

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO ($MgSO_4$) USADO COMO
FERTILIZANTE EN HEBESTA S.A.S.

JEISY JULIETH DUEÑAS PARRA
GINA DANIELA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO ($MgSO_4$) USADO COMO
FERTILIZANTE EN HEBESTA S.A.S.

JEISY JULIETH DUEÑAS PARRA
GINA DANIELA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Iván Ramírez Marín
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Ing. Oscar Libardo Lombana Charfuelan
Jurado orientador.

Ing. Sandra Liliana Mesa
Jurado 1.

Ing. David triviño
Jurado 2.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de desarrollo y recursos humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la universidad de américa, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, la salud, la fortaleza, la sabiduría, por permitirme llegar a este punto y darme la oportunidad de culminar este objetivo tan anhelado en mi vida.

A mis padres, Juan Dueñas y Ana Cecilia Parra, por su apoyo incondicional, por ser mi guía, los mejores consejeros y mi mayor motivación, por el esfuerzo que hicieron para brindarme un estudio profesional, muchos de mis logros son gracias a ustedes, los amo.

A mi compañera y mejor amiga Daniela Rodríguez porque gracias al esfuerzo, paciencia y entusiasmo, logramos sacar este proyecto adelante y fortalecer los lazos de amistad, gracias por la confianza.

A todas esas personas que de una u otra forma brindaron un apoyo para el desarrollo de este proyecto.

Jeisy Julieth Dueñas Parra.

DEDICATORIA

Gracias a Dios y a la Virgen principalmente, quienes me han llenado de paciencia, sabiduría, fuerza y dedicación, para poder culminar este proceso y darme la oportunidad de abordar en el ámbito profesional.

A mis padres Lisander Rodríguez y Esperanza Martínez, porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible, por su apoyo incondicional y sus ganas de hacer de mí una excelente profesional y persona.

A mis hermanas quienes han sido mi ejemplo a seguir, mis fieles consejeras y las personas que siempre me tendieron la mano en las situaciones difíciles.

A mi compañera y mejor amiga Julieta Dueñas que gracias a su dedicación, entrega, tolerancia y confianza nos convertimos en “el equipo perfecto” para sacar este proyecto adelante.

A mis abuelos y amigos por su absoluto apoyo y por haber creído en mis capacidades como persona y futura ingeniera.

Y a todas aquellas personas que siempre tuvieron una palabra de aliento y que de alguna manera hicieron parte de este proceso, por ayudarme y guiarme para llevar a cabo la terminación de este trabajo de grado.

Gina Daniela Rodríguez Martínez

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a

La empresa HEBESTA S.A.S. y a su gerente la señora Claudia Bejarano, por brindarnos la oportunidad de desarrollar nuestro trabajo de grado, dándonos fácil acceso a las instalaciones de la planta y el apoyo moral y económico. A cada uno de los operarios y supervisores los cuales estuvieron involucrados en el desarrollo del proyecto.

A la familia Olaya Mora que desde un principio nos acogió y brindó su ayuda incondicional para llevar a cabo este proyecto.

A nuestro orientador Oscar Lombana por su tiempo, dedicación, apoyo y conocimiento para el desarrollo y culminación del proyecto.

A nuestro director y profesor el ingeniero químico Ivan Ramírez Marín quién nos apoyó, guio y brindó la confianza para realizar este proyecto.

A las personas que hacen parte del equipo de trabajo de los laboratorios de la universidad América por su colaboración en el desarrollo de las pruebas experimentales para llevar a cabo este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	21
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	24
1. MARCO TEÓRICO	25
1.1 FERTILIZANTE	25
1.2 PROPIEDADES DE LOS FERTILIZANTES	25
1.2.1 La higroscopicidad	25
1.2.2 Compactación	27
1.2.3 Distribución de la forma y el tamaño de las partículas	27
1.2.4 Dureza de las partículas y resistencia mecánica	27
1.2.5 Segregación	28
1.2.6 Tendencia a generar polvo y finos	28
1.2.7 Densidad aparente	28
1.2.8 Ángulo de reposo	29
1.2.9 Compatibilidad (física y química)	30
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS FERTILIZANTES	30
1.3.1 Según su tipo	30
1.4 SULFATO DE MAGNESIO (FERTILIZANTE)	30
1.5 FILOSOFÍA OPERACIONAL	31
2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL EN LA PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO EN HEBESTA S.A.S.	34
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	34
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL	34
2.2.1 Distribución en planta	35
2.2.2 Diagrama de bloques	36
2.2.3 Diagrama de flujo de proceso PFD	38
2.3 SEGUIMIENTO DE LAS MATERIAS PRIMAS	39
2.3.1 Ácido sulfúrico	39
2.3.2 Óxido de magnesio	41
2.3.3 Aguas madre	43
2.4 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN CADA UNA DE LAS ETAPAS DEL PROCESO	43
2.4.1 Reacción	43

2.4.2	Decantación	58
2.4.3	Cristalización	62
2.4.4	Centrifugación	68
2.4.5	Empaque	70
2.5	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL PRODUCTO TERMINADO	71
2.5.1	Densidad	72
2.5.2	Solubilidad	73
2.5.3	Granulometría	74
2.5.4	pH del sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	83
2.6	DIAGRAMA PARETO	84
2.6.1	Diagrama de Pareto para la etapa de reacción	85
2.6.2	Diagrama de Pareto para la etapa de decantación	86
2.6.3	Diagrama de Pareto para la etapa de cristalización	88
2.6.4	Diagrama de Pareto para la etapa de centrifugación	89
2.6.5	Diagrama de Pareto para la etapa de empaque	90
2.6.6	Diagrama de Pareto para el proceso de producción de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	90
3.	ALTERNATIVA(S) DE MEJORA PARA LA PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO (MgSO_4)	93
3.1	ALTERNATIVA DE MEJORA PARA LA ETAPA DE REACCIÓN	93
3.1.1	Réplica del proceso actual a nivel laboratorio	93
3.1.2	Desarrollo experimental	93
3.2	ALTERNATIVA DE MEJORA PARA LA ETAPA DE CRISTALIZACIÓN	97
3.2.1	Enchaquetamiento de las tinas de cristalización	97
3.2.2	Nucleación	98
4.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO (MgSO_4)	100
4.1	DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DONDE SE DETECTARON FALLAS IMPORTANTES APLICANDO LA ALTERNATIVA DE MEJORA PLANTEADA	100
4.1.1	Reacción	100
4.1.2	Cristalización	101
4.2	BALANCE DE MASA	101
4.2.1	Balance de masa en el reactor	102
4.2.2	Balance de Masa en el decantador	104
4.2.3	Balance de masa en la tina de cristalización	105
4.2.4	Balance de masa en la centrífuga	106
4.3	PFD	107
5.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA	109

5.1 COSTOS DE OPERACIÓN SIN PROPUESTA DE MEJORA	109
5.2 COSTOS DE OPERACIÓN CON PROPUESTA DE MEJORA	110
6. CONCLUSIONES	113
7. RECOMENDACIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	118

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Densidad aparente de algunos fertilizantes (IFC, 1998)	29
Tabla 2. Información de las corrientes del PFD	39
Tabla 3. Histórico del proveedor de ácido sulfúrico	40
Tabla 4. Resultados composición de Magnesio	42
Tabla 5. Etapas de adición óxido de magnesio (MgO)	49
Tabla 6. Peso de óxido de magnesio en la etapa 1 de adición (22 bultos)	49
Tabla 7. Peso de óxido de magnesio en la etapa 2 de adición	51
Tabla 8. Peso de óxido de magnesio en la etapa 3 de adición	51
Tabla 9. Peso y tiempo de duración en la adición de la etapa 4 de MgO	52
Tabla 10. Peso y tiempo de la etapa 5 de adición de Óxido de Magnesio	53
Tabla 11. Peso y tiempo de la etapa 6 de adición de Óxido de Magnesio	54
Tabla 12. Pesos moleculares de los compuestos	56
Tabla 13. Densidad en los tanques de decantación	61
Tabla 14. Constantes para el cálculo de Cp	66
Tabla 15. Ensayo de eficiencia de los ventiladores	68
Tabla 16. Características de las centrífugas	68
Tabla 17. Porcentaje de agua removida en la etapa de centrifugación	69
Tabla 18. Densidad aparente del producto terminado, muestra A	72
Tabla 19. Densidad aparente del producto terminado, muestra B	72
Tabla 20. Resultados solubilidad del Sulfato de Magnesio heptahidratado	73
Tabla 21. Resultados Tamizado lote A muestra 1	75
Tabla 22. Resultados Tamizado lote A muestra 2	76
Tabla 23. Resultados Tamizado lote B muestra 1	77
Tabla 24. Resultados Tamizado lote B muestra 2	78
Tabla 25. Diámetros promedio de las muestras A y B	83
Tabla 26. Resultado índice de acidez y alcalinidad	83
Tabla 27. Calificación para la elaboración del pareto	84
Tabla 28. Frecuencia de las fallas en la etapa de reacción	85
Tabla 29. Frecuencia de las fallas en la etapa de decantación	86
Tabla 30. Frecuencia de las fallas en la etapa de cristalización	88
Tabla 31. Frecuencia de las fallas en la etapa de centrifugación	89
Tabla 32. Frecuencia de las fallas en la etapa de empaque	90
Tabla 33. Frecuencia de las fallas del proceso de producción de MgSO ₄	91
Tabla 34. Réplica del proceso a nivel laboratorio	93
Tabla 35. Variables involucradas en el diseño de experimental	94
Tabla 36. Etapas de adición de óxido	94
Tabla 37. Resultados del desarrollo experimental	95
Tabla 38. Óxido de magnesio agregado en cada etapa	96

Tabla 39. Comparación patrón vs experimento seleccionado	97
Tabla 40. Modo de adición recomendado a nivel industrial	97
Tabla 41. Cantidad y tiempo de adición de MgO a nivel industrial	100
Tabla 42. Ecuaciones para desarrollo del balance de masa en el reactor	103
Tabla 43. Información de las corrientes del PFD	108
Tabla 45. Participación de los clientes en la producción anual	110
Tabla 49. Comparación indicadores financieros	111

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Concentración de ácido sulfúrico de enero a junio de 2018	41
Gráfica 2. Masa retenida por tamiz con respecto al diámetro de partícula, Muestra A-1	75
Gráfica 3. Masa retenida por tamiz con respecto al diámetro de partícula, Muestra A-2	76
Gráfica 4. Masa retenida por tamiz con respecto al diámetro de partícula, Muestra B-1	77
Gráfica 5. Masa retenida por tamiz con respecto al diámetro de partícula, Muestra B-2	78
Gráfica 6. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de reacción	85
Gráfica 7. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de decantación	87
Gráfica 8. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de cristalización	88
Gráfica 9. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de centrifugación	89
Gráfica 10. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de empaque	90
Gráfica 11. Diagrama de Pareto general para el proceso de producción de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	91

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Higroscopicidad, presión de vapor de agua	26
Figura 2. Ciclo de Deming	32
Figura 3. Proceso en línea	33
Figura 4. Distribución en planta HEBESTA S.A.S	35
Figura 5. Reactor Batch	44
Figura 6. Sistema de medición en el tanque	48
Figura 7. Adición óxido de Magnesio	54
Figura 8. Tanque decantador con fondo plano	59
Figura 9. Tanque decantador con fondo cónico	59
Figura 10. Tanque de decantación	60
Figura 11. Sulfato de magnesio sin biopolímero	61
Figura 12. Llenado de tanque decantador con solución turbia	62
Figura 13. Llenado de tanque decantador con solución clara	62
Figura 14. Dimensiones tinas de cristalización	65
Figura 15. Tina de cristalización	67
Figura 16. Operario en etapa de cristalización	67
Figura 17. Etapa de empaque	71
Figura 18. Sulfato de Magnesio empacado	71
Figura 19. Prueba tamizado Sulfato de Magnesio	74
Figura 20. Tina de cristalización enchaquetada	98
Figura 21. Nucleación	98
Figura 22. Representación gráfica del proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	102
Figura 23. Flujos del reactor	102
Figura 24. Flujos de tanque decantador	104
Figura 25. Flujos de tina de cristalización	105
Figura 26. Flujos de la centrífuga	106
Figura 27. Costos de fabricación con proyección a 5 años sin propuesta	109
Figura 28. Flujo de caja neto del proceso actual	110
Figura 29. Costos de fabricación con proyecto aplicando propuesta de mejora	111
Figura 30. Costos de producción e inversión para propuesta de mejora	111

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción de sulfato de magnesio heptahidratado	43
Ecuación 2. Conversión ° Baumé a g/cm ³	44
Ecuación 3. Volumen teórico tanque aguas madres	45
Ecuación 4. Caudal tanque de aguas madres	45
Ecuación 5. Área transversal de la tubería. (Aguas madre al decantador)	45
Ecuación 6. Velocidad del agua en el tramo	45
Ecuación 7. Volumen de diseño del tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico	46
Ecuación 8. Caudal tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico	46
Ecuación 9. Área transversal de tubería. (Tanque de almacenamiento dosificador)	46
Ecuación 10. Velocidad de ácido sulfúrico entre el tanque de almacenamiento y el dosificador	47
Ecuación 11. Volumen de diseño de tanque dosificador	47
Ecuación 12. Caudal tanque dosificador a reactor	47
Ecuación 13. Área transversal de tubería. (Dosificador a reactor)	47
Ecuación 14. Velocidad del ácido sulfúrico en el tramo del dosificador al reactor	48
Ecuación 15. Cálculo de producción de MgSO ₄ a partir de MgO	56
Ecuación 16. Cálculo de producción de MgSO ₄ a partir de H ₂ SO ₄	56
Ecuación 17. Reactivo en exceso que reacciona	57
Ecuación 18. Cantidad de reactivo en exceso que no reacciona	57
Ecuación 19. Volumen del reactor	58
Ecuación 20. Caudal reactor a tanques decantadores	58
Ecuación 21. Área transversal de tubería. (Reactor a decantadores)	58
Ecuación 22. Velocidad de la solución en el tramo	58
Ecuación 23. Volumen de diseño del tanque decantador	63
Ecuación 24. Caudal de tanque decantador a tina de cristalización	63
Ecuación 25. Área transversal de tubería. (Decantadores a tinas)	63
Ecuación 26. Velocidad de la solución en el tramo	63
Ecuación 27. Cantidad de calor que se pierde	64
Ecuación 28. Cálculo volumen en tinas de cristalización	65
Ecuación 29. Cálculo teórico de la solución de Sulfato de Magnesio en la tina de cristalización	65
Ecuación 30. Capacidad calorífica sulfato de Magnesio heptahidratado	65
Ecuación 31. Cálculo de RPM en 5 minutos para centrifuga de 150 kg	69
Ecuación 32. Cálculo del tiempo necesario para centrifugas de 125 kg	69
Ecuación 33. Cálculo del tiempo necesario para centrifuga de 50 kg	70

Ecuación 34. Densidad aparente	72
Ecuación 35. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra A-1	79
Ecuación 36. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra A-1	79
Ecuación 37. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra A-1	79
Ecuación 38. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra A-1	80
Ecuación 39. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra A-2	80
Ecuación 40. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra A-2	80
Ecuación 41. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra A-2	80
Ecuación 42. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra A-2	81
Ecuación 43. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra B-1	81
Ecuación 44. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra B-1	81
Ecuación 45. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra B-1	81
Ecuación 46. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra B-1	81
Ecuación 47. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra B-2	82
Ecuación 48. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra B-2	82
Ecuación 49. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra B-2	82
Ecuación 50. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra B-2	82
Ecuación 51. Ecuación general para el balance de masa en el reactor	103
Ecuación 52. Fracción de ácido sulfúrico de la corriente M_4	103
Ecuación 53. Fracción de óxido de magnesio de la corriente M_4	103
Ecuación 54. Fracción de agua de la corriente M_4	103
Ecuación 55. Fracción de sulfato de magnesio en la corriente M_4	104
Ecuación 56. Ecuación general para el balance en la decantación	104
Ecuación 57. Ecuación general para el balance de masa en la cristalización	105
Ecuación 58. Ecuación para el cálculo del flujo M_8	105
Ecuación 59. Cálculo de M_7	105
Ecuación 60. Balance general en la centrifugación	106
Ecuación 61. Cálculo corriente recirculada	106
Ecuación 62. Cálculo corriente de producto terminado	106
Ecuación 63. Tasa interna de oportunidad	112

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Diagrama de bloques	37
Diagrama 2. Diagrama de flujo de proceso PFD	38
Diagrama 3. Diagrama de flujo de proceso PFD con alternativas de mejora	107

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Concentración de ácido sulfúrico enero 5 de 2.018	119
Anexo 2. Concentración de ácido sulfúrico enero 17 de 2.018	119
Anexo 3. Concentración de ácido sulfúrico enero 25 de 2.018	120
Anexo 4. Concentración de ácido sulfúrico febrero 1 de 2.018	120
Anexo 5. Concentración de ácido sulfúrico febrero 7 de 2.018	120
Anexo 6. Concentración de ácido sulfúrico febrero 18 de 2.018	121
Anexo 7. Concentración de ácido sulfúrico febrero 21 de 2.018	121
Anexo 8. Concentración de ácido sulfúrico febrero 28 de 2.018	122
Anexo 9. Concentración de ácido sulfúrico marzo 5 de 2.018	122
Anexo 10. Concentración de ácido sulfúrico marzo 10 de 2.018	123
Anexo 11. Concentración de ácido sulfúrico marzo 19 de 2.018	123
Anexo 12. Concentración de ácido sulfúrico marzo 22 de 2.018	124
Anexo 13. Concentración de ácido sulfúrico abril 2 de 2.018	124
Anexo 14. Concentración de ácido sulfúrico abril 9 de 2.018	125
Anexo 15. Concentración de ácido sulfúrico abril 13 de 2.018	125
Anexo 16. Concentración de ácido sulfúrico abril 23 de 2.018	126
Anexo 17. Concentración de ácido sulfúrico mayo 10 de 2.018	126
Anexo 18. Concentración de ácido sulfúrico mayo 10 de 2.018	127
Anexo 19. Tabla de conversión masa a volumen de ácido sulfúrico	127
Anexo 20. Cálculo de flujo másico	127
Anexo 21. Fórmula para Ni	128
Anexo 22. Tabla para cálculo de diámetro aritmético muestra A-1	128
Anexo 23. Tabla para cálculo de diámetro aritmético muestra A-2	129
Anexo 24. Tabla para cálculo de diámetro aritmético muestra B-1	129
Anexo 25. Tabla para cálculo de diámetro aritmético muestra B-2	130
Anexo 26. Cálculo corriente 8	130
Anexo 27. Cálculo corriente 9	130
Anexo 28. Cálculo corriente 7	130
Anexo 29. Proyección inflación anual (precio consumidor) Colombia	131

GLOSARIO

ESCALA BAUME: es una escala usada en la medición de las concentraciones de soluciones acuosas. Originalmente, la escala se basa en la salinidad y la salmuera¹.

FERTILIZANTE QUÍMICO: producto de origen sintético que suministra uno o varios elementos esenciales para las plantas. Incluye fertilizantes edáficos simples y compuestos, fertilizantes foliares, escorias Thomas, fertilizantes inorgánicos naturales, abonos orgánicos reforzados y otros afines.²

NUCLEACIÓN: formación de un núcleo sobre el que pueda comenzar a crecer el cristal.³

pH: indica el grado de acidez o basicidad de una solución, éste se mide por la concentración del ión hidrógeno; los valores de pH están comprendidos en una escala de 0 a 14.⁴

PUREZA DE LA SAL: porcentaje de sustancia pura anhidra o hidratada contenida en la sal.⁵

SOLUBILIDAD: gramos de sustancia pura anhidra que se pueden disolver en 100 g de agua destilada a una temperatura indicada.⁶

SULFATO DE MAGNESIO: cristal incoloro, neutro soluble en agua obtenido a partir de la reacción del ácido sulfúrico sobre óxidos, hidróxidos y minerales aportantes de Magnesio. La forma natural de la sal es la heptahidratada (epsonita)⁷

¹ GALEANO CARRILLO, W. Grados baume. s.f. p. 1.

² INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Normas del ICA en materia de insumos agrícolas. s.f. p. 5.

³ GOKEL, G. Química orgánica experimental. 2007. p. 67.

⁴ QUÍMICA general: Definición de pH. 2018. p. 47

⁵ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC164: Fertilizantes. Sulfato de Magnesio. 2007. p. 2.

⁶ Ibid., p. 2.

⁷ Ibid., p. 2.

