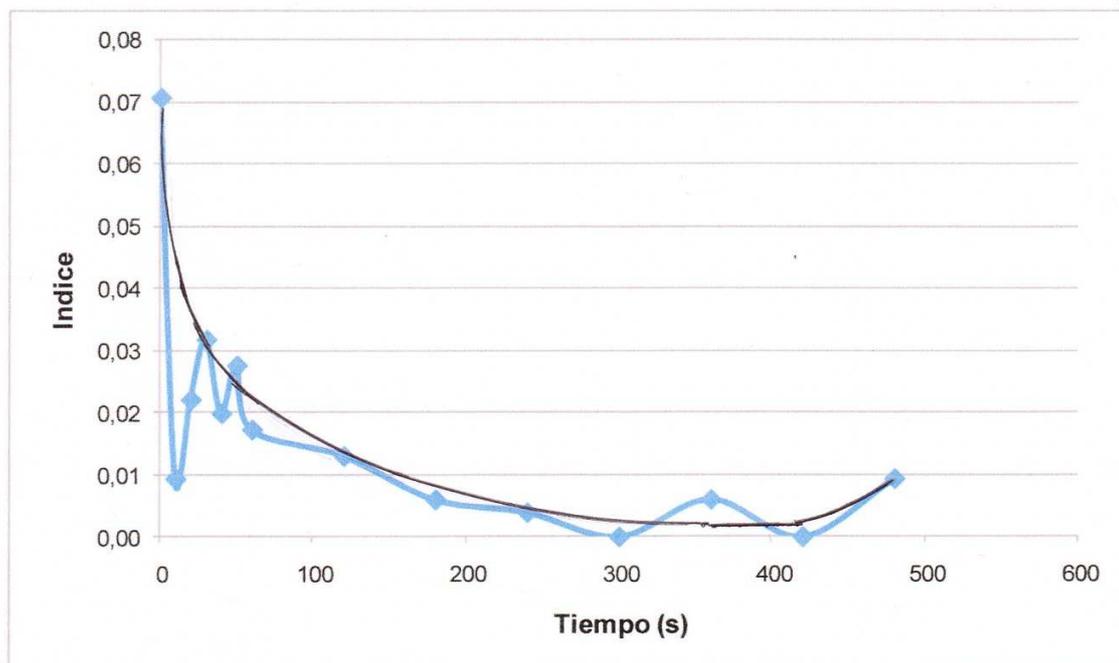
**Figura 46.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador, analizado mediante espectrofotometría



**Figura 47.** Variación de la concentración de Cloruro (ppm) a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de carga, en diferentes secciones del mezclador, analizado mediante titulación.

**ANEXO XVI**

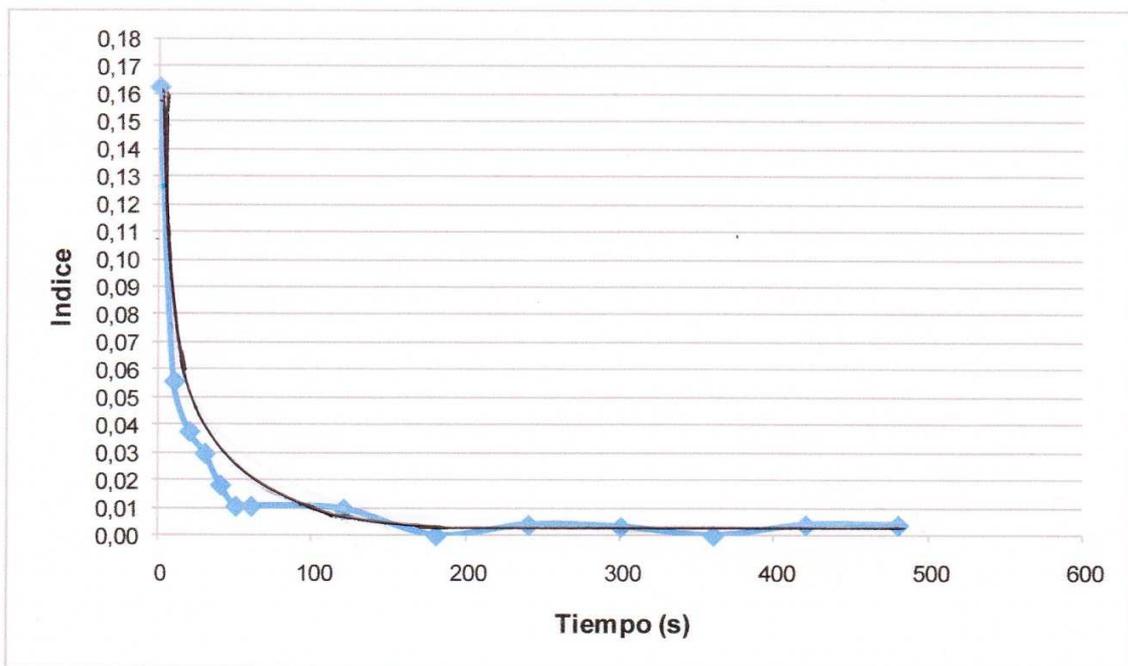
**Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 55 rpm y 30 % de carga**



**Figura 48.** Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 55 rpm y 30 % de carga

## ANEXO XVII

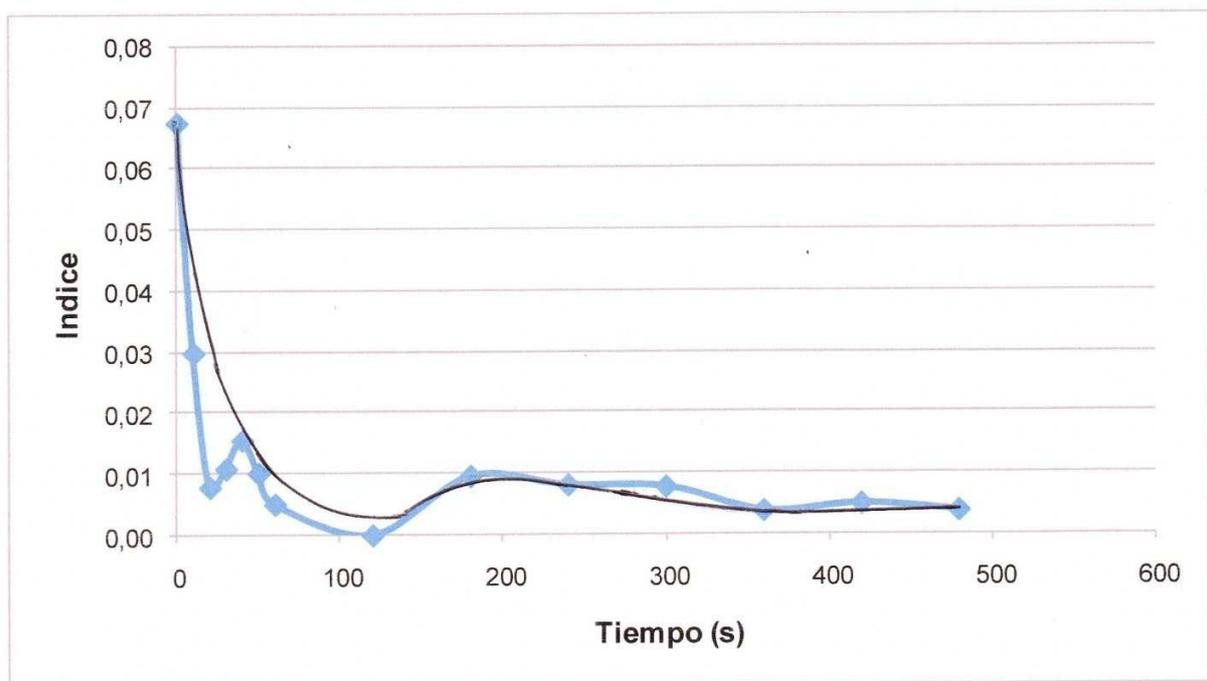
**Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 30 % de carga**