RESUMEN

En el siguiente trabajo de grado se desarrolló una propuesta de mejora para la producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en la empresa HEBESTA S.A.S. para ser usado como fertilizante pues muestra deficiencia en la dosificación, el uso en exceso o falta de las materias primas y en el producto final, debido a que el procedimiento se realiza de forma empírica y manualmente. Se realizó un diagnóstico total del proceso de producción, en el cuál se evaluó la calidad de la materia prima utilizada y del producto final, a partir de la evaluación de las principales propiedades de un fertilizante, tales como la solubilidad, granulometría, densidad y ph, se evaluó el estado actual de los equipos, las tareas que realiza cada operario en cada una de las etapas que componen el proceso de producción (reacción, decantación, cristalización, centrifugación y empaque) y así mismo el desarrollo en cada una de éstas, luego del diagnóstico se identificaron las principales fallas a partir de un diagrama de Pareto.

Para la selección de la alternativa de mejora se realizó un desarrollo experimental, teniendo como variable el número de etapas de adición de óxido de Magnesio (MgO) y la disminución en la producción de lodos, pues con esto se aumenta la producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en un 17,34% con respecto a la producción actual.

Para establecer las especificaciones técnicas del proceso, se elaboró un balance de masa, el diagrama de flujo de proceso correspondiente, la filosofía operacional y finalmente la descripción detallada del proceso, todo esto se realiza teniendo en cuenta las alternativas de mejora planteadas.

Por último, se realizó un análisis comparativo de costos de producción entre el proceso actual y el proceso con la propuesta de mejora, los cuales se proyectaron a cinco (5) años, estableciendo el VP, la TIO y el CAUE, donde se obtuvo un ahorro de \$75.749.678 en los costos de producción partiendo de esto se evaluó la viabilidad de la propuesta de mejora.

PALABRAS CLAVE: fertilizante, sulfato de magnesio, pH, cristalización, reacción.

INTRODUCCIÓN

HEBESTA S.A.S. es una empresa dedicada a la producción y distribución de Sulfato de Magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y Nitrato de Magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$) usados como fertilizantes, son fabricados en la planta industrial ubicada en Tenjo - Cundinamarca. La empresa incursionó en la industria química en el año de 1.996 y desde entonces estos fertilizantes son utilizados en la gran mayoría de los cultivos de flores de la sabana de Bogotá.

Este proyecto se enfoca en la producción del sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), pues este cuenta con un proceso empírico y el tiempo de producción es bastante prolongado, se lleva a cabo para dar una solución viable a las falencias identificadas en el diagnóstico desarrollado en el segundo capítulo, para lo cual se hizo un seguimiento al óxido de magnesio (MgO) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4) usados como materia prima, se evaluaron cada una de las etapas de producción que conforman el proceso, así mismo se evaluaron las propiedades del producto terminado, verificando el cumplimiento de los parámetros establecidos por la norma NTC164 (Fertilizante sulfato de magnesio), y por Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (FDC).

Lo anterior se realiza con el fin de proponer alternativas útiles, teniendo en cuenta el estado actual de la empresa y las condiciones con las que esta cuenta, es por esto que en el tercer capítulo se realiza un desarrollo experimental para resolver las falencias detectadas, pues una adecuada solución a las problemáticas de la empresa identificadas en las etapas de reacción y cristalización del proceso, genera oportunidades de crecimiento en la industria química, pues un proceso limpio, eficiente y de calidad es más rentable y confiable para los clientes de HEBESTA S.A.S.

Después de haber planteado y desarrollado los experimentos correspondientes para las posibles alternativas de mejora en las etapas de reacción y cristalización, en el cuarto capítulo se desarrollaron las especificaciones técnicas donde se evidencia de forma detallada la aplicación de las alternativas de mejora dentro de la empresa a partir de diagramas de flujo, de bloque, un balance de masa y un resumen detallado del adecuado manejo operacional en las etapas donde se implementaron las alternativas de mejora.

Finalmente, en el último capítulo se realizó un análisis comparativo de costos de producción con alternativa de mejor y sin ella, realizando una proyección a cinco (5) años, calculando el valor presente neto (VP), la tasa interna de retorno (TIR) y el costo anual uniforme equivalente (CAUE) de esta manera se analizó la viabilidad de la implementación de la propuesta.

La importancia del presente trabajo de grado es dar una visión diferente a la empresa desde la ingeniería química aplicada en este proceso, pues no han contado con la presencia de un ingeniero químico en planta, que determine las fallas en la elaboración del producto. Así mismo el crecimiento a nivel investigativo y personal de los autores, pues genera nuevos conocimientos y desarrolla competencias para la solución de problemas en la industria.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora para el proceso de producción de sulfato de magnesio (MgSO_4) usado como fertilizante en HEBESTA S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el proceso actual en la producción de sulfato de magnesio en HEBESTA S.A.S.
- Establecer alternativa(s) de mejora para la producción de sulfato de magnesio (MgSO_4).
- Establecer las especificaciones técnicas del proceso de producción de sulfato de magnesio (MgSO_4).
- Realizar un análisis comparativo de costos de la propuesta de mejora.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los conceptos principales que se deben considerar para contextualizar el contenido del trabajo. Los conceptos están relacionados con directamente con la industria de fertilizantes y la terminología común utilizada por HEBESTA S.A.S. en el proceso de producción de Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$).

1.1 FERTILIZANTE

Se entiende por fertilizante (abono) todo material orgánico, o inorgánico, cuya función principal es proporcionar elementos nutrientes a las plantas, capaces de mejorar su crecimiento en un momento dado, bien porque no existen o porque se han agotado con el tiempo. Junto a este aporte de nutrientes, el fertilizante tiene como misión un aumento de la producción y una mejora de su calidad.⁸

1.2 PROPIEDADES DE LOS FERTILIZANTES

Las propiedades más importantes para la manipulación, el almacenamiento y la aplicación son:

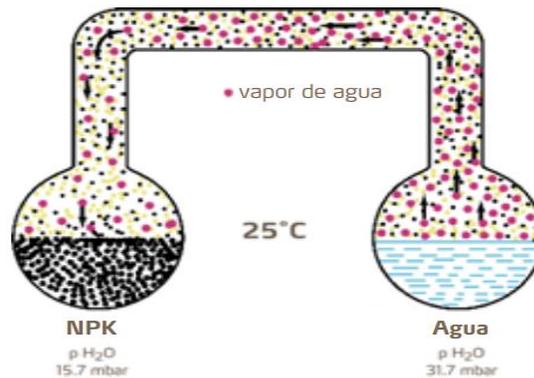
- La higroscopicidad.
- Compactación.
- Distribución de la forma y el tamaño de las partículas.
- Dureza de las partículas y resistencia mecánica.
- Segregación.
- Tendencia a generar polvo y finos.
- Densidad aparente.
- Ángulo de reposo.
- Compatibilidad (química y física).

1.2.1 La higroscopicidad. El aire contiene humedad como vapor de agua y por lo tanto ejerce una presión de vapor de agua que es determinada por la humedad y la temperatura, por lo general el aire caliente contiene más agua que el aire frío, dicho contenido de agua es expresado por la humedad relativa.

El vapor de agua se desplaza hacia donde la presión de vapor es más baja.

⁸ NAVARRO, Gina y NAVARRO, Simón. Fertilizantes: química y acción. Ediciones Mundi- prensa. Madrid. 2014. p. 46.

Figura 1. Higroscopicidad, presión de vapor de agua.



Fuente: YARA. Nutrición vegetal. Almacenaje y manejo de fertilizantes. s.f.

La presión de vapor de agua del aire varía con la humedad y la temperatura del aire, esto tiene un gran impacto en la calidad del fertilizante desprotegido almacenado a granel.

Los fertilizantes empiezan a absorber la humedad a una humedad específica o a cierta presión de vapor de agua. La absorción de agua se produce si la presión de vapor de agua del aire excede la presión de vapor de agua del fertilizante. Al conocer la temperatura y la humedad del aire y la temperatura de la superficie del fertilizante, se puede determinar si la absorción del agua tendrá lugar o no.

Cuando el fertilizante absorbe agua significativamente puede presentar alteraciones no deseadas en el producto, por ejemplo:

- Las partículas se tornan suaves y pegajosas gradualmente.
- La tendencia a la compactación se incrementa.
- La formación de polvo y finos aumenta.
- Los pisos de las bodegas se vuelven húmedos y resbaladizos.
- La calidad de la aplicación se ve afectada.
- Dificultades de operación.

Es importante tener en cuenta que la higroscopicidad es una propiedad importante que permite a las partículas de fertilizante disolverse rápidamente en el suelo y por lo tanto suministra fácilmente los nutrientes a las plantas luego de la aplicación del fertilizante.⁹

⁹ YARA. Propiedades físicas de los fertilizantes. Mayo, 2016. p. 5.

1.2.2 Compactación. Durante el período comprendido entre su producción y la aplicación, los fertilizantes deben ser almacenados a granel o en empaques. El período de almacenamiento varía considerablemente, desde menos de un mes hasta un año o más. Es esencial que durante este período el material fertilizante permanezca completamente suelto o, cuando más, que la compactación o tendencia a atorrónarse sea tan mínima, que con el manejo o manipulación normal del fertilizante se restituya la condición suelta original.

Para la mayoría de estos fertilizantes, las causas de dicho fenómeno son el desarrollo de enlaces cristalinos entre las partículas o gránulos del material. Estos enlaces se desarrollan durante el período de almacenamiento, tanto como resultado de reacciones químicas internas, como por efectos térmicos que producen la precipitación de cristales a partir de pequeñas cantidades de soluciones salinas presentes en el material fertilizante.¹⁰

1.2.3 Distribución de la forma y el tamaño de las partículas. La determinación del tamaño de partículas y su distribución es importante y es aplicada con frecuencia en los análisis de rutina por los laboratorios de control de calidad de las industrias productoras de fertilizantes. Pero, su importancia varía de un producto a otro. Los abonos con muy baja solubilidad en agua deben tener un tamaño de partícula fino para asegurar la disolución en el suelo.

La importancia del tamaño de partícula en los fertilizantes de alta solubilidad radica en el hecho de que la tasa de disolución, está relacionada inversamente con el tamaño del gránulo, lo cual es clave cuando se trata de fabricar fertilizantes de lenta liberación. Por otra parte, se ha demostrado que un tamaño de partícula superior a 5 mm conduce a una mejor eficiencia de los fertilizantes fosfatados de alta solubilidad. Sin embargo, el efecto de la granulometría sobre el aprovechamiento de los fertilizantes hidrosolubles es muy variable y depende de factores múltiples como las características del suelo, especie cultivada, naturaleza los fertilizantes y tecnología utilizada para su aplicación.¹¹

1.2.4 Dureza de las partículas y resistencia mecánica. *Resistencia a la compresión de los fertilizantes:* La resistencia a la compresión de las partículas de los fertilizantes varía ampliamente dependiendo de la composición química y del proceso de producción. La absorción de agua tiene efectos negativos en la mayoría de fertilizantes, las partículas se pueden tornar pegajosas o tender a desintegrarse.

¹⁰ GUERRERO RIASCOS, Ricardo. Manual técnico; Propiedades generales de los fertilizantes. Abonos nutrimon. s.f. p. 23

¹¹ NAVARRO, Gina; NAVARRO, Simón. Fertilizantes: química y acción. Ediciones Mundi- prensa. Madrid. 2014. p. 51.

La resistencia mecánica es la habilidad del fertilizante a tolerar las tensiones impuestas sobre ellos en la cadena de manejo, la resistencia mecánica depende de la estructura de la superficie y la dureza de la partícula.

1.2.5 Segregación. La segregación ocurre cuando las partículas o gránulos individuales de un fertilizante difieren en propiedades físicas, en grado tal, que responden diferentemente a las alteraciones mecánicas causadas durante los procesos de manejo, almacenamiento y transporte de los fertilizantes. Como resultado, las partículas de propiedades físicas similares tienden a congregarse y, por consiguiente, a eliminar la homogeneidad de la mezcla fertilizante. Si todas las partículas de un fertilizante fueran físicamente idénticas, ningún nivel de manejo afectaría su homogeneidad. Se ha demostrado que la característica física que más influye sobre la tendencia a la segregación es el tamaño de partícula. Las partículas de tamaños diferentes tienden a segregarse.¹²

1.2.6 Tendencia a generar polvo y finos. Una gran cantidad de polvo de fertilizante puede causar molestias en el lugar de trabajo. Por lo tanto, en la mayoría de los países, las emisiones de polvo por las operaciones de manejo son restringidas por ley; ya que pueden tener un impacto negativo en la salud y en el ambiente¹³. Normalmente este fenómeno ocurre por los siguientes factores:

- Absorción de agua.
- Estructura de superficie débil y baja dureza de partículas.
- Baja resistencia mecánica.
- Tensiones mecánicas en la cadena de manipulación.

1.2.7 Densidad aparente. Se puede definir la densidad aparente como el peso del producto por unidad de volumen a granel. Esta característica es importante para determinar el tamaño de los empaques, determinar la capacidad de almacenamiento en bodegas o de vehículos de transporte, así como para la calibración de dosificadores volumétricos de abono.¹⁴

¹² MOREL, Pablo. Tecnología de los fertilizantes. Editorial Pablo Morel, Santiago de Chile. s.f. p. 12

¹³ GUERRERO RIASCOS, Ricardo. Fertilización de cultivos en clima frío. Monómeros Colombo Venezolanos. 1998. p. 127.

¹⁴ Ibid., p. 23

Tabla 1. Densidad aparente de algunos fertilizantes (IFC, 1998)

Fertilizantes	Densidad aparente (Kg/m ³)
Productos no granulados	
Roca fosfórica	1.440
Superfosfato simple	1.040
Superfosfato triple	1.140
Cal agrícola	1.400
Sulfato amónico	1.020
Cloruro potásico	1.170
Productos granulados	
Nitrato amónico prill	720
Urea prill	740
Sulfato amónico	1.035
Superfosfato simple	1.120
Superfosfato triple	1.120
Fosfato diamónico	1.000
Fosfato monoamónico	1.000
Cloruro potásico	1.040
Sulfato potásico	1.180
Sulfato doble de potasio y Magnesio	1.545

Fuente: Fertilizantes: química y acción. 2014.

1.2.8 Ángulo de reposo. El ángulo de reposo está influenciado por el tamaño, forma, volumen, superficie del grano, contenido de humedad y orientación de las partículas que conforman la masa del grano. El ángulo de reposo varía con el contenido de humedad debido a la lámina superficial de humedad que rodea a cada partícula y a los efectos de la tensión superficial que predomina sobre los productos. Existen dos tipos de ángulo de reposo:

- Ángulo de reposo estático.
- Ángulo de reposo dinámico.

Es el más importante y se presenta en todos los casos en que la masa granular se encuentra en movimiento, como en las operaciones de cargue y descargue de un silo, una bodega o una máquina. El ángulo de reposo es un indicador útil para saber la fluidez del fertilizante. Entre menor sea el ángulo de reposo más fácil se desliza, sin riesgo de impacto.¹⁵

¹⁵ OSPINA, J. Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Universidad Nacional de Colombia. p. 87.

1.2.9 Compatibilidad (física y química). La compatibilidad se relaciona principalmente con la mezcla de diferentes fertilizantes y la contaminación cruzada en la manipulación. Si no se tiene en cuenta, puede resultar en problemas de calidad o de seguridad; por ejemplo, apelmazamiento, debilitación, formación de polvo y pérdida de resistencia a los ciclos térmicos en el caso del nitrato de amonio.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS FERTILIZANTES

1.3.1 Según su tipo

- Fertilizantes químicos: Son nutrimentos hechos por el hombre generalmente de origen mineral, animal, vegetal o sintético.
- Fertilizante químico-inorgánico: De origen mineral, extraído de la tierra (nitrato), o químico. Ordinariamente es de acción rápida, y provoca el crecimiento y fortalecimiento de las plantas cuando se emplean sobre su superficie.¹⁶

1.3.1.1 Fertilizantes orgánicos o abonos. Pueden ser de origen mineral, vegetal, animal o mixto. Se obtienen a partir de procesos naturales en donde la mano del hombre no interviene, o lo hace escasamente. De estos, las plantas logran significativas cantidades de nutrientes, y se conocen desde tiempos ancestrales.¹⁷

1.3.1.2 Fertilizantes inorgánicos. Estos fertilizantes son creados por el hombre y aportan más nutrientes que los fertilizantes orgánicos. Estos nutrientes principales son cantidades concentradas de nitrógeno, potasio y fósforo.¹⁸

1.4 SULFATO DE MAGNESIO (FERTILIZANTE)

El sulfato de Magnesio heptahidratado es un fertilizante soluble perteneciente al grupo de fertilizantes sulfatados, muy utilizado en la agricultura y jardinería; se emplea como corrector de la deficiencia de magnesio en el suelo, el magnesio es el quinto macro elemento en orden de importancia para la nutrición de las plantas, constituye el átomo central de la clorofila, siendo por lo tanto un elemento indispensable para la realización de la fotosíntesis y la vida vegetal; interviene en la absorción y la migración del fósforo. La deficiencia del magnesio se traduce en el descenso del rendimiento potencial, en clorosis y necrosis del tejido vegetal y grandes defoliaciones.¹⁹

¹⁶ FLORES. Fertilizantes. [en línea]. (s.f.). Disponible en: <https://www.flores.ninja/fertilizantes/>

¹⁷ ROJAS, Manuel. De la vida de las plantas y de los hombres. Fondo de cultura económica USA. 2002. p. 47.

¹⁸ WALTER, A. Agricultura industrial y transnacionalización en América Latina. Universidad Autónoma de la Ciudad de México. 2005.

¹⁹ ARIS. Sulfato de Magnesio Heptahidratado. s.f. Lima, Perú.

1.5 FILOSOFÍA OPERACIONAL

Con el fin de trazar una secuencia cronológica del paso a paso requerido para el buen manejo y el desempeño en las etapas de producción en HEBESTA S.A.S. se plantea la siguiente filosofía operacional, donde la empresa tiene la libre decisión de su aplicación. Para lograr un buen desempeño y ambiente laboral se recomienda a todo el equipo de trabajo de HEBESTA S.A.S que:

- La empresa deberá enfocarse en el desarrollo de sus procesos y asumir que los resultados económicos vendrán después, puesto que la opinión del cliente es primordial a la hora de dar el visto bueno de la calidad del producto terminado²⁰.
- Para mejorar cada una de las etapas desarrolladas dentro de la empresa el grupo de operarios y administrativos deben entender las prelacións de esta y aplicarlas a su día a día laboral²¹.
- Debe trabajar de forma más inteligente y ver en cada falla una nueva oportunidad de mejora continua, para el que el crecimiento sea global, tanto personal como empresarial²².

Con el objetivo de aplicar una buena filosofía operacional en esta empresa se busca aplicar el método de KAIZEN, que es un sistema de mejora continua e integral que comprende todos los elementos, componentes, procesos, actividades, productos e individuos de la organización, que tiene como lema “Hoy mejor que ayer, mañana mejor que hoy”.

Para una buena aplicación de este sistema se debe conocer lo que se busca lograr con su desarrollo y tiene como objetivos los siguientes:

- Mejorar la productividad de cualquier área escogida de la empresa.
- Eliminación de desperdicios.
- Reducción de costos.
- Mejoramiento continuo gradual y ordenado.

Puesto que este es un sistema japonés creado después de la segunda guerra mundial se fundamenta en las 5S más conocidas en la gerencia empresarial, que se pueden ver a continuación²³:

²⁰ GONZÁLEZ Daniel. Diseño y selección de procesos. Facultad de ciencias económicas y sociales.s.f. p.2

²¹ Ibid., p.2

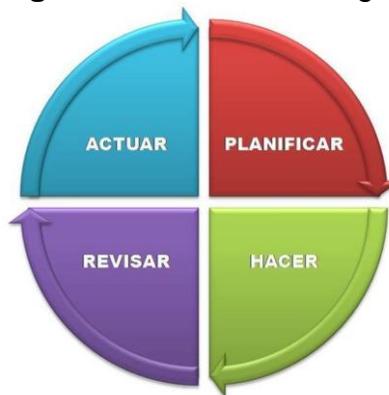
²² Ibid., p.2

²³ LAREAU William. Office Kaizen: Como controlar y reducir los costes de gestión en la empresa. s.f.p. 20.

- **SEIRI:** Consiste en retirar del área o zona de trabajo, todos aquellos elementos que no son necesarios para realizar la labor, ya sea en áreas de producción o en las administrativas.
- **SEITON:** Es el modo ordenado de los elementos necesarios de manera que resulten de fácil uso y acceso, los cuales deberán ser etiquetados cada uno para que se encuentren, retiren y devuelvan a su posición.
- **SEISO:** Incluye el diseño de aplicaciones que permitan evitar o al menos disminuir la suciedad y hacer más seguros los ambientes de trabajo.
- **SEIKETSU:** Pretende mantener el estado de limpieza y organización, solo se obtiene cuando se trabaja continuamente en los 3 principios anteriores.
- **SHITSUKE:** Evita que se rompan los procedimientos ya establecidos y esto implica control periódico, visitas sorpresa, autocontrol de los empleados, respeto por sí mismo y por los demás.