**Figura 49.** Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 30 % de carga

**ANEXO XVIII**

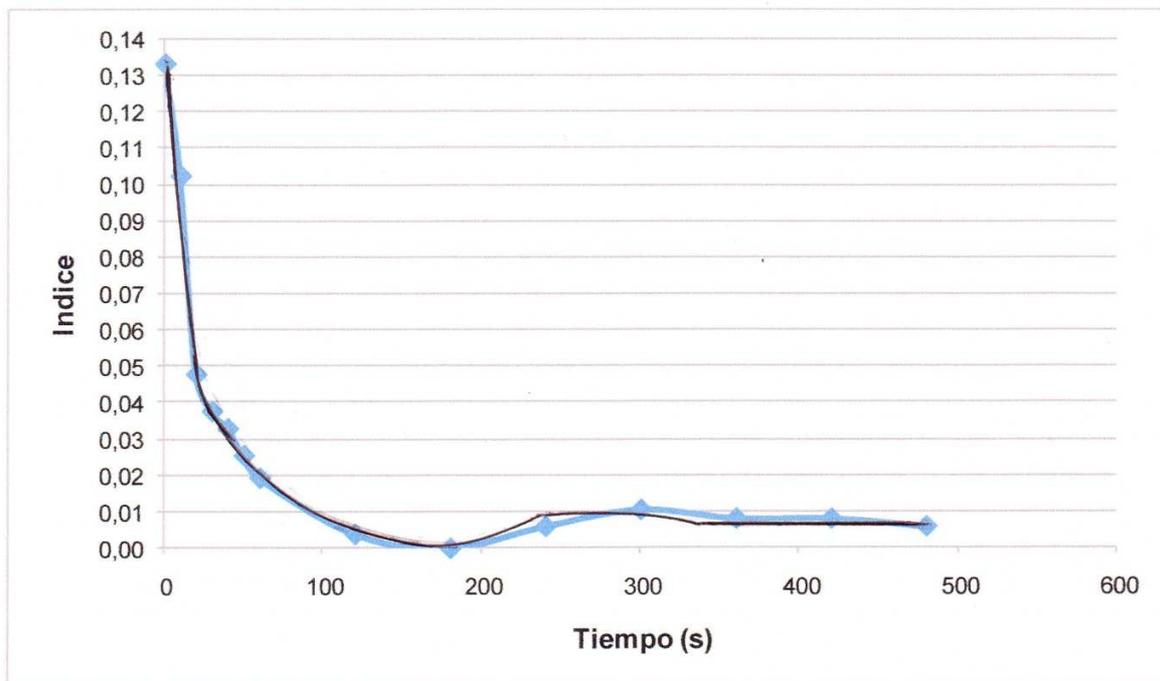
**Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 85 rpm y 30 % de carga**



**Figura 50.** Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 85 rpm y 30 % de carga

**ANEXO XIX**

**Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 50 % de carga**



**Figura 51.** Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 50 % de carga

## ANEXO XX

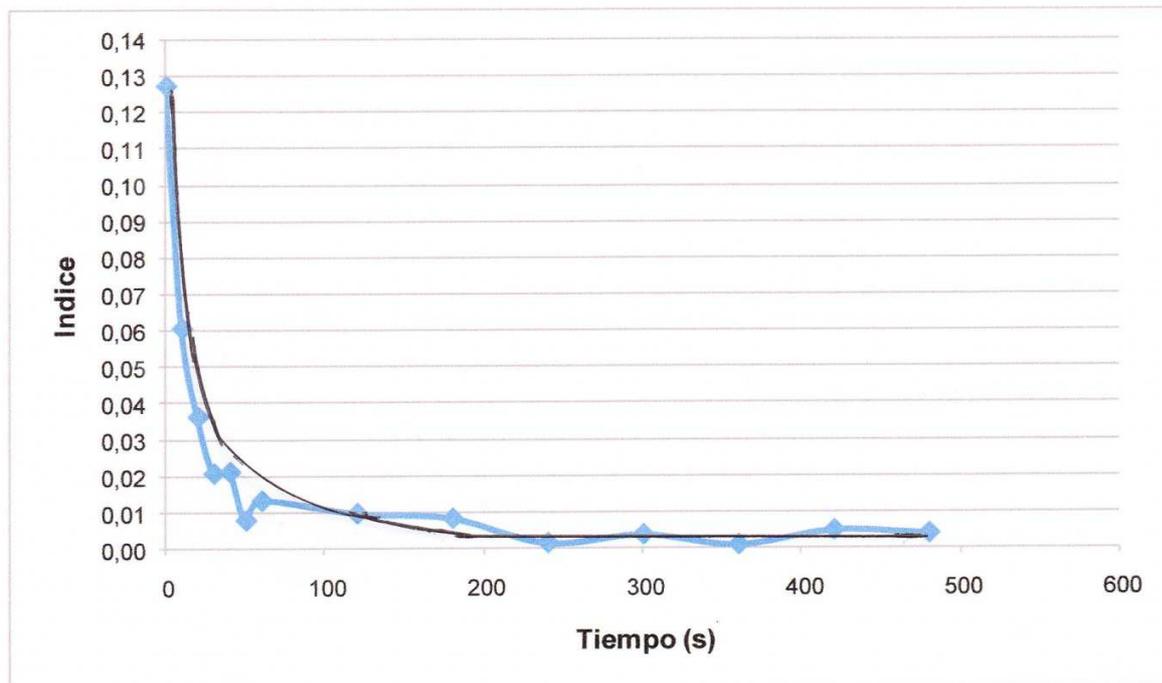
**Índice de mezclado para una velocidad de giro del tornillo sin fin para 70 rpm y 30 % de carga, datos analizados por el método espectrofotométrico.**

**Tabla 121.** Porcentaje de cloruro en cada muestra a diferentes tiempos para 70 rpm y 30 % de capacidad, analizados mediante método espectrofotométrico