También se debe tener en cuenta el círculo de DEMING, pues este sistema se basa en él para una mejora continua, porque es una estrategia de mejora continua de la calidad la cual usa cuatro pasos, pues los resultados de la implementación permitirá a la empresa una mejora integral de la competitividad, de los productos y servicio, mejorando continuamente la calidad del producto, reduciendo los costos de operación, incrementando la participación en el mercado y aumentando la rentabilidad de HEBESTA S.A.S.

Figura 2. Ciclo de Deming.



Fuente: Metodología PDCA –
Ciclo de Deming. s.f.

- **PLANEAR:** El equipo de trabajo de la empresa debe poner su meta, analizar el problema y definir el plan de acción que se implementará.

- **HACER:** Una vez que tienen el plan de acción este se elabora y se registra. Es recomendable realizar una prueba piloto antes de su aplicación.
- **VERIFICAR:** Luego de cierto tiempo, los datos de control son recopilados y se analizan, comparándolos con los resultados inicialmente especificados. Determinando si el plan de acción aplicado está teniendo un impacto positivo dentro y fuera de la empresa.
- **ACTUAR:** Una vez obtenidos los resultados se decide si se requiere alguna modificación para mejorar. Usualmente en este punto suelen aparecer sugerencias y recomendaciones que la empresa debe tener en cuenta para una mejora continua.

Una forma análoga de ver la filosofía organizacional anteriormente expuesta es en cuanto al diseño de la planta de forma operacional, donde es ver el proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) en línea, el cual estaría enfocado en el producto con los recursos enfocados alrededor del mismo. Los volúmenes en general son altos y el producto es de tipo estandarizado. La materia prima se mueve de forma lineal de una etapa a la siguiente, en forma de serie la cual ya se encuentra fijada. Cada etapa desarrolla el mismo proceso de forma continua y con poca o ninguna variabilidad.

De esta manera siempre los productos van a inventario para que estén listos cuando el comprador lo pida. Las órdenes de producción no están directamente atadas a las órdenes de los consumidores como en otros casos.

Figura 3. Proceso en línea.



Fuente: Carro, R. Diseño y selección de procesos. p. 3. s.f.

Para elaborar un diseño de planta se debe definir el tipo de proceso, en este caso es un proceso en línea como se observa en la figura 3. De la misma forma se deben examinar los elementos y principios fundamentales que están comprometidos en el desarrollo de este proceso técnico y económicamente eficiente, desde un análisis en el laboratorio hasta la zona de construcción de la planta, pasando por todas y cada una de las fases intermedias.

En este diseño no solo se analiza la figura técnica de ingeniería sino también las diferentes etapas económicas del proceso, enfatizando los costos como uno de los más importantes del mismo.

2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL EN LA PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO EN HEBESTA S.A.S

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

“Es una empresa familiar Colombiana, cuyo Fundador se inicia como empresario en el año de 1.982 creando Equinox Ltda., una de las Industrias Metalmeccánicas más importantes del país, y de Suramérica, que durante 22 años realizó exitosos proyectos y montajes industriales, tales como Cervecería Leona en Tocancipá, Cervecería Bavaria en Boyacá, Cervecería Suramericana, Cervecería Quito y Guayaquil en Ecuador, Tanques Criogénicos para productores de Oxígeno y Nitrógeno en Colombia, Ecuador, Argentina y muchos más en los campos de la Industria de bebidas, alimentos, licores, química y petroquímica.”²⁴

Buscando diversificarnos, en el año de 1.983 se creó la empresa BM Ltda., a través de la cual, durante 15 años tuvimos varias representaciones entre ellas las marcas americanas de equipos para Pintura y Máquinas de Lavado a Presión: Titan – Speeflo; equipos para pulimento: Dynabrade, y la línea de abrasivos de 3M.

Desde el año 1.996, HEBESTA S.A.S. ha incursionado en la industria química produciendo fertilizantes para ser aplicados en agricultura y jardinería, manejando un proceso de producción descrito en el numeral 2.2, el cual se realiza de manera empírica y manualmente, no se ha realizado un análisis detallado de los efectos que implica realizar un proceso empírico sobre el producto terminado.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL

La producción de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) en la empresa, se realiza a partir de un proceso empírico y sencillo, donde se adiciona agua, ácido sulfúrico (H_2SO_4) y óxido de magnesio (MgO) a un reactor de fibra de vidrio. Para obtener un producto acorde a las necesidades del cliente, se debe tener en cuenta principalmente las cantidades de materia prima que se adicionan a este proceso. La ineficiencia de la técnica que maneja actualmente la empresa es debido a su bajo control de dosificación al momento de adicionar las materias primas.

Para desarrollar la producción de sulfato de magnesio, el primer compuesto en ser adicionado al reactor es el agua recirculada del proceso (aguas madre), empleando de 17.000 a 18.000 litros de ésta. Una de las materias primas usadas en este proceso es el ácido sulfúrico (H_2SO_4) que debe contener de un 97% a 99% de pureza, del cual se adicionan 1.700 litros y es suministrado por Industrias Básicas de Caldas. Finalmente, es añadido el óxido de magnesio (MgO) que tiene dos proveedores: el primero es comprado a una empresa que extrae ladrillos refractarios

²⁴ HEBESTA S.A.S. Nosotros. [en línea]. (s.f.). Disponible en: <https://www.hebesta.com/nosotros>

derivados del recubrimiento de altos hornos, la empresa se encarga de molerlos y triturarlos, preparándolos para su uso posterior, estos deben contener una composición de 85% de éste, el segundo es Timab Magnesium importado de China, el cual llega a HEBESTA S.A.S. de forma pulverizada. Esta adicción se realiza en 6 etapas por medio de bultos con capacidad de 25 kg cada uno, de la siguiente forma la primera de 22 bultos, la segunda 8 bultos, en la tercera y cuarta etapa 10 bultos cada una y en la quinta y sexta 5 bultos respetivamente.

La producción mensual de esta empresa para el año 2.017 fue de 420 toneladas de sulfato de magnesio ($MgSO_4$), el cual es vendido por bultos de 25 kg a nivel industrial por un valor de \$16.250. Actualmente, la persona encargada suministra al proceso cantidades no estandarizadas ni controladas. Por lo tanto, el producto terminado no es homogéneo, lo que es poco rentable para la empresa, demandando altos costos de producción y operación, pérdidas de las materias primas generando como desecho la formación de lodos, de aproximadamente 20 toneladas por mes y obstrucción del área causada por éstos que son empacados en bultos y agrupados en una zona de la planta.

2.2.1 Distribución en planta.

Figura 4. Distribución en planta HEBESTA S.A.S.



Fuente: HEBESTA S.A.S.

Convenciones:

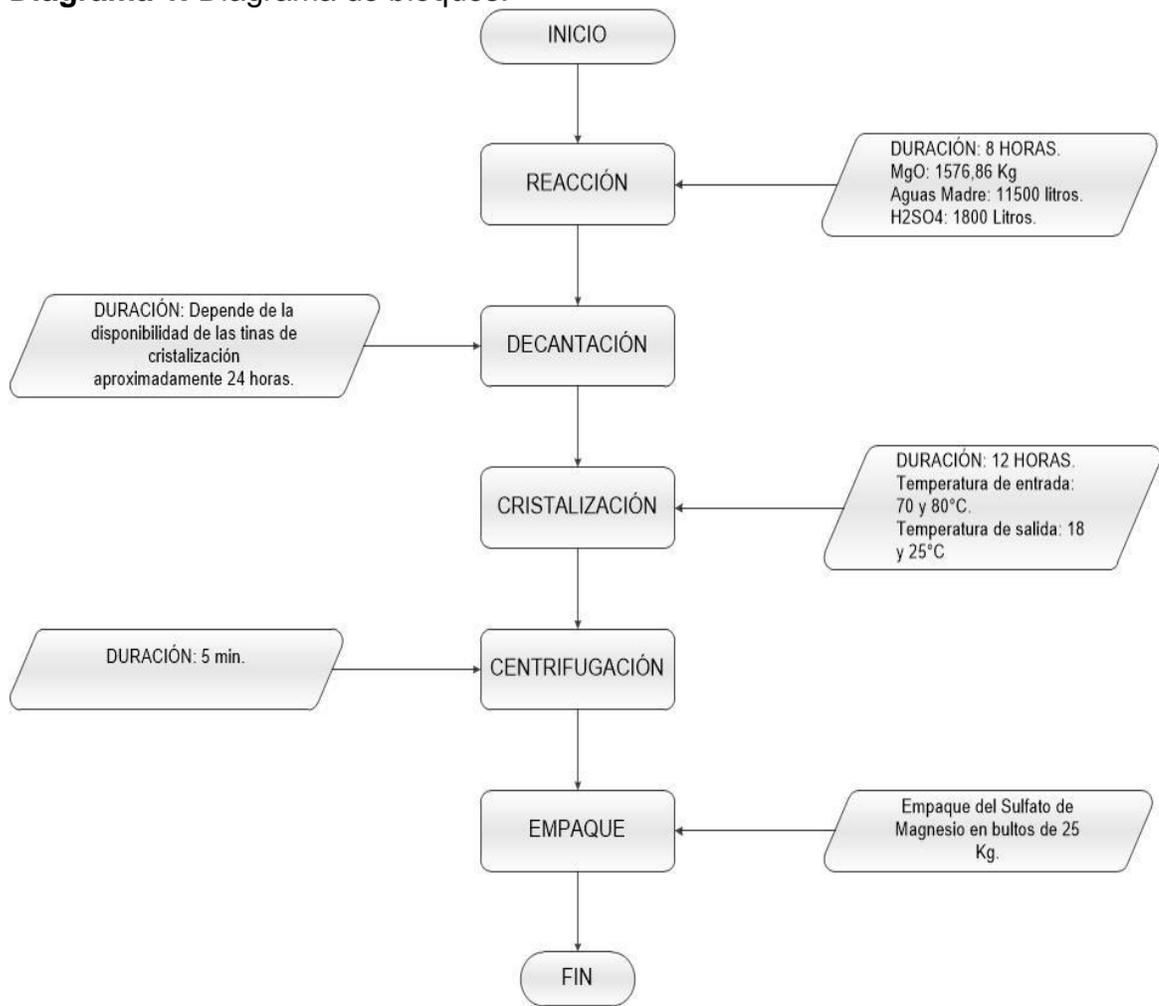
1. Etapa de reacción
2. Etapa de decantación.
3. Etapa de cristalización
4. Etapa de centrifugación.
5. Etapa de empaque.

2.2.2 Diagrama de bloques. Para una descripción más detallada del proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) se realizó un diagrama de bloques el cual inicia por la etapa de reacción como se observa en el diagrama 1, ésta etapa tiene una duración de 8 horas, se agregan 11.500 litros de aguas madre, 1.800 litros de ácido sulfúrico y 1.576,86 kg de MgO en 6 etapas de adición. Dicha reacción se lleva a cabo en un reactor de fibra de vidrio con agitación constante (600 RPM) y un volumen de diseño de 25.000 litros.

Posteriormente pasa a la etapa de decantación la cual tiene una duración de 8 horas, pero con el uso del floculante se acelera el proceso y se logra un tiempo de decantación de 4 horas, en ocasiones la solución dura 24 horas dentro de los tanques de decantación pues depende de la disponibilidad de las tinas de cristalización, la temperatura en esta etapa debe mantenerse por encima de los 70°C para evitar la cristalización dentro de los tanques. Luego pasa a la etapa de cristalización la cual tiene una duración de 12 horas, la solución entra a una temperatura que varía entre los 70 y 80°C y sale entre los 25 y 18°C , la formación de los primeros cristales comienza a los 35°C .

A continuación, pasa a la etapa de centrifugación la cual tiene una duración de 5 minutos en cualquiera de las centrifugas, actualmente no se tiene un % de humedad establecido y finalmente pasa a la etapa de empaque donde es empacado en bultos de 25 kg y son almacenados.

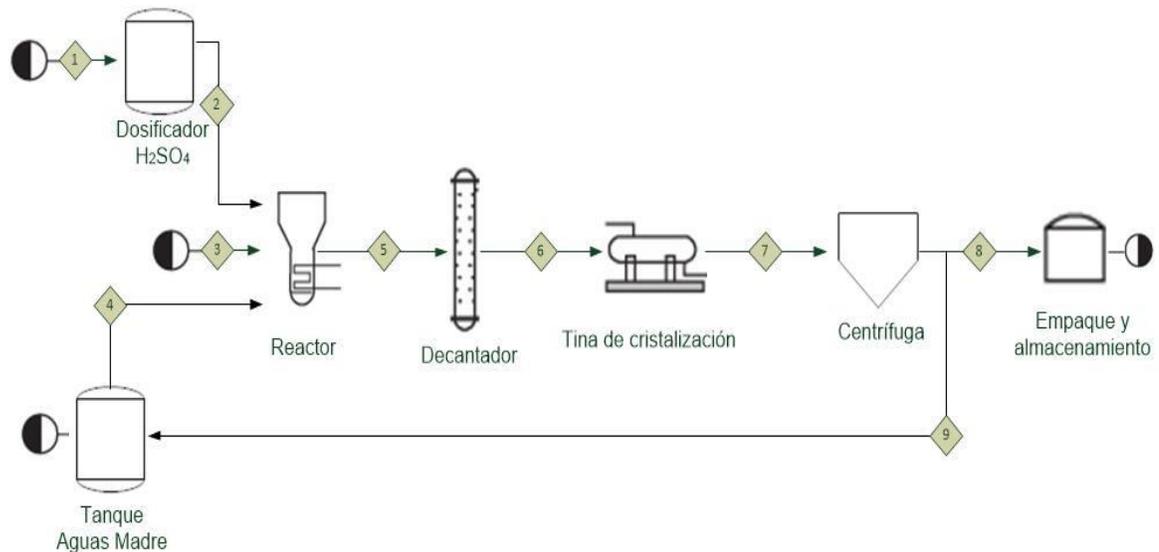
Diagrama 1. Diagrama de bloques.



Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Diagrama de flujo de proceso PFD. Con el fin de relacionar los principales componentes de la planta, se hace la recolección de los datos para cada una de las corrientes y documentar de forma detallada el proceso, empleando un conjunto de símbolos y notaciones que mejora la comprensión de forma gráfica para estudiar la eficiencia y mejora del proceso empleado actualmente en la empresa.

Diagrama 2. Diagrama de flujo de proceso PFD.



Fuente: elaboración propia.

Donde:

Corriente 1: Ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Corriente 2: Ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Corriente 3: Óxido de Magnesio (MgO).

Corriente 4: Aguas madre.

Corriente 5: Solución de MgSO_4

Corriente 6: Solución de MgSO_4

Corriente 7: Sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Corriente 8: Sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Corriente 9: Aguas madre.

Tabla 2. Información de las corrientes del PFD.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Caudal [m ³ /s]	0,02	1,58	N/A	0,06	21,3	2,5x10 ⁻³	-	-	-
Vel. [m/s]	9,74	779, 7	N/A	28,7	10496,5	1,23	-	-	-
Flujo másico [kg/h]	-	-	316,57 ⁱ	-	-	-	359,16 ⁱⁱ	292 ⁱⁱⁱ	67,16 ^{iv}
Temp. [°C]	20	20	20	20	70-80	70-80	25-18	25-18	25-18

Fuente: elaboración propia.

Para las corrientes 7 y 8 no se tienen datos establecidos de caudal y velocidad, debido a que se realiza manualmente por lo tanto los tiempos y la cantidad de producto varían.

2.3 SEGUIMIENTO DE LAS MATERIAS PRIMAS

2.3.1 Ácido sulfúrico. “Este es un ácido mineral fuerte y un oxidante fuerte se disocia en agua, reacciona con metales básicos”²⁵, como el aluminio y en este caso el óxido de magnesio. “Sus características de higroscopicidad se deben a la formación de diferentes hidratos, los cuales corresponden al monohidrato (H₂SO₄*H₂O), el dihidrato (H₂SO₄*2H₂O), el trihidrato (H₂SO₄*3H₂O), el tetrahidrato (H₂SO₄*4H₂O) y por último el heptahidratado (H₂SO₄*7H₂O) (1). Las reacciones del ácido sulfúrico concentrado en el área de los compuestos orgánicos están muy influenciadas por las propiedades oxidantes e higroscópicas de éste; debido a estas características, reacciones de carbonización de carbohidratos y de condensación orgánica presentan mejor desempeño en su presencia.”²⁶

Puesto que el ácido que se usa como materia prima en el proceso es de alta concentración, por motivos de seguridad no fue posible la caracterización de éste en laboratorio, por lo tanto, se realizó a partir de la evaluación de datos históricos del proveedor, que actualmente es industrias básicas de caldas.

ⁱ Ver anexo 20.

ⁱⁱ Ver anexo 28.

ⁱⁱⁱ Ver anexo 26.

^{iv} Ver anexo 27.

²⁵ IDEAM. Ácido sulfúrico. [en línea]. (s.f.). Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia4.pdf>

²⁶ ELVERS, B y HAWKINS S. Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry; Volumen 24; Quinta edición completamente revisada; Editorial VCH; New York, U.S.A.; 1989.

HEBESTA S.A.S. recibe aproximadamente cada 8 o 15 días lotes de ácido sulfúrico, dependiendo de la demanda de producción, cada uno de estos lotes llega con su respectivo certificado de análisis, donde se evidencian las principales especificaciones del producto, en este caso se evaluó la concentración de cada uno de los lotes de los meses de enero a mayo de 2018 (VER ANEXOS 1 AL 18), arrojando como resultado lo siguiente:

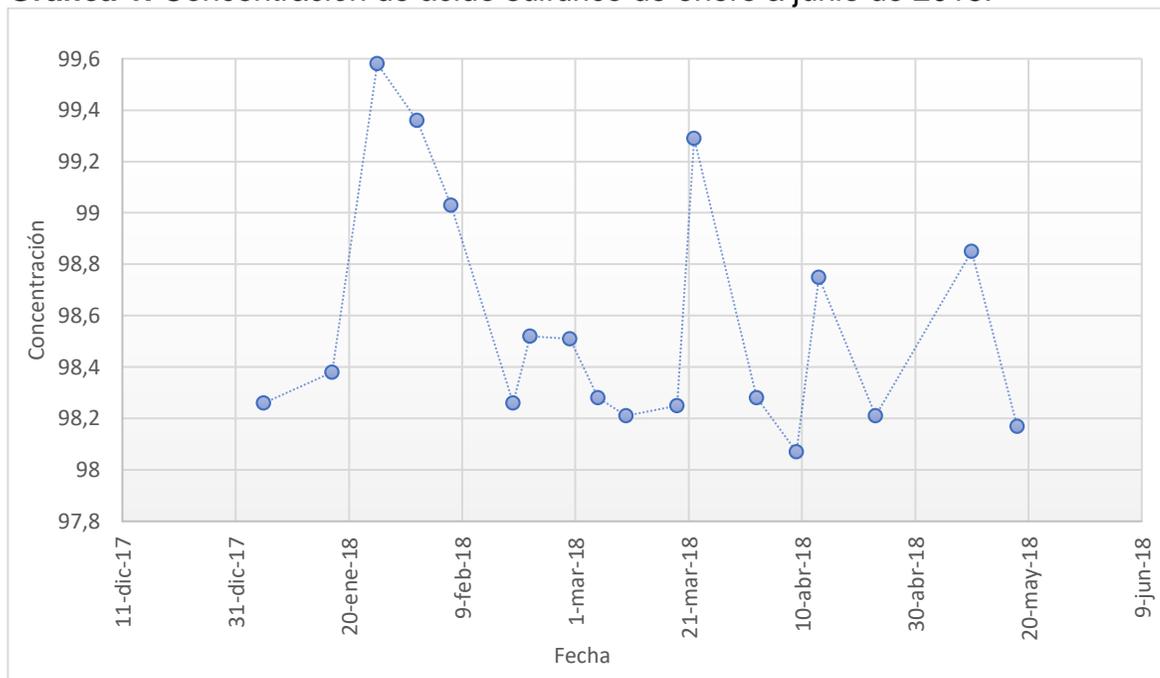
Tabla 3. Histórico del proveedor de ácido sulfúrico.

Concentración (%)	Fecha
98,26	05 de enero
98,38	17 de enero
99,97	25 de enero
99,36	01 de febrero
99,03	07 de febrero
98,26	18 de febrero
98,52	21 de febrero
98,51	28 de febrero
98,28	05 de marzo
98,21	10 de marzo
98,25	19 de marzo
99,29	22 de marzo
98,28	02 de abril
98,07	09 de abril
98,75	13 de abril
98,21	23 de abril
98,85	10 de mayo
98,17	18 de mayo

Fuente: elaboración propia

Con estos datos se realizó la siguiente gráfica:

Gráfica 1. Concentración de ácido sulfúrico de enero a junio de 2018.



Fuente: elaboración propia.

Media: 98,59

Desviación estándar: 0,52

A partir del conjunto de datos expuestos en la tabla 3, se calculó la desviación estándar la cual es una medida de dispersión que nos indica cuánto pueden alejarse los valores respecto al promedio o más conocido como la media.

Se puede comprobar que el ácido sulfúrico usado como materia prima en este proceso generalmente se encuentra entre el 98% y el 99 % de concentración, pues si se encuentra menor al 98% el lote es rechazado por HEBESTA S.A.S. Se tiene este parámetro de calidad debido a que el ácido sulfúrico es un reactivo importante durante la reacción exotérmica para la obtención del producto final, por las características que posee las cuales fueron mencionadas anteriormente.

2.3.2 Óxido de magnesio. El óxido de magnesio es una sustancia compuesta formada por un enlace iónico entre el catión magnesio y el anión oxido. El magnesio, uno de los elementos de mayor carácter metálico, forma óxidos básicos y sus disoluciones acuosas son alcalinas. Este se obtiene por la quema de cinta de magnesio, que se oxida con una brillante luz blanca, lo que resulta en un polvo.²⁷

²⁷ CHEMISTIACALY. Óxidos, ácidos, bases y sales. [en línea]. (s.f.). Disponible en: <https://chemistiacaly.wordpress.com/2008/05/13/oxido-acidos-bases-y-sales/>

En HEBESTA S.A.S. compran el óxido de magnesio (MgO) a una empresa que extrae ladrillos refractarios derivados del recubrimiento de altos hornos, HEBESTA S.A.S., se encarga de molerlos y triturarlos, preparándolos para su uso posterior, puesto que son una fuente principal de óxido de magnesio, a su vez también tiene como proveedor a Timab Magnesium el cual maneja óxido de magnesio pulverizado proveniente de China.

Para garantizar la calidad de ésta materia prima se realizó un ensayo a partir del método de absorción atómica con el fin de determinar la concentración de óxido de magnesio de cada uno de los proveedores. Este es un método utilizado para la detección y determinación de elementos químicos en un compuesto que forma una muestra los cuales son divididos en átomos libres, especialmente elementos metálicos, “los compuestos para su examen, se tienen que romper en los átomos que los constituyen. Esto se realiza por pulverización en una llama a alta temperatura. Un rayo luminoso de una cierta longitud de onda, producido por un tipo especial de lámpara, se dirige a lo largo del eje longitudinal de una llama plana y hacia un espectrofotómetro. Simultáneamente, la solución de la muestra es aspirada hacia el interior de la llama. Antes de entrar en ésta, la solución es dispersada formando una niebla de gotitas muy finas, que se evaporan en la llama dando inicialmente la sal seca y luego el vapor de la sal, el cual se disocia, por lo menos en parte, en átomos del elemento que se desea determinar.”²⁸

La prueba experimental arrojó como resultado:

Tabla 4. Resultados composición de Magnesio.

Proveedor de óxido de magnesio	Resultado
Ladrillos refractarios	81,5%
Timab Magnesium (china)	92,9%

Fuente: elaboración propia.

Ambos proveedores de óxido de magnesio proporcionan materia prima a la empresa con un elevado porcentaje de magnesio, pero el de mayor concentración es el que proviene de China. Es bueno mencionar que el magnesio tiene como función importante ser el átomo central en la molécula de clorofila. La clorofila es el pigmento que da a las plantas su color verde y lleva a cabo el proceso de la fotosíntesis; también interviene en la activación de un sinnúmero de enzimas necesarias para su desarrollo y contribuye a la síntesis de proteínas.²⁹

²⁸ WALTON, H. Análisis químico e instrumental moderno. 2005. p. 243.

²⁹ PRO-MIX. La función del magnesio en el cultivo de plantas. [en línea]. (s.f.). Disponible en Internet: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-magnesio-en-el-cultivo-de-plantas/>

2.3.3 Aguas madre. Es el agua recirculada del proceso de producción que está compuesta por todos los cristales no reaccionados durante el proceso de producción, es decir que estas aguas madre proveerán una mayor cantidad de cristales durante la concepción de la reacción³⁰.

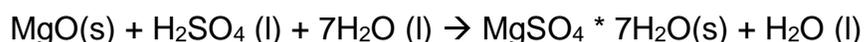
Esta materia prima se recircula en la etapa de centrifugación y no se realiza la caracterización correspondiente puesto que el agua usada varía por la etapa de reacción, pues las cantidades de materias primas agregadas no se tienen estandarizadas y esto genera una variación en las propiedades del agua. Para hacer la debida recirculación al proceso esta debe tener una densidad entre 1,16 a 1,20 g/cm³, porque una elevada densidad, quiere decir que presenta más contaminantes que pueden afectar la producción del fertilizante; entre más cercana a 1 sea, más apropiada será. HEBESTA S.A.S., realiza la recirculación pues es más rentable para este proceso que hacer uso de agua pura.

2.4 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN CADA UNA DE LAS ETAPAS DEL PROCESO

Con el fin de encontrar la falla principal del proceso actual que desarrolla la empresa se realizó el seguimiento detallado de cada una de las etapas. Actualmente, este proceso ha demostrado buenos resultados en su producción y rentabilidad, pero existe una formación de lodos que puede ser causado por no tener un proceso estandarizado ni controlado, por lo tanto, se generarían pérdidas de materias primas y costos elevados de producción.

2.4.1 Reacción. El proceso de producción de sulfato de magnesio (MgSO₄) en HEBESTA S.A.S, se basa en la siguiente reacción exotérmica, es decir desprende energía en forma de calor rápidamente, también denominada como reacción de combustión. El concepto de calor de combustión se aplica en reacciones donde los productos de unión de los elementos con el oxígeno son los óxidos normales de aquellos³¹:

Ecuación 1. Reacción de sulfato de magnesio heptahidratado.



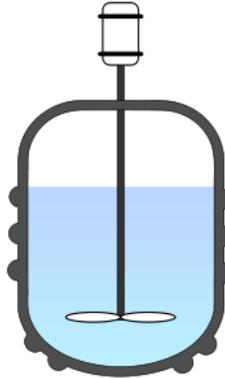
Esta etapa se realiza a partir de un proceso empírico y sencillo, donde se adiciona agua (H₂O), ácido sulfúrico (H₂SO₄) y óxido de magnesio (MgO), en un reactor de fibra de vidrio el cual está diseñado para proporcionar una agitación constante (600 RPM), con un diámetro interno de 2,9 m, altura de 3,85 m, y una capacidad de diseño de 25.000 litros. La temperatura de reacción debe mantenerse entre 70 y 75

³⁰ ALVITES, J. Optimización del proceso productivo de sulfato de magnesio heptahidratado mediante el diseño e implementación de una planta piloto de producción de fertilizantes solubles. 2013.

³¹ HOWARD, L. Introducción a la química. Reverté, S.A. s.f. p. 283.

°C; y se debe tener un control del pH, la densidad debe mantenerse entre 1,36 y 1,38 g/cm³.

Figura 5. Reactor Batch.



BATCH reactor. Mrabet,
Yassine. [Fotografía]. 2009.

El control que se realiza manualmente de temperatura, pH y densidad es continuo durante el transcurso de esta etapa, esto permite que la solución se mantenga en estas condiciones dentro del reactor, al mantener la temperatura dentro de los rangos anteriormente establecidos favorece la velocidad de reacción, pues al estar por debajo de este rango la reacción se suspende generando el endurecimiento de la solución, el aumento del pH indica que la reacción tiene un excedente de óxido y la disminución indica la falta de óxido de magnesio, el control continuo de la densidad indica la cantidad de sólidos presentes en la reacción lo cual determinará el porcentaje de cristales obtenidos una vez que se finaliza este proceso, a su vez se relaciona con la obtención del producto terminado, pues la densidad del fertilizante es de suma importancia para realizar los cálculos de dosificación.

Para el control en esta etapa se realizó un seguimiento de las actividades del operador durante un día de producción normal en un horario de las 2:00 am a las 10:00 am, puesto que diariamente se realiza una reacción para la obtención de este fertilizante. La reacción tiene una duración promedio de 8 horas.

Inicialmente el operario comienza su turno dando paso de corriente al reactor para así empezar la agitación, luego llena el reactor hasta la mitad de su capacidad de operación (11.500 litros) con aguas madre, la cual posee una densidad de 25° Baumé igual a 1,2083 g/cm³, escala que es manejada por la empresa.

Ecuación 2. Conversión ° Baumé a g/cm³

$$\rho = 145 / (145 - \text{°Bé})$$

Puesto que la empresa no cuenta con datos aproximados de caudales, flujos y velocidades de los desplazamientos del tanque de aguas madre hacia el reactor se realizaron los respectivos cálculos para esto. Es importante saber estos datos para poder determinar las cantidades y velocidades que circula esta materia prima hacia el reactor y verificar si esos flujos son adecuados para el tamaño de las tuberías, debido a que si existen grandes flujos pueden exceder la capacidad de la tubería, lo cual ocasionaría la ruptura de esta.

Ecuación 3. Volumen teórico tanque aguas madres.

$$V = h * \pi * r^2$$

$$V = 4,84 \text{ m} * \pi * \left(\frac{2,86\text{m}}{2}\right)^2$$

$$V = 31,093 \text{ m}^3$$

De acuerdo a las ecuaciones de diseño se tiene un volumen teórico de $31,093 \text{ m}^3$, debido a las condiciones de operación de la empresa se trabaja con el 90% de la capacidad, lo cual da como resultado un volumen real de $27,9837 \text{ m}^3$, con el cual se determinara el caudal.

Ecuación 4. Caudal tanque de aguas madres.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{27,9837 \text{ m}^3}{480 \text{ s}}$$

$$Q = 0,05829 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ecuación 5. Área transversal de la tubería. (Aguas madre al decantador)

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,0254 \text{ m})^2$$

$$A = 2,0289 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

A partir del cálculo del área transversal se puede determinar la velocidad de desplazamiento del agua desde el tanque de almacenamiento hacia el reactor.

Ecuación 6. Velocidad del agua en el tramo.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{0,05829 \frac{m^3}{s}}{2,0289 \times 10^{-3} m^2}$$

$$v = 28,7298 \frac{m}{s}$$

Posteriormente se da paso al ácido sulfúrico para ser agregado, se encuentra almacenado en un tanque con diámetro interno de 2,585 m, diámetro externo de 2,594 m y largo de 3,670 m, a partir de estas medidas se realiza el cálculo del volumen correspondiente.

Ecuación 7. Volumen de diseño del tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico.

$$V = h * \pi * r^2$$

$$V = 3,670 m * \pi * \left(\frac{2,585 m}{2}\right)^2$$

$$V = 19,26092 m^3$$

De acuerdo a las ecuaciones de diseño se tiene un volumen total de $19,26092 m^3$ debido a las condiciones de operación de la empresa se trabaja con el 80% de la capacidad, lo cual da como resultado un volumen de $15,408736 m^3$, con el cual se determinara el caudal, en una distancia de 9,56 m.

Ecuación 8. Caudal tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{15,408736 m^3}{780 s}$$

$$Q = 0,0197548 \frac{m^3}{s}$$

Ecuación 9. Área transversal de tubería. (Tanque de almacenamiento dosificador)

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,0254 m)^2$$

$$A = 2,0289 \times 10^{-3} m^2$$

A partir del cálculo del área trasversal se puede determinar la velocidad de desplazamiento del ácido sulfúrico desde el tanque de almacenamiento hacia el dosificador.

Ecuación 10. Velocidad de ácido sulfúrico entre el tanque de almacenamiento y el dosificador.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{0,0197548 \frac{m^3}{s}}{2,0289 \times 10^{-3} m^2}$$

$$v = 9,73670 \frac{m}{s}$$

Luego pasa rápidamente a un dosificador de hierro con diámetro exterior de 0,99 m, altura 1,1 m y espesor de lámina $9,53 \times 10^{-3}$ m (3/8"), el cual es llenado y vaciado sucesivamente en 4 ocasiones, agregando un total de 1.800 litros al reactor lo que toma un tiempo aproximado de 80 minutos, el vaciado se ejecuta por medio de la fuerza de gravedad.

Ecuación 11. Volumen de diseño de tanque dosificador.

$$V = h * \pi * r^2$$

$$V = 1.100 m * \pi * \left(\frac{0,980475 m}{2} \right)^2$$

$$V = 830,5305569 m^3$$

De acuerdo a las ecuaciones de diseño se tiene un volumen teórico de $830,5306 m^3$, debido a las condiciones de operación de la empresa se trabaja con el 80% de la capacidad, lo cual da como resultado un volumen real de $664,424 m^3$, a partir del cual se determina el caudal en una distancia de 6,40 m.

Ecuación 12. Caudal tanque dosificador a reactor.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{664,4244455 m^3}{420 s}$$

$$Q = 1,581962 \frac{m^3}{s}$$

Ecuación 13. Área transversal de tubería. (Dosificador a reactor).

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,0254 m)^2$$

$$A = 2,0289 \times 10^{-3} m^2$$

A partir del cálculo del área transversal se puede determinar la velocidad de desplazamiento del ácido sulfúrico desde el tanque de dosificador hacia el reactor.

Ecuación 14. Velocidad del ácido sulfúrico en el tramo del dosificador al reactor.

$$v = \frac{Q}{A}$$
$$v = \frac{1,581962 \frac{m^3}{s}}{2,0289 \times 10^{-3} m^2}$$
$$v = 779,71413 \frac{m}{s}$$

Con lo anterior se puede calcular que cada vaciado del tanque dosificador gasta un tiempo de 7 min (420 s). Esta medida se realiza a través de un sistema manual que consiste de un flotador en el interior del tanque dosificador atado a un cable fino y un bloque ubicado en la parte exterior y dependiendo de la posición del bloque a lo largo de una regla ubicada al exterior del tanque, indica el nivel de ácido dentro de éste, como se muestra en la figura 6, dicha regla se encuentra en unidades de kilogramos tomando valores de 50 a 500 kg (VER ANEXO 19).

Figura 6. Sistema de medición en el tanque dosificador de ácido sulfúrico.



Fuente: Flores, O. Sistema de medición de nivel. s.f.

Finalmente, el operario adiciona al reactor la última materia prima involucrada en este proceso es decir el óxido de Magnesio. Esta adición se divide en 6 etapas diferentes, donde se pesó cada uno de los bultos, como se puede ver en la tabla 5 donde se realizó la verificación del contenido de cada uno de los bultos agregados.

Tabla 5. Etapas de adición óxido de magnesio (MgO).

Número de etapa	Cantidad de bultos por agregar
1	22
2	8
3	10
4	10
5	5
6	5

Fuente: elaboración propia.

La etapa número 1 está compuesta de 22 bultos, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Peso de óxido de magnesio en la etapa 1 de adición (22 bultos).

Número del bulto	Cantidad (kg)	Forma de adición	Tiempo de duración (s)	Lapso entre la adición (s)
1	26,15			
2	26,5			
3	26,35			
4	26,25			
5	26,45			
6	26,25	Vaciado rápido (se agrega el bulto en su totalidad)	230	
7	26,4			
8	26,25			
9	26,45			
10	26,25			
11	25,5			
12	26,15			
13	26,5			420
14	26,85	Vaciado lento (Los bultos se agregan por porciones)	180	
15	26,4			
16	26,4			
17	26,65			
				94

Tabla 6 (continuación)

Número del bulto	Cantidad (kg)	Forma de adición	Tiempo de duración (s)	Lapso entre la adición (s)
18	26	Vaciado lento		
19	26,6	(Los bultos se agregan por porciones)	160	
20	26,5			75
21	26,25	Vaciado lento		
22	26,45	(Los bultos se agregan por porciones)	105	
TOTAL	579,55 kg			

Fuente: elaboración propia.

Promedio: 26,343 kg

Desviación estándar: 0,2656

A partir del conjunto de datos expuestos en la tabla 6, se calculó la desviación estándar la cual es una medida de dispersión que nos indica cuánto pueden alejarse los valores respecto al promedio o más conocido como la media.

Cuando se pesó la cantidad de óxido de magnesio (MgO) se pudo evidenciar que existía una falla en este, puesto que el operario encargado de la adición al reactor contaba con cierta certeza de que estaba agregando 25 kg por bulto, como se puede mostrar en la tabla número 6 la cantidad presente de óxido de magnesio en cada uno de los bultos era inexacta pues el porcentaje de error en cada bulto era aproximadamente de 4,6 %, dejando ver que el encargado no sabe en realidad cuanto esta adicionando. Estos 22 bultos se agregaron de dos formas diferentes (de forma rápida y pausada) como se explica anteriormente, iniciando con la adición del primer bulto a las 3:50 am.

Luego inicia la etapa número 2 que estuvo compuesta de 8 bultos, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Peso de óxido de magnesio en la etapa 2 de adición.

Número del bulto	Cantidad (kg)	Tiempo de duración de adición por bulto (s)	Lapso entre la adición (s)
1	26,25		
2	26,05	195	
3	26,25		125
4	26,4	115	
5	26,55		180
6	26,35	120	
7	26,55		110
8	26,35	44	
TOTAL	210,75 kg		

Fuente: elaboración propia.

Promedio: 26,344 kg

Desviación estándar: 0,1660

Posteriormente se tomó un tiempo de 4 minutos con 32 segundos para dar inicio a la etapa número 3 que estuvo compuesta de 10 bultos, como se muestra en la etapa 6.

Tabla 8. Peso de óxido de magnesio en la etapa 3 de adición.

Número del bulto	Cantidad (kg)	Tiempo de duración de adición por bulto (s)	Lapso entre la adición (s)
1	26,45	65	
2	26,25	55	130
3	26,25	93	93
4	26,15		150
5	26,35	130	
			165

Tabla 8 (Continuación)

Número del bulto	Cantidad (kg)	Tiempo de duración de adición por bulto (s)	Lapso entre la adición (s)
6	26,05	167	131
7	26,25		
8	26,35	147	96
9	26,5		
10	26,8	59	
TOTAL	263,4 kg		

Fuente: elaboración propia.

Promedio: 26,34 kg

Desviación estándar: 0,2100

Luego de haber adicionado una totalidad de 40 bultos que corresponden a 1.053,7 kg, lo cual tomo un tiempo estimado de 1 hora y 7 minutos, se dejó de agregar oxido de magnesio durante 15 minutos, dejando la reacción en constante agitación (600 RPM) y luego se dio paso a un nuevo flujo de aguas madre hacia el reactor, puesto que la reacción en este punto de adición de óxido se encuentra muy concentrada y necesita nuevamente agua, lo cual tuvo una duración de 8 minutos (480 s).

Posteriormente para estabilizar la reacción se dio inicio a las etapas número 4,5 y 6, en las que se agregan 10, 5 y 5 bultos respectivamente (ver tablas 9, 10 y 11).

Tabla 9. Peso y tiempo de duración en la adición de la etapa 4 de MgO

Número del bulto	Cantidad (kg)	Tiempo de duración de adición por bulto (s)	Lapso entre la adición de los bultos (s)
1	27,45	167	135
2	26,36		
3	25,85		
4	26,65	130	193
5	26,4		

Tabla 9 (Continuación)

Número del bulto	Cantidad (kg)	Tiempo de duración de adición por bulto (s)	Lapso entre la adición de los bultos (s)
6	26,95		
7	26,25	187	
8	25,95		
			115
9	26,4		
10	26,6	117	
TOTAL	264,86 kg		

Fuente: elaboración propia.

Promedio: 26,486 kg

Desviación estándar: 0,4669

Entre las etapas número 4 y 5, se tomó un lapso de 7 minutos, para así continuar con la etapa número 5.

Tabla 10. Peso y tiempo de la etapa 5 de adición de Óxido de Magnesio.

Número del bulto	Cantidad (kg)	Tiempo de duración de adición por bulto (s)	Lapso entre la adición de los bultos (s)
1	26,5		
2	26,6	142	
			448
3	26,4	78	
			1200
4	26,55	254	
			254
5	26,45	245	
TOTAL	132,5 kg		

Fuente: elaboración propia.

Promedio: 26,5 kg

Desviación estándar: 0,0791

En esta parte de la reacción se monitorea continuamente el pH que debe estar en un rango de 5,5 a 6,5, la densidad en un rango de 1,36 a 1,38 g/cm³ y por último la temperatura de la solución que debe estar en un rango entre 70°C a 80°C, pues de éstas dependen las propiedades del sulfato de magnesio heptahidratado, esto se realiza por la parte superior del reactor donde se encuentra un orificio de fácil acceso, aunque el operador se encuentra expuesto a gases corrosivos generados por la reacción.