	Cloruro %		
	Sección A	Sección B	Sección C
Tiempo	1	2	3
0	2,19	0,00	0,00
10	1,20	0,82	0,02
20	0,76	0,68	0,10
30	0,57	0,65	0,26
40	0,72	0,66	0,33
50	0,52	0,51	0,38
60	0,63	0,68	0,43
120	0,39	0,58	0,45
180	0,64	0,48	0,52
240	0,54	0,56	0,53
300	0,53	0,60	0,54
360	0,51	0,53	0,52
420	0,62	0,61	0,53
480	0,55	0,63	0,58

**Tabla 122.** Índice de mezcla por espectrofotometría para 70 rpm y 30 % carga

Tiempo	$\bar{X}$	$\sum (X_i - \bar{X})^2$	Índice
0	0,00963	3,19E-04	0,12759
10	0,01218	7,24E-05	0,06079
20	0,00736	2,59E-05	0,03635
30	0,00652	8,47E-06	0,02079
40	0,00623	8,81E-06	0,02119
50	0,00623	1,22E-06	0,00789
60	0,00665	3,49E-06	0,01334
120	0,00467	1,88E-06	0,00980
180	0,00496	1,38E-06	0,00840
240	0,00439	4,68E-08	0,00154
300	0,00510	2,85E-07	0,00381
360	0,00453	1,98E-08	0,00101
420	0,00453	4,84E-07	0,00497
480	0,00510	3,27E-07	0,00408

**Figura 52.** Tendencia de la curva con una velocidad de giro del tornillo sin fin de 70 rpm y 30 % de carga, analizado mediante espectrofotometría

## ANEXO XXI

### PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MEZCLADOR

Definidas las dimensiones del cono y las dimensiones del tornillo sin fin, se procedió a la construcción de los mismos, como se indica en la Figura 53 y Figura 54.



**Figura 53.** Recipiente cónico



**Figura 54.** Tornillo sin fin

Para la construcción del soporte del mezclador, se utilizó perfiles cuadrados de 5 cm x 5 cm, soldados de tal manera que permita un adecuado movimiento del elemento mezclador, como se observa en la Figura 55.



**Figura 55.** Soporte del mezclador

El elemento mezclador debe realizar dos movimientos simultáneos, movimiento planetario y un movimiento de rotación sobre su propio eje.

Para lograr el movimiento planetario, se utilizó un anillo dentado de diámetro interno 19 cm, con 86 dientes, como se observa en la Figura 56.



**Figura 56.** Anillo dentado

Respecto al movimiento de rotación sobre el propio eje, como se puede observar en la Figura 57, se utilizaron 3 rodamientos de 2,2 cm de diámetro interno, 4 piñones dentados con diámetro externo de 6,2 cm y diámetro interno de 2,2 cm, un eje de 2,2 cm de diámetro y una placa de soporte de 4 mm de espesor de 25 cm x 12 cm.



**Figura 57.** Mecanismo de movimiento

Para el movimiento de los mecanismos de mezclado, así como también el movimiento del tornillo sin fin, se utilizó un motor de 1/4 hp, trifásico con un voltaje de 220 voltios, el cual va sujeto a una placa de 25 cm x 12 cm, de 4 mm de espesor,

como se puede observar en la Figura 58. El movimiento es transmitido a través de una banda al eje del mezclador, el cual tiene un diámetro de 2,5 cm.



**Figura 58.** Fuerza motriz del mezclador

En la Figura 59 se puede observar el mezclador cónico vertical finalizado.



**Figura 59.** Mezclador cónico vertical

## ANEXO XXII

### GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Temperatura de descomposición:** Temperatura a la cual diferentes compuestos son susceptibles de degradación, generando variaciones en las propiedades mecánicas y químicas del material.

**Solubilidad:** Es una medida de la capacidad de una sustancia para disolverse en otra.

**Entalpía de formación:** Es la variación de entalpía de la reacción de formación de dicho compuesto a partir de las especies elementales que lo componen

**Velocidad de detonación:** Velocidad a la que la onda de detonación viaja a través de una columna de explosivos, medida en m/s.

**MASTER MIX:** Gelatina explosiva constituida por nitroglicerina, nitroglicol y nitrocelulosa.

**Antiaglomerante:** Aditivo empleado para recubrir los gránulos de nitrato de amonio con el fin de evitar la formación de grumos y la absorción de humedad.

**ANFO:** Nitrato de amonio/ Combustible (Ammonium Nitrate/Fuel Oil)  
Producto formado por la mezcla de nitrato de amonio y combustible

**Polimerización:** Proceso químico en el que los monómeros (compuestos de bajo peso molecular) se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso, llamada polímero.

**Densidad aparente:** Masa por unidad de volumen que refleja la densidad del producto, medido a granel sin compactar.

**Gravimetría:** Es un método cuantitativo analítico, se basa en la determinación de la cantidad de sustancia, midiendo el peso de la misma.