Para finalizar este procedimiento se pesa la cantidad de óxido de magnesio (MgO) en la etapa 6, cantidad que se adiciona de forma pausada y lenta, el operario a cargo debe tener en cuenta que al aplicar esta táctica apresuradamente se corría el riesgo de que la reacción al ser exotérmica, generara una rápida ebullición de la solución ocasionando un derrame fuera del reactor, lo que provocaría una serie de accidentes dentro de la empresa.

Tabla 11. Peso y tiempo de la etapa 6 de adición de Óxido de Magnesio.

Número del bulto	Cantidad (kg)	Tiempo de duración de adición por bulto (s)	Lapso entre la adición de los bultos (s)
1	26,55	378	540
2	26,5		
3	25,9	94	1468
4	26,65	357	
5	26,2	535	739
TOTAL	131,8 kg		

Fuente: elaboración propia.

Promedio: 26,36 kg

Desviación estándar: 0,3070

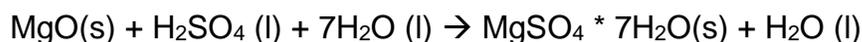
Figura 7. Adición óxido de Magnesio.



Fuente: elaboración propia.

Al terminar la etapa número 6 de adición de Óxido de Magnesio, se da por finalizada la etapa de reacción y de esta forma continuar con las siguientes etapas del proceso (decantación, cristalización, centrifugación y empaque).

2.4.1.1 Estequiometría de la reacción.



La ecuación anterior corresponde a la reacción química donde se observa una modificación de las sustancias presentes, los reactivos (Óxido de Magnesio, Ácido Sulfúrico y Aguas Madre) se consumen para dar lugar a los productos (Sulfato de Magnesio Heptahidratado y Agua).

Cuando los reactivos de una reacción están en cantidades proporcionales a sus coeficientes estequiométricos se dice que:

- La mezcla es estequiométrica.
- Los reactivos están en proporciones estequiométricas.
- La reacción tiene lugar en condiciones estequiométricas.

Las tres expresiones tienen el mismo significado, en cualquiera de estas condiciones la reacción es completa (teóricamente), todos los reactivos se consumirán dando las cantidades estequiométricas de productos correspondientes.³²

La ecuación 1, corresponde a la reacción química que se lleva a cabo para la producción del sulfato de Magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), cabe aclarar que se realiza la verificación de la estequiometría puesto que las cantidades que se agregan de materia prima no son equivalentes a pesar de ser una reacción balanceada como se muestra en la ecuación 1, donde la obtención del producto es uno a uno con respecto a los reactivos, a continuación, se muestran los pesos moleculares de cada uno de los compuestos involucrados en la reacción:

³² CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTEQUIOMETRÍA. Unidad: 7 “estequiometría”. s.f.

Tabla 12. Pesos moleculares de los compuestos involucrados en la reacción.

COMPUESTO	PESO MOLECULAR (g/mol)
MgO	40,304
H ₂ SO ₄	98,072
7 H ₂ O	126,105
MgSO ₄ * 7 H ₂ O	246,466
MgSO ₄	120,361

Fuente: elaboración propia.

En la etapa de reacción que se realiza en HEBESTA S.A.S. se adiciona un total de 11.500 litros de aguas madre inicialmente, 1.800 litros de ácido sulfúrico y 1.582,86 kg de óxido de magnesio durante toda la reacción. Con el fin de determinar el total de sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO₄*7H₂O) que se debería producir al agregar las cantidades anteriormente mencionadas se realizaron los siguientes cálculos.

Para MgO:

Ecuación 15. Cálculo de producción de MgSO₄ a partir de MgO.

$$1'582.860 \text{ g MgO} * \frac{1 \text{ mol MgO}}{40,304 \text{ g}} * \frac{1 \text{ mol MgSO}_4}{1 \text{ mol MgO}} = 39.273,025 \text{ mol MgSO}_4$$

Para H₂SO₄:

Densidad del H₂SO₄: 1840 Kg/m³

$$m = 1.840 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1,8 \text{ m}^3$$

$$m = 3.312 \text{ kg} = 3'312.000 \text{ g}$$

Ecuación 16. Cálculo de producción de MgSO₄ a partir de H₂SO₄

$$3'312.000 \text{ g H}_2\text{SO}_4 * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{98,072 \text{ g}} * \frac{1 \text{ mol MgSO}_4}{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4} = 33.771,107 \text{ mol MgSO}_4$$

Para H₂O:

$$m = \rho * v$$

$$m = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 11,5 \text{ m}^3$$

$$m = 11.500 \text{ kg} = 11'500.000 \text{ g}$$

$$11'500.000 \text{ g } H_2O * \frac{1 \text{ mol } H_2O}{18 \text{ g}} * \frac{1 \text{ mol } MgSO_4}{7 \text{ moles } H_2O} = 91.269,84 \text{ mol } MgSO_4$$

Los cálculos realizados anteriormente permiten verificar que el reactivo límite es el ácido sulfúrico.

Al ser el reactivo límite el que determina la cantidad de producto que se va a producir, es decir que la cantidad de sulfato de magnesio heptahidratado que se produce teóricamente es:

$$33.771,107 \text{ mol } MgSO_4 * \frac{120,361 \text{ g } MgSO_4}{1 \text{ mol } MgSO_4} = 4'064.724,21 \text{ g } MgSO_4 = 4.064,724 \text{ kg } MgSO_4$$

$$33.771,107 \text{ mol } MgSO_4 * \frac{7 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } MgSO_4} * \frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} = 4'255.159,482 \text{ g } H_2O = 4.255,1595 \text{ kg } H_2O$$

$$MgSO_4 * 7H_2O = 8.319,884 \text{ kg } MgSO_4 * 7H_2O$$

La cantidad de reactivo en exceso que reacciona

Ecuación 17. Reactivo en exceso que reacciona.

$$3'312.000 \text{ g } H_2SO_4 * \frac{1 \text{ mol } H_2SO_4}{98,072 \text{ g}} * \frac{1 \text{ mol } MgO}{1 \text{ mol } H_2SO_4} * \frac{40,304 \text{ g } MgO}{1 \text{ mol } MgO} = 1'361.110,694 \text{ g } MgO$$

Cantidad de reactivo en exceso que no reacciona:

Ecuación 18. Cantidad de reactivo en exceso que no reacciona.

$$1'582.860 \text{ g } MgO - 1'361.110,694 \text{ g } MgO = 221.749,306 \text{ g } MgO = 221,749 \text{ kg } MgO$$

Actualmente por cada reacción (diaria) realizada se producen 7.000 kg de producto terminado, al compararlo con la producción teórica se puede evidenciar que el proceso tiene una pérdida de 1.319,884 kg de $MgSO_4$, es decir, esta etapa tiene una eficiencia del 84,14%, esta eficiencia podría aumentar si se realiza un manejo adecuado de las materias primas.

Al finalizar el diagnóstico correspondiente a esta etapa, se encontraron falencias tales como la dosificación errónea pues no se tienen estandarizadas las cantidades de materia prima que se agregan al reactor, esto puede ser generado por la inadecuada intervención del operario, puesto que no tiene el conocimiento exacto de la cantidad que contiene cada uno de los bultos de óxido de magnesio (MgO) adicionados al reactor ni realiza la verificación de la temperatura a la cual se encuentra la reacción. Otra de las falencias encontradas es el mantenimiento del reactor debido a que no se realiza periódicamente.

2.4.2 Decantación. Puesto que la empresa no cuenta con datos aproximados de caudales, flujos y velocidades de los desplazamientos de la solución del reactor hacia los tanques decantadores se realizaron los respectivos cálculos para esto.

Ecuación 19. Volumen del reactor.

$$V = h * \pi * r^2$$

$$V = 3,85 \text{ m} * \pi * \left(\frac{2,9 \text{ m}}{2}\right)^2$$

$$V = 25,430014 \text{ m}^3$$

$$V = 25.430014$$

De acuerdo a las ecuaciones de diseño se tiene un volumen teórico de 25.430014 m^3 , debido a las condiciones de operación de la empresa se trabaja con el 90% de la capacidad, lo cual da como resultado un volumen de 22.88701 m^3 , lo que indica que aproximadamente se opera con un volumen real de 23.000 m^3 , con el cual se determinara el caudal en una distancia de 30,85 m.

Ecuación 20. Caudal reactor a tanques decantadores.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{23.000 \text{ m}^3}{1080 \text{ s}}$$

$$Q = 21,29629 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ecuación 21. Área transversal de tubería. (Reactor a decantadores).

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,0254 \text{ m})^2$$

$$A = 2,0289 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

A partir del cálculo del área transversal se puede determinar la velocidad de desplazamiento de la solución desde reactor hacia los tanques decantadores.

Ecuación 22. Velocidad de la solución en el tramo.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{21,29629 \frac{m^3}{s}}{2,0289 \times 10^{-3} m^2}$$

$$v = 10.496,47 \frac{m}{s}$$

Es importante saber estos datos para poder determinar la cantidad y velocidad que circulan de la solución hacia los tanques decantadores, y verificar si esos flujos son adecuados para el tamaño de las tuberías, debido a que si existen grandes flujos pueden exceder la capacidad de la tubería, lo cual ocasionaría la ruptura de esta.

Actualmente la empresa cuenta con cinco tanques decantadores de fondo plano con 3,05 m de altura, diámetro externo de 2,435 m, espesor de 4 mm y un tanque de fondo cónico con 3,05 m de altura, diámetro externo de 2,433 m y espesor de $4,76 \times 10^{-3} m$ (3/16").

Figura 8. Tanque decantador con fondo plano



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Tanque decantador con fondo cónico.



Fuente: elaboración propia.

Inicialmente los decantadores estaban debidamente aislados, previo al llenado se verificaba la limpieza del tanque, posterior a esto el tanque se llenaba en su totalidad y se cerraba correctamente para evitar el enfriamiento de la solución lo cual generaba la formación de cristales, así mismo prevenir accidentes dentro de la empresa. Este proceso dura aproximadamente 10 horas y finalmente dicha solución era bombeada a las tinas de cristalización dando paso a la siguiente etapa. A los lodos (silicato de magnesio) que se obtenían de cada tanque decantador se les determinaba la densidad correspondiente.

Figura 10. Tanque de decantación.



Fuente: elaboración propia.

Los valores que se muestran en la siguiente tabla corresponden a las densidades de la solución presente en cada uno de los tanques decantadores, en el momento de realizar el diagnóstico de esta etapa.

Tabla 13. Densidad en los tanques de decantación.

Número de tanque	Densidad (° Baumé)	Densidad (g/cm ³)
1	0	1
2	14	1,1069
3	4	1,0208
4	3	1,0201
5	25	1,2083
6	20	1,1600

Fuente: elaboración propia.

Actualmente la decantación se realiza directamente en el reactor donde se le adiciona un floculante (Water-Clear) el cual es un polímero inorgánico catiónico en solución basado en sales de aluminio, acelera la velocidad de floculación y por lo tanto el tiempo actual es de 1 hora. El producto final es bombeado a los tanques de decantación donde se busca una mejor separación, pues separan la solución oscura en un tanque y a medida que se aclara el operario inicia el llenado de otro tanque.

Figura 11. Sulfato de magnesio sin biopolímero (izquierda) y con biopolímero (derecha).



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Llenado de tanque decantador con solución turbia.



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Llenado de tanque decantador con solución clara.



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el seguimiento de las actividades ejecutadas por el operario en esta etapa, se observó que existen fallas humanas en el procedimiento ya que no es correcto realizar la decantación dentro del reactor pues se puede generar el daño de este como ha ocurrido, se identificó que en los tanques decantadores con fondo plano contienen mayor acumulación de residuos y su limpieza es más difícil, mientras que, en el decantador de fondo cónico, la acumulación de residuos es menor, en cuanto a el tiempo de duración de la solución en estos tanques depende de la disponibilidad de las tinas de cristalización.

2.4.3 Cristalización. Puesto que la empresa no cuenta con datos aproximados de caudales, flujos y velocidades de los desplazamientos de la solución del reactor hacia los tanques decantadores se realizaron los respectivos cálculos para esto.

Ésta etapa es alimentada por el flujo que proviene de los tanques decantadores hacia cada una de las seis tinas de cristalización, con las dimensiones de los

tanques decantadores se determinó el volumen de diseño y el volumen de operación.

Ecuación 23. Volumen de diseño del tanque decantador.

$$V = h * \pi * r^2$$
$$V = 3 \text{ m} * \pi * \left(\frac{2,310 \text{ m}}{2}\right)^2$$
$$V = 12,572889 \text{ m}^3$$

De acuerdo a las ecuaciones de diseño se tiene un volumen teórico de $12,5729 \text{ m}^3$, debido a las condiciones de operación de la empresa se trabaja con el 96% de la capacidad, lo cual da como resultado un volumen de $12,069 \text{ m}^3$, lo que indica que aproximadamente se opera con un volumen real de 12 m^3 , con el cual se determinara el caudal.

Se calculó el caudal asumiendo que se llena 1 tina en 40 minutos, pero se debe tener en cuenta que con una reacción se llenan 2 tinas por ende su duración total será de 80 minutos.

Ecuación 24. Caudal de tanque decantador a tina de cristalización.

$$Q = \frac{V}{t}$$
$$Q = \frac{12,000 \text{ m}^3}{4800 \text{ s}}$$
$$Q = 2,5x 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ecuación 25. Área transversal de tubería. (Decantadores a tinas).

$$A = \pi * r^2$$
$$A = \pi * (0,0254 \text{ m})^2$$
$$A = 2,0289x10^{-3} \text{ m}^2$$

A partir del cálculo del área transversal se puede determinar la velocidad de desplazamiento de la solución desde el tanque de decantador hacia las tinas de cristalización.

Ecuación 26. Velocidad de la solución en el tramo.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{2,5x 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{2,0289x10^{-3} m^2}$$

$$v = 1,23219 \frac{m}{s}$$

Para el inicio de esta fase el líquido posee una temperatura entre los 70 y 80°C e ingresa a seis tinajas de 3,346 x 2,750 m con una altura de 0,762 m y espesor de 3 cm, son llenadas a 3 cm del borde, se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente (25 - 18°C), agitando constantemente la solución desde el centro de la tina por medio de unas aspas (200 RPM) para evitar la formación de cristales demasiado grandes. Para acelerar el enfriamiento se ubicaron dos ventiladores por tina con una frecuencia de 3.400 RPM, a una distancia de 1 m sobre cada una de éstas. Este proceso tiene una duración de 12 horas.

Con el fin de calcular la cantidad de energía necesaria para llevar la solución a la temperatura de cristalización que debe ser menor a los 35°C, pues esta es donde se da origen a los primeros cristales, se usó la siguiente ecuación que corresponde a la cantidad de calor que pierde la mezcla para llegar a dicho estado.

Ecuación 27. Cantidad de calor que se pierde.

$$Q = Cp * m * \Delta t$$

Donde:

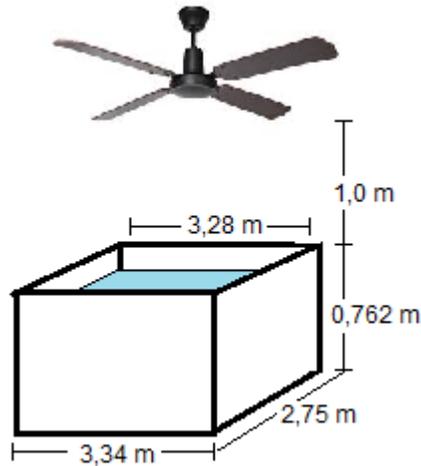
Q = Calor transferido.

m = Masa de la sustancia.

Δt = Incremento de temperatura que experimenta el cuerpo.

Cp = Capacidad calorífica.

Figura 14. Dimensiones tinas de cristalización.



Fuente: elaboración propia.

Calculo de la masa dentro de la tina:

Ecuación 28. Cálculo volumen en tinas de cristalización.

$$V = 3,28 \text{ m} * 2,69 \text{ m} * 0,732 \text{ m}$$
$$V = 6,4586 \text{ m}^3$$

Sí la densidad del sulfato de magnesio es igual a 2.660 kg/m^3 , entonces:

Ecuación 29. Cálculo teórico de la solución de Sulfato de Magnesio en la tina de cristalización.

$$m = 2.660 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6,4586 \text{ m}^3$$

$$m = 17.179,876 \text{ kg de sln de } \text{MgSO}_4$$

Ahora, para el cálculo de la capacidad calorífica del sulfato de magnesio heptahidratado a $48,25^\circ\text{C}$ (promedio entre la temperatura inicial (75°C) y final ($21,5^\circ\text{C}$) en las tinas), se usó la siguiente ecuación

Ecuación 30. Capacidad calorífica sulfato de Magnesio heptahidratado.

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5 + GT^6$$

Usando como constantes los valores de la tabla 14 ³³:

³³ KNOVEL, Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals. s.f.

Tabla 14. Constantes para el cálculo de Cp.

A	B	C	D	E	F	G
261,9548	-1,08614	0,005846666	-1,06005E-05	9,76619E-09	-4,57221E-12	8,58954E-16

Fuente: Knovel, Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals. s.f.

Entonces:

$$C_p = A + B(321,4) + C(321,4)^2 + D(321,4)^3 + E(321,4)^4 + F(321,4)^5 + G(321,4)^6$$

$$C_p = 254,358105 \frac{J}{mol * K} = 1.032,44 \frac{J}{kg * K}$$

Calculando la transferencia de calor:

$$Q = m * c_p * \Delta t$$

$$Q = 17.179,876 \text{ kg} * 1.032,44 \frac{J}{kg * K} * (294,65 - 348,15)K$$

$$Q = -948.939.728 \text{ J} = -948.939,728 \text{ kJ}$$

Los ventiladores ubicados en la parte superior de las tinas disipan el vapor al entorno, pero no ayudan directamente a la refrigeración de las tinas lo que genera mayor tiempo en la cristalización, alto consumo de energía eléctrica y menor cantidad de cristales, pues un enfriamiento más rápido permite mayor producción de cristales, es pertinente realizar una apropiada refrigeración para que el calor perdido se transfiera más rápido cuando la solución se enfríe apresuradamente alcanzando el equilibrio térmico y logrando un aumento en la producción de cristales. Es importante resaltar que en los cálculos de la transferencia de calor desarrollados en el presente documento se despreciaron las pérdidas por evaporación y por la eficiencia de la técnica.

Luego de 12 horas el sulfato de magnesio heptahidratado se lleva manualmente (ver figura 16) a la etapa de centrifugación, donde se removerá el exceso de agua.

Figura 15. Tina de cristalización.



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Operario en etapa de cristalización.



Fuente: elaboración propia.

Con el fin de evaluar la eficiencia de los ventiladores que actualmente tiene la empresa para el enfriamiento en el proceso de cristalización, se realizó una prueba la cual consistió en comparar el porcentaje de humedad de dos muestras de producto **expuesto** a los ventiladores durante 12 horas con dos muestras de producto que **no estuvieron expuestas** a los ventiladores durante el mismo tiempo, las cuales fueron extraídas directamente de las tinajas ubicadas en la planta, estas se encontraban a diferentes temperaturas como se observa en la tabla 15.

Esta prueba se realiza a nivel laboratorio donde inicialmente se pesó 15g de cada muestra de sulfato de magnesio heptahidratado y se colocaron en 4 crisoles respectivamente para posteriormente ser ingresadas a una estufa donde permanecieron por 2 horas a 100°C, finalmente al transcurrir este tiempo se extrajeron y se pesaron nuevamente, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 15. Ensayo de eficiencia de los ventiladores.

Ventiladores encendidos	Temperatura (°C)	Muestra inicial (g)	Muestra final (g)	% humedad removido
NO	37	15	11,40	24
SI	28	15	14,39	4,1
NO	37	15	7,61	49
SI	28	15	12,41	17

Fuente: elaboración propia.

El resultado de este experimento evidencia que las muestras que estuvieron expuestas a los ventiladores poseen menor humedad, lo que quiere decir que los ventiladores si ayudan a la refrigeración, aunque este sistema podría ser mejor.

Después de realizar el diagnóstico respectivo para esta etapa se observó que existe una ineficiencia en la refrigeración de cada una de las tinas de cristalización, lo cual genera que los tiempos sean amplios, a su vez no existe un mantenimiento periódico y las tinas se ven afectadas por corrosión, el número de tinas no es suficiente para el volumen de producción que pueden llegar a tener y es por esto que la solución debe permanecer más tiempo en los decantadores, las fallas humanas también se presentan debido a que los operarios están en contacto directo con el producto pues al ingresar en las tinas manipulan el producto inadecuadamente generando la posible contaminación.

2.4.4 Centrifugación. En este proceso actualmente no está estipulado un porcentaje de humedad requerido a la salida de la centrifuga, los operarios realizan este procedimiento durante 5 minutos en distintas centrifugas con las siguientes características.

Tabla 16. Características de las centrifugas.

Cantidad	Capacidad (kg)	Rpm	Potencia Del Motor (HP)
1	150	1.200	10
3	125	1.750	10
1	50	1.708	3

Fuente: elaboración propia.

Para determinar el porcentaje de agua removido en cada una de las centrifugas se pesó el producto que ingresa y de la misma forma después de 5 minutos se pesó a la salida, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 17. Porcentaje de agua removida en la etapa de centrifugación.

Capacidad (kg)	Rpm	Cantidad a la entrada (kg)	Cantidad a la salida (kg)	Porcentaje Removido (%)
150	1.200	138,2	113,3	18
125	1.750	199,69	142	28
50	1.708	48,34	37,65	22

Fuente: elaboración propia.

Después de finalizar los 5 minutos se pasa el producto terminado a la etapa de empaque.

Como el producto terminado se somete durante 5 minutos en las centrifugas sin importar las RPM de las mismas, se recomienda que cada una de las centrifugas tengan igual número de RPM y así el producto terminado tendrá una humedad más homogénea. Es por esto que se realizaron los cálculos respectivos para que el sulfato de magnesio heptahidratado al finalizar ésta etapa tenga la misma humedad en cualquiera de las centrifugas, se hace una modificación del tiempo de duración en cada una de éstas, pues estas no tienen opción de modificar las RPM.

Para centrífuga con capacidad de 150 kg:

Ecuación 31. Cálculo de RPM en 5 minutos para centrifuga de 150 kg.

$$RPM \text{ en } 5 \text{ min} = \frac{\# \text{ Vueltas}}{1 \text{ min}} * 5 \text{ min}$$

$$RPM \text{ en } 5 \text{ min} = \frac{1.200 \text{ vueltas}}{1 \text{ min}} * 5 \text{ min}$$

$$RPM \text{ en } 5 \text{ minutos} = 6.000 \text{ RPM}$$

Para centrifugas con capacidad de 125 kg:

Ecuación 32. Cálculo del tiempo necesario para centrifugas de 125 kg.

$$Tiempo = \frac{6.000 \text{ RPM} * 1 \text{ min}}{1.750 \text{ RPM}}$$

$$Tiempo = 3,43 \text{ minutos}$$

Para centrifuga con capacidad de 50 kg:

Ecuación 33. Cálculo del tiempo necesario para centrifuga de 50 kg.

$$Tiempo = \frac{6.000 \text{ RPM} * 1 \text{ min}}{1.708 \text{ RPM}}$$

$$Tiempo = 3,51 \text{ minutos}$$

Después de finalizar el diagnóstico correspondiente a esta etapa, se evidencia que existe una ineficiencia en el proceso, pues la humedad del producto terminado no es homogénea ni controlada, ya que las revoluciones en cada una de las centrifugas no se pueden manipular debido a las características del equipo por lo tanto se debe modificar el tiempo de duración en cada una de ellas como se expuso anteriormente, en cuanto al mantenimiento de estas no se realiza periódicamente, lo que conlleva al no cumplimiento de la ficha técnica establecida por el fabricante.

2.4.5 Empaque. En esta etapa del proceso en HEBESTA S.A.S, se realizó la inspección del número de costales y las condiciones de higiene iniciales (orden, limpieza, herramientas, etc.) para el posterior seguimiento al operador encargado de realizar el empaque de sulfato de magnesio heptahidratado en forma de cristales en los costales. Inicialmente se adicionan 25 kg exactos por bulto, lo cual se evidencio a partir del pesaje usando una báscula digital, consecutivamente se desarrolla el sellado respectivo y correcto de cada uno de ellos. Esto se realiza en una zona dentro de las instalaciones de la empresa la cual no es apta para el desarrollo de esta etapa, puesto que el producto terminado se encuentra en contacto con polución, lo que puede llegar a afectarlo directamente, esto podría generar la devolución del lote y la cancelación del pedido.

Es de gran importancia ofrecer un fácil manejo, para cualquier tipo de comprador o consumidor, es decir, se debe brindar un empaque ergonómico y que sobresalga frente a la competencia sin descuidar los costos. Así mismo, es indispensable tener en cuenta que el producto empaquetado ($MgSO_4 * 7 H_2O$) debe conservar sus propiedades, por tanto, el empaque debe tener características tales como: resistencia a la compresión, vibración, caídas, choque lateral, humedades y temperaturas.

Figura 17. Etapa de empaque.



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Sulfato de Magnesio empacado.



Fuente: elaboración propia.

2.5 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL PRODUCTO TERMINADO

Con el fin de determinar la calidad del producto producido actualmente en la empresa y comparar las propiedades como solubilidad, granulometría y pH con la norma NTC 164:2007 denominada Fertilizantes, Sulfato de Magnesio que establece los requisitos y métodos de ensayo para este producto usado en la aplicación al suelo y la densidad aparente se comparó respecto al Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (FDC) que desde 1.974 se ha dedicado a mantener la seguridad agrícola a través del desarrollo de tecnología . Se realizaron los ensayos respectivos, comprobando si se está cumpliendo a cabalidad estas condiciones, para obtener un producto de calidad, competitivo frente a otros fertilizantes nacionales e internacionales.

2.5.1 Densidad. Para determinar la densidad aparente del sulfato de magnesio heptahidratado se utilizó el método de la probeta que consta en sumergir 10 g del producto cuidadosamente en una probeta que contiene un volumen de agua, luego se lee el volumen desplazado y se aplica la ecuación 34.

Ecuación 34. Densidad aparente.

$$Densidad\ Aparente = \frac{Masa}{Volumen\ Desplazado}$$

Aplicando el método de la probeta para determinar la densidad aparente del sulfato de magnesio heptahidratado a dos muestras A y B, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 18. Densidad aparente del producto terminado, muestra A.

A			
Muestra	Masa (g)	Volumen desplazado (ml)	Densidad Aparente (g/ml)
1	10	6	1,67
2	10	6	1,67
3	10	6	1,67

Fuente: elaboración propia.

$$Densidad\ Aparente = \frac{10\ g}{6\ ml}$$

$$Densidad\ Aparente = 1,67\ g/ml$$

Tabla 19. Densidad aparente del producto terminado, muestra B.

B			
Muestra	Masa (g)	Volumen desplazado (ml)	Densidad Aparente (g/ml)
1	10	5,5	1,81
2	10	6	1,67
3	10	5,8	1,72

Fuente: elaboración propia.

$$Densidad\ Aparente = \frac{10\ g}{5,5\ ml}$$

$$Densidad\ Aparente = 1,82\ g/ml$$

Promedio densidad aparente muestra B: 1,74 g/ml

En la tabla 18 y 19 se exponen los resultados obtenidos experimentalmente a 2 muestras A y B seleccionadas de dos lotes diferentes, a cada una de esas muestras se les realizó la medición de la densidad aparente, dando como resultado 1,67 g/ml para la muestra A y 1,82 g/ml para la muestra B, se puede evidenciar que la densidad varía de un lote a otro, debido a que los tiempos y la cantidad de materia prima suministrada son diferentes en cada reacción ya que no existe una correcta dosificación en esta etapa, por lo tanto esta característica en el producto terminado no será constante.

Por otro lado, según el Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (FDC) la densidad aparente del sulfato de magnesio debe estar en los rangos de 1,52 - 1,57 g/ml ³⁴ y comparando estos valores con los obtenidos experimentalmente, estos últimos se encuentran fuera del rango por lo tanto el producto no cumple con este requisito. El incumplimiento de estos rangos, y que la densidad varíe en el producto terminado, tiene como consecuencias para la empresa en determinar el tamaño de los empaques y la capacidad de almacenamiento en bodegas o en vehículos con el fin de que el producto se mantenga en las mejores condiciones y para el cliente en determinar nuevamente la dosis necesaria para el riego según las condiciones del suelo.

2.5.2 Solubilidad. La solubilidad de un fertilizante es la cantidad máxima que puede ser disuelta completamente en un volumen determinado de agua, a partir de ésta propiedad se puede determinar la intensidad con que se disuelve el fertilizante en el suelo.

Se determinó la solubilidad del sulfato de magnesio heptahidratado a partir del método gravimétrico el cuál arrojó como resultado:

Tabla 20. Resultados solubilidad del Sulfato de Magnesio heptahidratado.

	Resultado	Unidades
Solubilidad Max 20°C	120	g/100ml

Fuente: elaboración propia.

Según la norma NTC164 la solubilidad de la sustancia pura anhidra en 100 g de agua a 20°C es de 33,7 g/100ml, el sulfato de magnesio en estudio es heptahidratado por lo tanto es muy soluble, lo que es bastante favorable pues los nutrientes que proporciona son rápidamente liberados y absorbidos por la planta con mayor facilidad.

³⁴ GUERRERO, R. Propiedades generales de los fertilizantes. IFDC. p.18.

2.5.3 Granulometría. Es una de las propiedades más importantes la cual adquiere el producto en la etapa de cristalización debido a la constante agitación en ésta. Propiedad que depende directamente de la solubilidad del fertilizante, con esto se puede determinar si el tamaño actual de las partículas y su distribución son apropiados, por tanto, entre menor sea el tamaño de partícula es más apropiado para fertilizantes poco solubles, en este caso el sulfato de magnesio por ser heptahidratado es muy soluble como se pudo observar anteriormente. Esto facilita una disolución rápida en el suelo y las plantas tienen mayor aprovechamiento del fertilizante.

Es por esto que se realizó el análisis granulométrico por medio de una prueba de tamizado, encontrando el tamaño más grande y el más pequeño de la muestra de producto final definiendo los límites dentro de los cuales se encuentra, para determinar el diámetro de partícula del sulfato de Magnesio y verificar si es apropiado de acuerdo a la solubilidad.

El análisis se inició con la selección adecuada de las mallas 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 y 25, el criterio de selección de las mallas se hizo con el fin de que en la primera malla (malla 5) y en la última malla (malla 25) no quedara más del 12% del producto evaluado.

Figura 19. Prueba tamizado Sulfato de Magnesio.



Fuente: elaboración propia.

Se tomaron 2 muestras de 200 g de dos lotes de sulfato de magnesio heptahidratado producido en HEBESTA S.A.S. y se sometieron durante 15 minutos cada una a la prueba de tamizado, tiempo suficiente para que la separación de los cristales sea eficiente, es decir que no haya más del 10% de la masa ingresada en

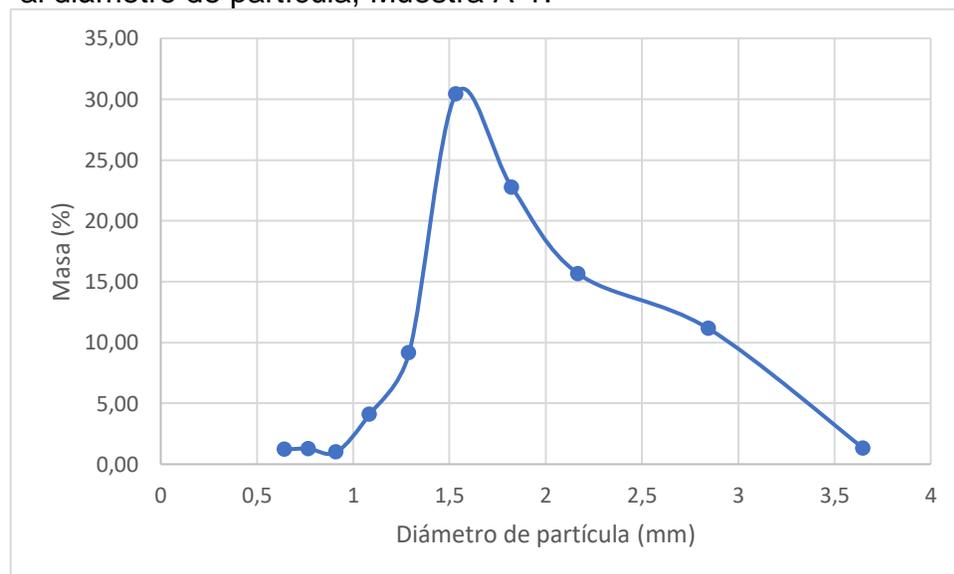
el primer tamiz ni en los fondos³⁵, a partir de esto se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 21. Resultados Tamizado lote A muestra 1.

Muestra A-1								
Malla	Abertura (mm)	Masa (g)	Dpi (mm)	Xi	Xi retenido	Xi*Dpi	Xi/Dpi	Xi/Dpi ³
Malla 5	3,965							
Malla 6	3,334	2,62	3,65	0,11	0,11	0,41	0,03	0,00
Malla 8	2,357	22,30	2,85	0,16	0,27	0,45	0,06	0,01
Malla 10	1,982	31,30	2,17	0,23	0,51	0,50	0,11	0,02
Malla 12	1,667	45,50	1,82	0,31	0,82	0,57	0,17	0,05
Malla 14	1,402	60,90	1,53	0,09	0,91	0,14	0,06	0,03
Malla 16	1,179	18,30	1,29	0,04	0,95	0,05	0,03	0,02
Malla 18	0,991	8,20	1,09	0,01	0,96	0,01	0,01	0,01
Malla 20	0,833	1,99	0,91	0,01	0,97	0,01	0,01	0,02
Malla 25	0,701	2,56	0,77	0,01	0,99	0,01	0,02	0,03
Fondos	0,589	2,43	0,65	0,01	1,00	0,01	0,02	0,05
Sumatoria		196,11	16,72			2,18	0,52	0,23

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2. Porcentaje de Masa retenida por tamiz. con respecto al diámetro de partícula, Muestra A-1.



Fuente: elaboración propia.

³⁵ NTG 41010-h1. Método de ensayo. Análisis granulométrico por tamices. p. 9.

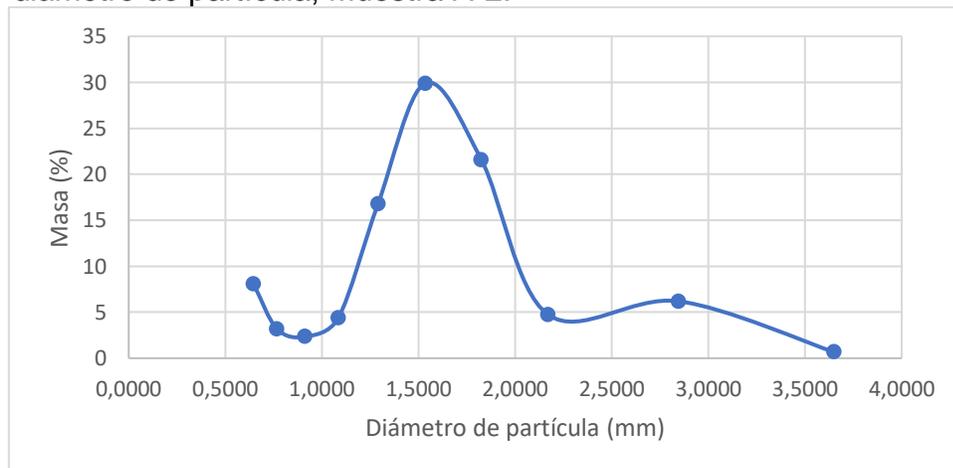
Se puede evidenciar en la gráfica 2 que para la muestra A-1 el 30,45% de la masa tiene un diámetro de partícula de 1,535 mm, cantidad retenida en la malla 14 que posee una abertura de 1,402 mm, seguido por el 22,75% retenido en la malla 12 la cual tiene una abertura de 1,667 mm. En la tabla 21 se puede comprobar que para la malla 5 y los fondos la cantidad que se retuvo fue menor al 10% por lo tanto el experimento es válido según la norma NTG 41010-h1 para análisis granulométrico de tamices.

Tabla 22. Resultados Tamizado lote A muestra 2.

Muestra A-2								
Malla	Abertura (mm)	Masa (g)	Dpi (mm)	Xi	Xi retenido	Xi*Dpi	Xi/Dpi	Xi/Dpi ³
Malla 5	3,965							
Malla 6	3,334	1,35	3,65	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00
Malla 8	2,357	12,40	2,85	0,06	0,07	0,18	0,02	0,00
Malla 10	1,982	9,50	2,17	0,05	0,12	0,11	0,02	0,00
Malla 12	1,667	43,20	1,82	0,22	0,34	0,40	0,12	0,04
Malla 14	1,402	59,80	1,53	0,31	0,64	0,47	0,20	0,08
Malla 16	1,179	33,60	1,29	0,17	0,82	0,22	0,13	0,08
Malla 18	0,991	8,80	1,09	0,04	0,86	0,05	0,04	0,04
Malla 20	0,833	4,70	0,91	0,02	0,88	0,02	0,03	0,03
Malla 25	0,701	6,40	0,77	0,03	0,92	0,03	0,04	0,07
Fondos	0,589	16,20	0,65	0,08	1,00	0,05	0,13	0,31
Sumatoria		195,95				1,55	0,74	0,66

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 3. Porcentaje de Masa retenida por tamiz con respecto al diámetro de partícula, Muestra A-2.



Fuente: elaboración propia.

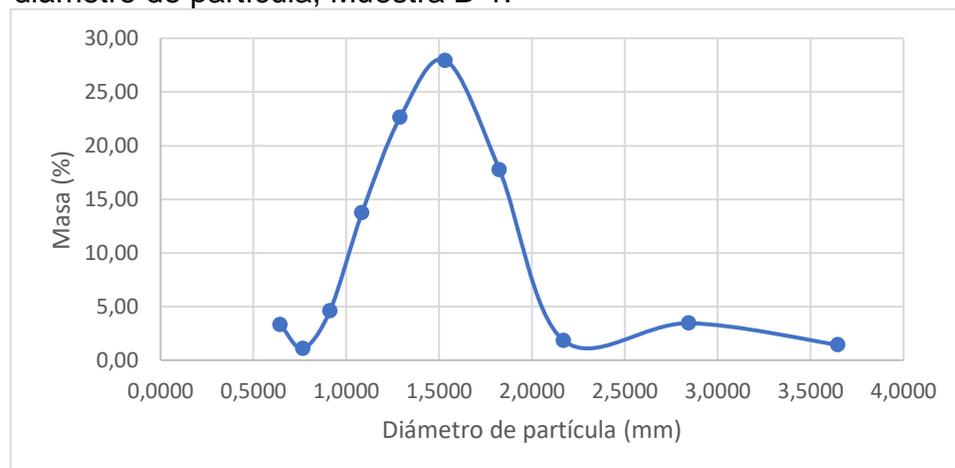
Se puede evidenciar en la gráfica 3 que para la muestra A-2 el 29,9% de la masa tiene un diámetro de partícula de 1,535 mm, cantidad retenida en la malla 14 que posee una abertura de 1,402 mm, seguido por el 21,6% retenido en la malla 12 la cual tiene una abertura de 1,667 mm. En la tabla 22 se puede comprobar que para la malla 5 y los fondos la cantidad que se retuvo fue menor al 10% por lo tanto el experimento es válido según la norma NTG 41010-h1 para análisis granulométrico de tamices.

Tabla 23. Resultados Tamizado lote B muestra 1.

Muestra B-1								
Malla	Abertura (mm)	Masa (g)	Dpi (mm)	Xi	Xi retenido	Xi*Dpi	Xi/Dpi	Xi/Dpi ³
Malla 5	3,965							
Malla 6	3,334	2,83	3,65	0,01	0,01	0,05	0,00	0,00
Malla 8	2,357	6,90	2,85	0,04	0,05	0,10	0,01	0,00
Malla 10	1,982	3,70	2,17	0,02	0,07	0,04	0,01	0,00
Malla 12	1,667	35,50	1,82	0,18	0,25	0,33	0,10	0,03
Malla 14	1,402	55,90	1,53	0,29	0,54	0,44	0,19	0,08
Malla 16	1,179	45,30	1,29	0,23	0,77	0,30	0,18	0,11
Malla 18	0,991	27,50	1,09	0,14	0,91	0,15	0,13	0,11
Malla 20	0,833	9,20	0,91	0,05	0,96	0,04	0,05	0,06
Malla 25	0,701	2,20	0,77	0,01	0,97	0,01	0,01	0,02
Fondos	0,589	6,60	0,65	0,03	1,00	0,02	0,05	0,13
Sumatoria		195,63				1,49	0,74	0,54

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. Porcentaje de Masa retenida por tamiz con respecto al diámetro de partícula, Muestra B-1.



Fuente: elaboración propia.

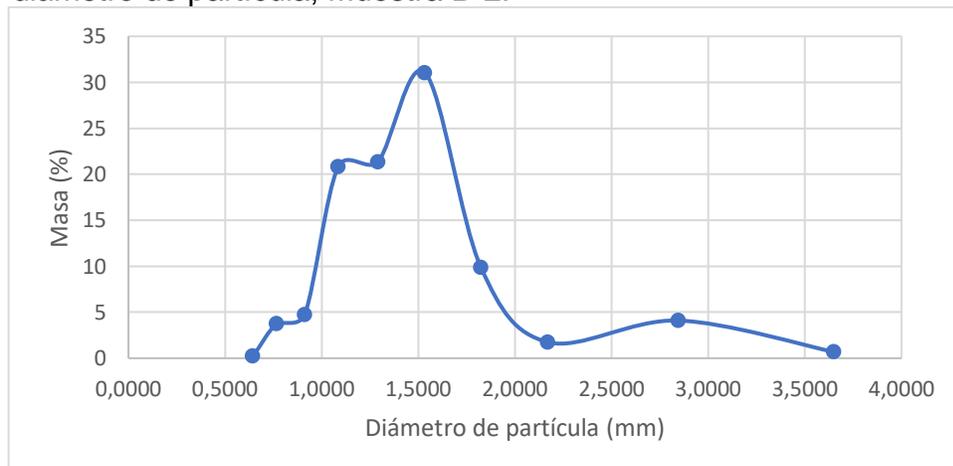
Se puede evidenciar en la gráfica 4 que para la muestra B-1 el 27,95% de la masa tiene un diámetro de partícula de 1,535 mm, cantidad retenida en la malla 14 que posee una abertura de 1,402 mm, seguido por el 22,65% retenido en la malla 16 la cual tiene una abertura de 1,179 mm. En la tabla 23 se puede comprobar que para la malla 5 y los fondos la cantidad que se retuvo fue menor al 10% por lo tanto el experimento es válido según la norma NTG 41010-h1 para análisis granulométrico de tamices.

Tabla 24. Resultados Tamizado lote B muestra 2.

Muestra B-2								
Malla	Abertura (mm)	Masa (g)	Dpi (mm)	Xi	Xi retenido	Xi*Dpi	Xi/Dpi	Xi/Dpi^3
Malla 5	3,965							
Malla 6	3,334	1,38	3,65	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00
Malla 8	2,357	8,20	2,85	0,04	0,05	0,12	0,01	0,00
Malla 10	1,982	3,50	2,17	0,02	0,07	0,04	0,01	0,00
Malla 12	1,667	19,70	1,82	0,10	0,17	0,18	0,05	0,02
Malla 14	1,402	62,10	1,53	0,32	0,48	0,48	0,21	0,09
Malla 16	1,179	42,70	1,29	0,22	0,70	0,28	0,17	0,10
Malla 18	0,991	41,60	1,09	0,21	0,91	0,23	0,20	0,17
Malla 20	0,833	9,50	0,91	0,05	0,96	0,04	0,05	0,06
Malla 25	0,701	7,46	0,77	0,04	1,00	0,03	0,05	0,08
Fondos	0,589	0,48	0,65	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01
Sumatoria		196,62				1,43	0,76	0,53

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 5. Porcentaje de Masa retenida por tamiz con respecto al diámetro de partícula, Muestra B-2.



Fuente: elaboración propia

Se puede evidenciar en la gráfica 5 que para la muestra B-2 el 31,05% de la masa tiene un diámetro de partícula de 1,535 mm, cantidad retenida en la malla 14 que posee una abertura de 1,402 mm, seguido por el 21,35% retenido en la malla 16 la cual tiene una abertura de 1,179 mm. En la tabla 24 se puede comprobar que para la malla 5 y los fondos la cantidad que se retuvo fue menor al 10% por lo tanto el experimento es válido según la norma NTG 41010-h1 para análisis granulométrico de tamices.

A partir de los resultados obtenidos de las tablas 21 a la 24, se puede realizar la determinación de los diámetros medios, con el objetivo de comprobar la homogeneidad del producto terminado, como se observa a continuación:

2.5.3.1 Diámetros medios. Con el fin de determinar el diámetro más preciso del sulfato de Magnesio heptahidratado, se calcularán cuatro diámetros diferentes por muestra, de los cuales se omitirá el diámetro que se encuentre fuera del rango permitido por la norma NTG 41010-h1 y se hará un promedio con los tres diámetros seleccionados, esto se realiza con el objetivo de tomar los diámetros más representativos³⁶ y hacer los cálculos más precisos.

2.5.3.1.1 Diámetros medios Muestra A-1

Ecuación 35. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra A-1.

$$Ds = Dp = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_{pi}}}$$

$$Ds = \frac{1}{0,5182} = 1,93 \text{ mm}$$

Ecuación 36. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra A-1.

$$Dm = \sum_{i=1}^n x_i * D_{pi}$$

$$Dm = 2,18 \text{ mm}$$

Ecuación 37. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra A-1.

$$Dv = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_{pi}^3}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

³⁶ ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE 103101: 1995, análisis granulométrico por tamizado. AENOR, 1995.

$$Dv = \frac{1}{(0,23)^{\frac{1}{3}}} = 1,63 \text{ mm}$$

Ecuación 38. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra A-1.
Ni: (ver ANEXO 21)

$$Da = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * Dpi}{\sum_{i=1}^n Ni}$$

$$Da = \frac{2.995,54}{22.831,96} = 0,1312 \text{ cm} = 1,312 \text{ mm}$$

Para valores de las sumatorias de Ni*Dpi y Ni ver anexo 22

El valor más desfasado corresponde al diámetro medio aritmético (Da), por lo tanto, el diámetro promedio para ésta muestra es de 1,91 mm.

2.5.3.1.2 Diámetros medios Muestra A-2

Ecuación 39. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra A-2.

$$Ds = Dp = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{xi}{Dpi}}$$

$$Ds = \frac{1}{0,7375} = 1,35 \text{ mm}$$

Ecuación 40. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra A-2.

$$Dm = \sum_{i=1}^n xi * Dpi$$

$$Dm = 1,55 \text{ mm}$$

Ecuación 41. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra A-2.

$$Dv = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{xi}{Dpi^3}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$Dv = \frac{1}{(0,65)^{\frac{1}{3}}} = 1,151 \text{ mm}$$

Ecuación 42. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra A-2.

$$Da = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * Dpi}{\sum_{i=1}^n Ni}$$
$$Da = \frac{4.705}{48.283,7} = 0,0974 \text{ cm} = 0,974 \text{ mm}$$

Para valores de las sumatorias de Ni*Dpi y Ni ver anexo 23

El valor más desfasado corresponde al diámetro medio de masa (Dm), por lo tanto, el diámetro promedio para ésta muestra es de 1,16 mm.

2.5.3.1.3 Diámetros medios Muestra B-1

Ecuación 43. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra B-1.

$$Ds = Dp = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{xi}{Dpi}}$$
$$Ds = \frac{1}{0,74} = 1,35 \text{ mm}$$

Ecuación 44. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra B-1.

$$Dm = \sum_{i=1}^n xi * Dpi$$
$$Dm = 1,49 \text{ mm}$$

Ecuación 45. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra B-1.

$$Dv = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{xi}{Dpi^3}\right)^{\frac{1}{3}}}$$
$$Dv = \frac{1}{(0,54)^{\frac{1}{3}}} = 1,23 \text{ mm}$$

Ecuación 46. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra B-1.

$$Da = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * Dpi}{\sum_{i=1}^n Ni}$$
$$Da = \frac{4.417}{39.941,3} = 0,111 \text{ cm} = 1,11 \text{ mm}$$

Para valores de las sumatorias de $Ni * Dpi$ y Ni ver anexo 24

El valor más desfasado corresponde al diámetro medio de masa (Dm), por lo tanto, el diámetro promedio para ésta muestra es de 1,23 mm.

2.5.3.1.4 Diámetros medios Muestra B-2

Ecuación 47. Diámetro medio Superficie-Volumen (Ds) Muestra B-2.

$$Ds = Dp = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{xi}{Dpi}}$$
$$Ds = \frac{1}{0,75} = 1,32 \text{ mm}$$

Ecuación 48. Diámetro medio de masa (Dm) Muestra B-2.

$$Dm = \sum_{i=1}^n xi * Dpi$$
$$Dm = 1,43 \text{ mm}$$

Ecuación 49. Diámetro medio de volumen (Dv) Muestra B-2.

$$Dv = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{xi}{Dpi^3}\right)^{\frac{1}{3}}}$$
$$Dv = \frac{1}{(0,53)^{\frac{1}{3}}} = 1,23 \text{ mm}$$

Ecuación 50. Diámetro medio aritmético (Da) Muestra B-2.

$$Da = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * Dpi}{\sum_{i=1}^n Ni}$$
$$Da = \frac{4.526}{39.263,13} = 0,115 \text{ cm} = 1,15 \text{ mm}$$

Para valores de las sumatorias de $Ni * Dpi$ y Ni ver anexo 25

El valor más desfasado corresponde al diámetro medio de masa (Dm), por lo tanto, el diámetro promedio para ésta muestra es de 1,24 mm.

Haciendo un resumen de los diámetros promedio de las muestras analizadas tenemos la siguiente tabla:

Tabla 25. Diámetros promedio de las muestras A y B.

Muestra	A-1	A-2	B-1	B-2
Diámetro promedio (mm).	1,91	1,16	1,23	1,24

Fuente: elaboración propia.

El diámetro del producto terminado oscila entre 1,1 y 1,9 mm, lo que es bastante favorable debido a que a menor tamaño de partícula mayor efectividad y aprovechamiento por parte de la planta ³⁷, el tamaño del gránulo se define en la etapa de cristalización pues a mayor agitación menor es el tamaño del gránulo, sin embargo, el efecto de la granulometría depende de distintos factores como las características del suelo y la especie cultivada, es por esto que según la norma NTC:2007 el tamaño de partícula se establecerá por convenio entre el fabricante y el comprador.

2.5.4 pH del sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Es indispensable la medición de esta propiedad, pues el uso de fertilizantes puede cambiar el pH del suelo.

La medición del pH se hizo a partir del papel indicador a 2 muestras de dos lotes diferentes de Sulfato de Magnesio heptahidratado, cuyo resultado arrojó:

Tabla 26. Resultado índice de acidez y alcalinidad.

Lote	Muestra	pH
A	1	5
	2	6
B	1	5,5
	2	6

Fuente: elaboración propia.

El pH del sulfato de magnesio heptahidratado se mantiene en un rango de 5 a 6, lo que quiere decir que es un fertilizante ligeramente ácido, propiedad que no varía significativamente de un lote a otro. Es importante tener en cuenta esta característica debido que al aplicar varias veces consecutivas el fertilizante durante un periodo prolongado de tiempo, podría acidificar el suelo a tal punto de estropear la productividad, es por esto que se debe llevar un control y evitar problemas a largo plazo.

³⁷ NAVARRO, Gines. Fertilizantes: Química y acción. p.124.

2.6 DIAGRAMA PARETO

A continuación, se presenta el diagrama Pareto para los defectos identificados en el proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado correspondientes a una inspección hecha durante 4 días. Cada defecto está ordenado de mayor (izquierda) a menor (derecha), donde se puede evidenciar el porcentaje acumulado de la participación de cada defecto en el proceso de producción.

La calificación de cada falla se hizo según los siguientes parámetros:

Tabla 27. Calificación para la elaboración del Pareto.

Frecuencia	Calificación
Muy alto	10 - 9
Alto	8 - 7
Medio	6 - 5
Bajo	4 - 3
Muy bajo	2-1
Ninguna	0

Fuente: elaboración propia

Este tipo de diagrama ayuda a identificar las principales causas que generan un problema, para poder tomar acciones correctivas que contribuyan a reducir este último partiendo desde aspectos prioritarios³⁸.

Para identificar cada una de las fallas que se presentan en las etapas del proceso, se realizó un diagrama de Pareto para cada una de ellas, donde se tendrán en cuenta las fallas que se encuentran por encima de la línea naranja de cada una de las gráficas.

³⁸ GALGANO, Alberto. Los siete instrumentos de la calidad total. Madrid, España: Díaz de Santos, 1995.

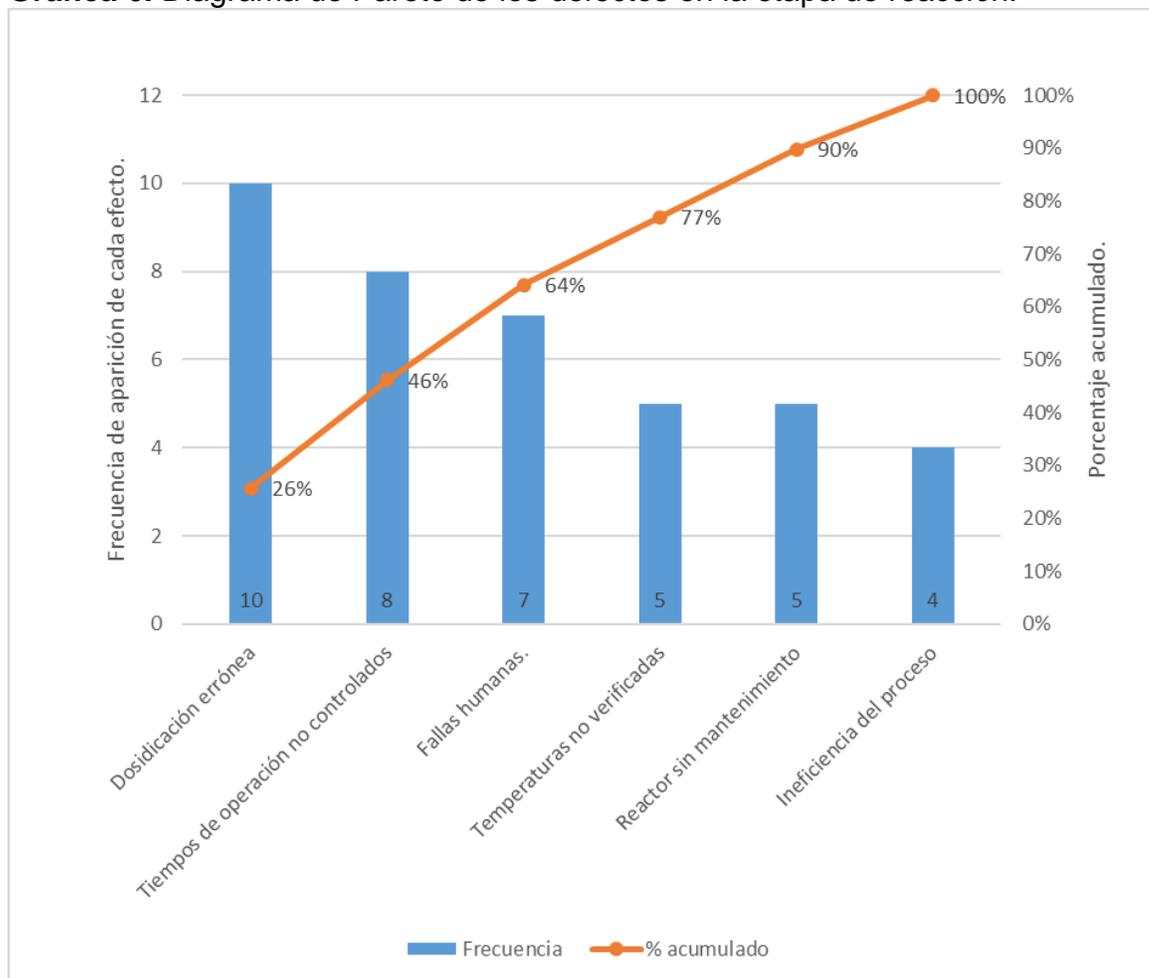
2.6.1 Diagrama de Pareto para la etapa de reacción.

Tabla 28. Frecuencia de las fallas en la etapa de reacción.

Problemas	Frecuencia	% acumulado
Dosificación errónea	10	26%
Tiempos de operación no controlados	8	46%
Fallas humanas.	7	64%
Temperaturas no verificadas	5	77%
Reactor sin mantenimiento	5	90%
Ineficiencia del proceso	4	100%

Fuente: elaboración propia

Gráfica 6. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de reacción.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la anterior gráfica, el defecto más recurrente de los datos corresponde a la dosificación errónea, tiene una participación del 26% sobre el total

de los defectos. Este defecto se debe inicialmente al método, pues la empresa no cuenta con una dosificación exacta que evite el uso inadecuado de las materias primas, este método tampoco garantiza que la reacción tenga la misma eficiencia cada vez que se lleva a cabo, pues algunas veces se agrega más cantidad de materia prima que otras, por lo tanto, las propiedades del producto terminado pueden variar en cada lote.

El segundo defecto más recurrente corresponde a los tiempos de operación que no son controlados, el cual tiene una participación del 20% sobre el total de los defectos, al igual que el anterior se debe al método empírico pues controlan la reacción visualmente sin tener en cuenta tiempo alguno.

Finalmente, el tercer efecto más recurrente en ésta etapa son las fallas humanas, el cual es responsable del 18% del total de los defectos, esta falla se presenta porque el operario debe realizar distintas tareas en esta etapa que implican exactitud, como por ejemplo llenar el tanque dosificador al nivel adecuado o agregar igual cantidad de óxido de magnesio. Cada operario tiene una forma distinta de llevar a cabo la reacción por lo tanto esto puede afectar directamente las propiedades del producto terminado.

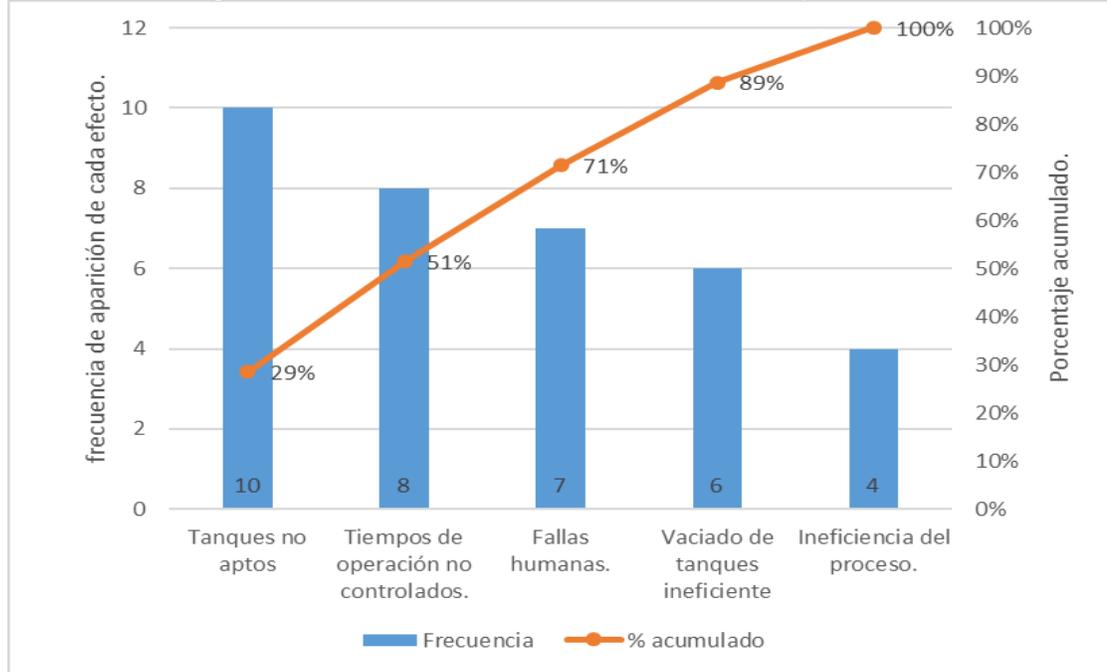
2.6.2 Diagrama de Pareto para la etapa de decantación.

Tabla 29. Frecuencia de las fallas en la etapa de decantación.

Problemas	Frecuencia	% acumulado
Tanques no aptos	10	29%
Tiempos de operación no controlados.	8	51%
Fallas humanas.	7	71%
Vaciado de tanques ineficiente	6	89%
Ineficiencia del proceso.	4	100%

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 7. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de decantación.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al diagrama de Pareto para ésta etapa, el defecto más frecuente son los tanques de decantación no aptos con un 29% de participación sobre el total de los defectos, esto se debe a que el diseño plano del fondo de los tanques dificulta el vaciado total de los mismos pues quedan residuos difíciles de extraer; actualmente la empresa no tiene un plan de mantenimiento de los tanques que garantice la limpieza y buen estado de éstos.

Como segundo defecto en ésta etapa y con una participación del 22% sobre el total de los defectos se encuentran los tiempos de operación que no son controlados, el tiempo de duración de la mezcla en el tanque depende de la disponibilidad de tinas de la etapa de cristalización, pues si están totalmente ocupadas la mezcla debe permanecer durante más tiempo en los tanques de decantación.

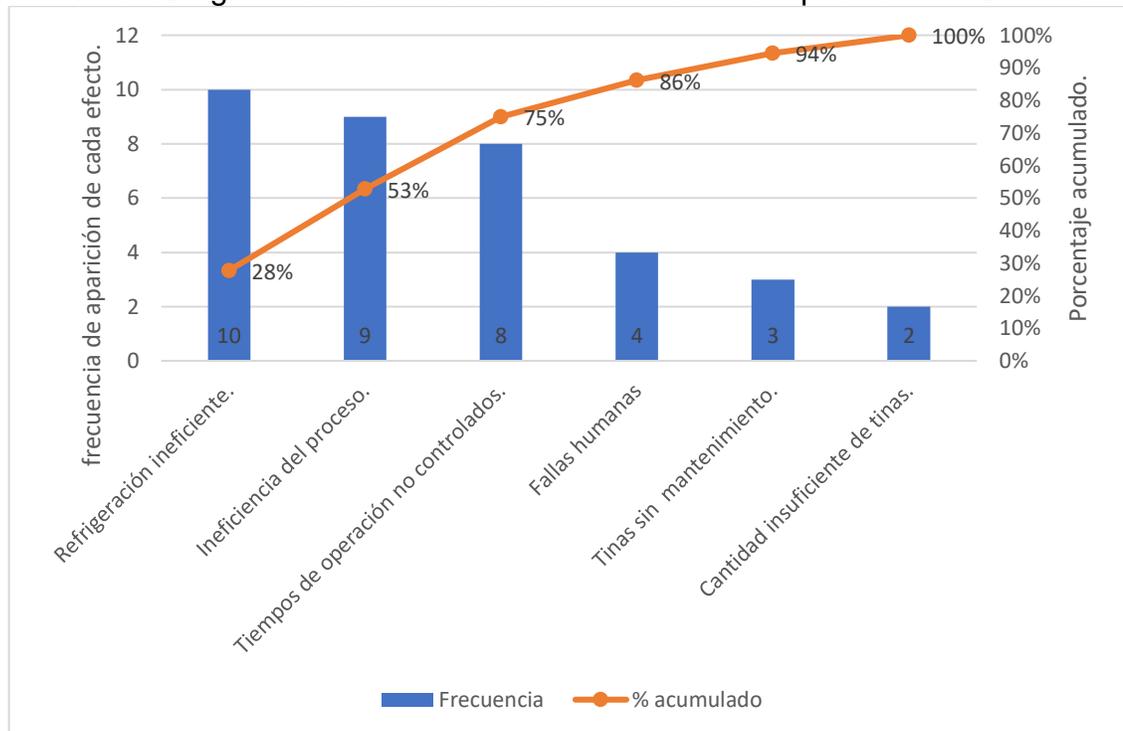
2.6.3 Diagrama de Pareto para la etapa de cristalización.

Tabla 30. Frecuencia de las fallas en la etapa de cristalización.

Problemas	Frecuencia	% acumulado
Refrigeración ineficiente.	10	28%
Ineficiencia del proceso.	9	53%
Tiempos de operación no controlados.	8	75%
Fallas humanas	4	86%
Tinas sin mantenimiento.	3	94%
Cantidad insuficiente de tinas.	2	100%

Fuente: elaboración propia

Gráfica 8. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de cristalización.



Fuente: elaboración propia.

La gráfica anterior muestra como defecto más recurrente la refrigeración ineficiente con una participación del 28% sobre el total de los defectos. Esto se debe a que actualmente la etapa de cristalización se realiza a temperatura ambiente, teniendo como única alternativa de refrigeración unos ventiladores donde su única función es disipar el vapor que genera la mezcla caliente más no ayuda a reducir la temperatura rápidamente, por lo tanto, la etapa se lleva a cabo durante un largo tiempo.

Por otra parte, la ineficiencia del proceso es el segundo defecto más frecuente con una participación del 25% sobre el total de los defectos, esto es debido al proceso empírico en el cual se basa la empresa, pues el operario es quien realiza el vaciado de las tinas como se observa en la figura 16 y en este proceso se pueden generar pérdidas.

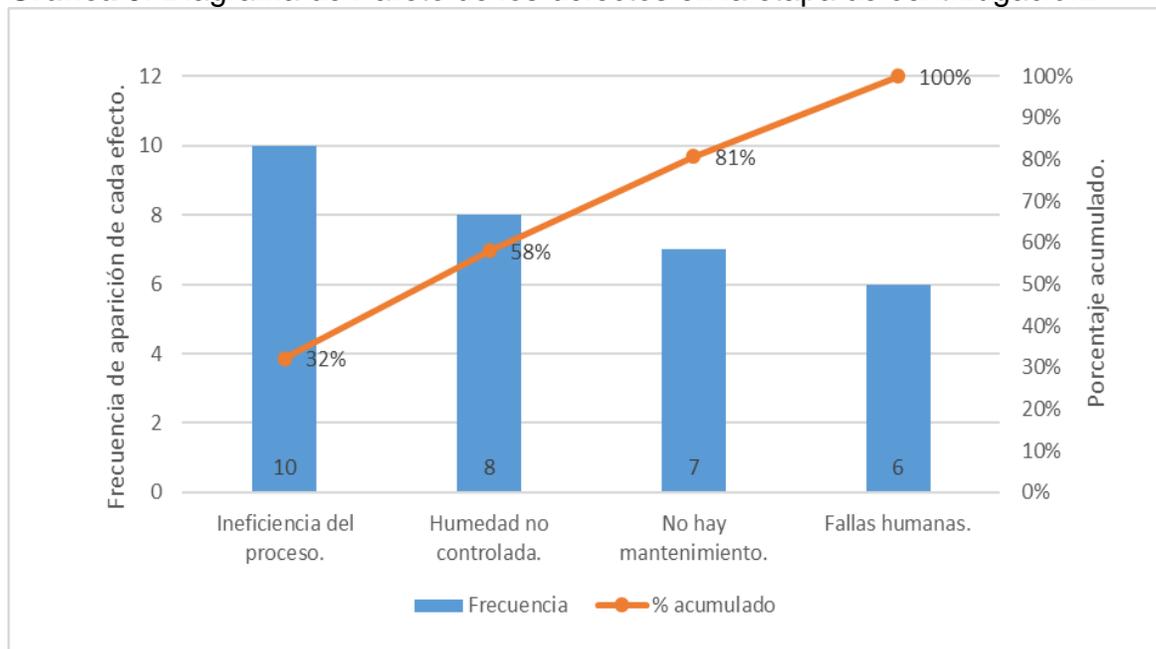
2.6.4 Diagrama de Pareto para la etapa de centrifugación.

Tabla 31. Frecuencia de las fallas en la etapa de centrifugación.

Problemas	Frecuencia	% acumulado
Ineficiencia del proceso.	10	32%
Humedad no controlada.	8	58%
No hay mantenimiento.	7	81%
Fallas humanas.	6	100%

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 9. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de centrifugación.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al diagrama anterior el defecto más recurrente es la ineficiencia del proceso, con una participación de 32% del total de los defectos, esto se debe a que cada una de las centrifugas trabajan durante 5 minutos exactamente pero no se tiene en cuenta que poseen distintas RPM lo que afecta directamente las propiedades del producto terminado.

El segundo defecto es la humedad no controlada, con el 26% del total de los defectos, esto se debe a la falta de información en la empresa, la cual no tiene un estándar de calidad para el producto terminado, es por esto que la humedad puede variar de un lote a otro.

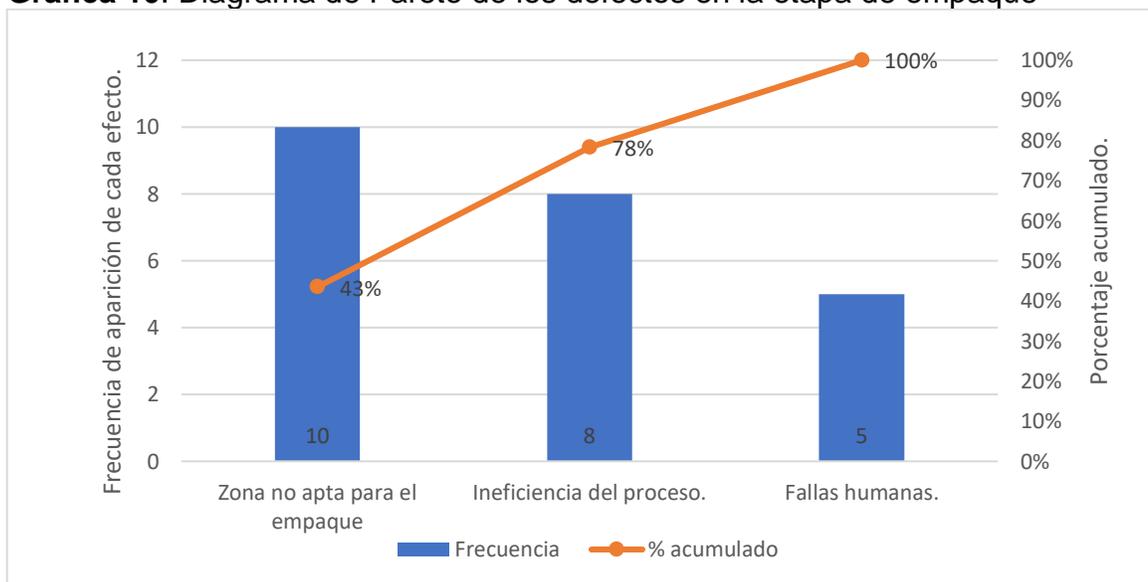
2.6.5 Diagrama de Pareto para la etapa de empaque.

Tabla 32. Frecuencia de las fallas en la etapa de empaque.

Problemas	Frecuencia	% acumulado
Zona no apta para el empaque	10	43%
Ineficiencia del proceso.	8	78%
Fallas humanas.	5	100%

Fuente: elaboración propia

Gráfica 10. Diagrama de Pareto de los defectos en la etapa de empaque



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la gráfica anterior el defecto más frecuente en ésta etapa con un 43% de participación del total de los defectos es debido a que la zona donde se realiza este proceso no es adecuada, porque existe polución que puede contaminar el sulfato de magnesio heptahidratado afectando la calidad del mismo.

2.6.6 Diagrama de Pareto para el proceso de producción de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.

Después de identificar los defectos que tiene cada una de las etapas que hacen parte del proceso de producción, se seleccionaron los defectos más significativos de cada etapa, es decir los que superen el acumulado que se genera en cada una de las gráficas (ver línea naranja) con el fin de evaluarlos en un diagrama de Pareto

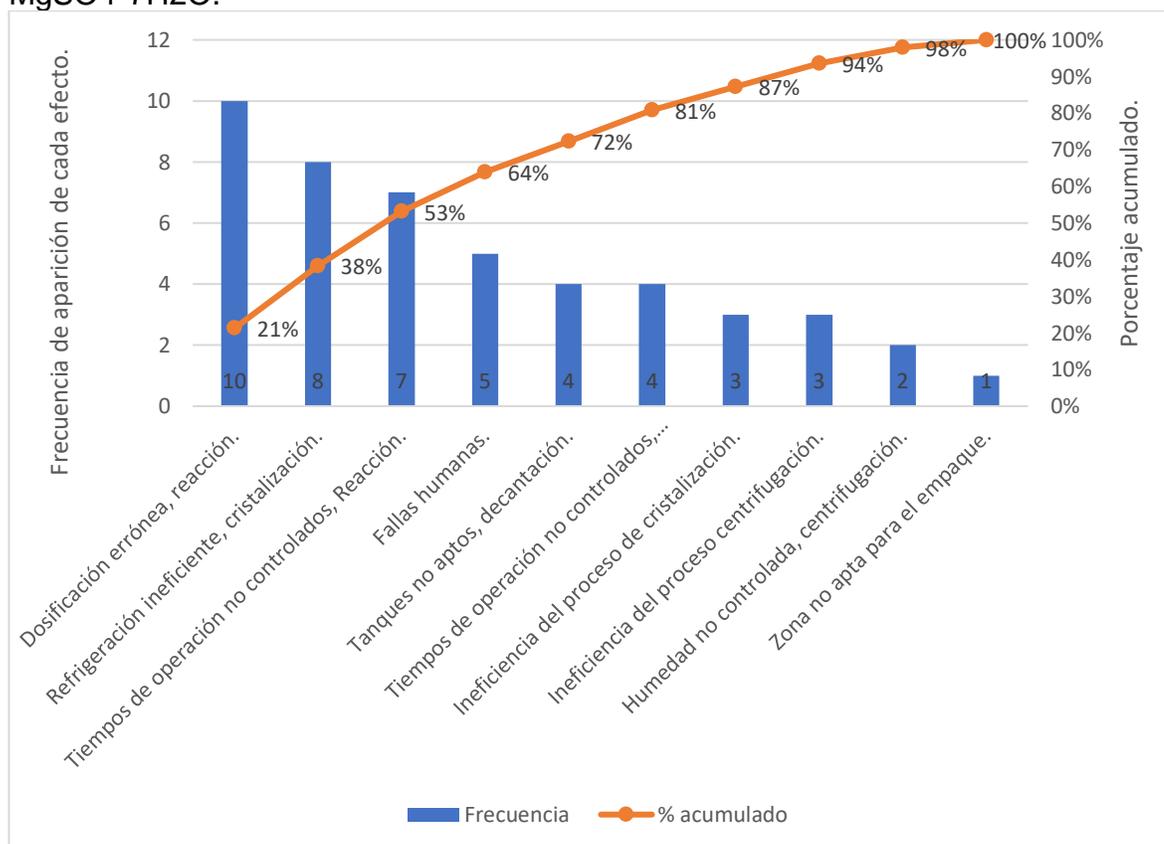
general y así seleccionar el problema que genera mayor impacto en todo el proceso y dar solución oportuna a éste.

Tabla 33. Frecuencia de las fallas del proceso de producción de MgSO₄.

Problemas	Frecuencia	% acumulado
Dosificación errónea, reacción.	10	21%
Refrigeración ineficiente, cristalización.	8	38%
Tiempos de operación no controlados, Reacción.	7	53%
Fallas humanas.	5	64%
Tanques no aptos, decantación.	4	72%
Tiempos de operación no controlados, decantación.	4	81%
Ineficiencia del proceso de cristalización.	3	87%
Ineficiencia del proceso centrifugación.	3	94%
Humedad no controlada, centrifugación.	2	98%
Zona no apta para el empaque.	1	100%

Fuente: elaboración propia

Gráfica 11. Diagrama de Pareto general para el proceso de producción de MgSO₄*7H₂O.



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica anterior se pueden observar los defectos del proceso de producción que serán solucionados, es decir los que se encuentren superiores a la línea naranja, en primer lugar, la dosificación errónea que ocurre en la etapa de reacción, en segundo lugar, la refrigeración ineficiente de la etapa de cristalización y finalmente controlar los tiempos de operación en la etapa de reacción. Estos defectos tienen una participación de 21%, 17% y 15% respectivamente sobre el total de los defectos.

Para corregir los defectos expuestos anteriormente por medio del diagrama de Pareto general del proceso, con lo cual culmina el diagnóstico se plantean diferentes opciones para la solución siendo estas viables y de fácil aplicación para la empresa tanto económica como productivamente, por medio de alternativas útiles dando inicio al siguiente capítulo, ya que una adecuada solución a la problemática de la empresa, genera oportunidades de crecimiento en la industria química, pues un proceso limpio, eficiente y de calidad es más rentable y confiable para los clientes.

3. ALTERNATIVA(S) DE MEJORA PARA LA PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO (MgSO₄)

En el diagnóstico desarrollado en el capítulo anterior se identificaron las fallas más importantes en las etapas de reacción y cristalización a partir de un diagrama de Pareto, donde se pudo evidenciar que HEBESTA S.A.S. no presenta una estandarización fija de la materia prima usada en la etapa de reacción, por otra parte, posee falencias en la refrigeración de la etapa de cristalización. Con el propósito de encontrar las mejores condiciones para dichas etapas y hacer un proceso más rentable para la empresa, obteniendo un producto homogéneo dentro de los estándares de calidad que le permita competir en la industria química a nivel nacional e internacional, se plantean las siguientes alternativas de mejora.

3.1 ALTERNATIVA DE MEJORA PARA LA ETAPA DE REACCIÓN

3.1.1 Réplica del proceso actual a nivel laboratorio. Con el fin de tener una muestra patrón que permita comparar el proceso de producción actual con los experimentos donde se harán modificaciones, se replicó el proceso industrial actual a nivel laboratorio, donde el número de etapas de adición de óxido de Magnesio (MgO) es de 6, como se explicó en el capítulo 2 y se logró un pH de 6, a partir de esto se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 34. Réplica del proceso a nivel laboratorio.

Etapas de adición de MgO	Cantidad de MgO agregado (g)	pH	Tiempo (s)	Sulfato de magnesio producido (g)	Lodos producidos (g)
6	5,79	6	2.880	125,38	52,96
	2,11				
	2,63				
	2,65				
	1,32				
	1,31				

Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Desarrollo experimental. Para evaluar la dosificación más idónea en la etapa de reacción se realizó la experimentación pertinente, donde se definieron tanto las variables independientes como las dependientes; las primeras cambian o se controlan para estudiar los efectos sobre la variable dependiente; las segundas son las variables que se investigan y son medibles.

Las variables consideradas en el experimento se presentan a continuación:

Tabla 35. Variables involucradas en el diseño de experimental.

Variabes o factores	Controlable	No controlable	Justificación
Etapas de adición de MgO	X		Es una variable controlable debido a que se pueden variar las etapas de adición que actualmente utiliza la empresa.
pH		X	Es una variable no controlable debido a que depende de la adición de materias primas.
Cantidad de producto obtenido		X	Se considera no controlable, pues dependen de las variables controlables.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2.1 Desarrollo experimental. Con el objetivo de reducir el tiempo y la cantidad de etapas de adición de óxido de magnesio (MgO) en el proceso de reacción, se comparó la muestra patrón con los resultados de la experimentación realizada. Experimentación en la cual se evaluó la producción de sulfato de magnesio en 3, 4 y 5 etapas de adición de óxido de magnesio (MgO) cada una a los pH permitidos (5,5 - 6,0 - 6,5), como se muestran en la tabla 36, teniendo como resultado el tiempo de duración del proceso de reacción y a su vez la cantidad de lodos y de sulfato de magnesio heptahidratado formado en cada uno de los experimentos.

Tabla 36. Etapas de adición de óxido de magnesio (MgO) a diferentes pH

Etapas de MgO	pH
3	5,5
	6
	6,5
4	5,5
	6
	6,5
5	5,5
	6
	6,5

Fuente: elaboración propia.

Para cada uno de los experimentos se adicionó 115 ml de aguas madre y 18 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) respectivamente (cantidades que fueron escaladas a nivel laboratorio) a un vaso precipitado de 500 ml, el cual estuvo en constante agitación (50 RPM) por medio de una plancha de agitación magnética, finalmente se agregó el óxido de magnesio (MgO) en distintas etapas de adición (3, 4 y 5) agregando las cantidades que se presentan en la tabla 38, durante toda la experimentación se monitoreo el pH a partir de un pH-metro con el fin de alcanzar el pH deseado.

Cuando se termina la reacción (cuando alcanza el pH deseado) se da inicio a la decantación la cual por motivos de tiempo se realizó por filtración, manteniendo la solución a una temperatura mayor a los 70°C para evitar la cristalización en esta etapa, posteriormente se separan los lodos producidos de la solución por medio de papel filtro finalmente son pesados. La solución restante se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente, luego de alcanzar esta temperatura se realiza la respectiva centrifugación donde se obtiene el sulfato de magnesio heptahidratado, los resultados se observan en la siguiente tabla.

Tabla 37. Resultados del desarrollo experimental.

Etapas de adición de MgO	pH	Tiempo etapa de reacción (s)	Sulfato de Magnesio producido (g)	Lodos producidos (g)	Promedio	Desv. Estand
3	5,5	3.480	21,08	159,258		
3	6	1.695	17,78	163,558	20,830	2,933
3	6,5	1.462	23,63	156,708		
4	5,5	1.423	98,74	82,598		
4	6	1.297	125,86	54,478	113,707	13,777
4	6,5	1.625	116,52	62,818		
5	5,5	2.210	123,76	56,578		
5	6	2.094	146,68	34,658	133,987	11,657
5	6,5	2.212	131,52	48,818		
3	5,5	3.300	22,17	158,168		
3	6	1.845	19,32	161,018	21,350	1,769
3	6,5	1.547	22,56	158,778		
4	5,5	1.553	102,47	78,868		
4	6	1.369	123,29	57,048	113,317	10,437
4	6,5	1.611	114,19	65,148		
5	5,5	2.117	122,71	57,628		
5	6	2.055	147,13	34,208	133,567	12,433
5	6,5	2.129	130,86	49,478		

Fuente: elaboración propia.

Las cantidades que se agregaron en cada una de las etapas se muestran a continuación:

Tabla 38. Óxido de magnesio agregado en cada etapa.

Etapas de adición de MgO	Cantidad de MgO agregado (g)	Cantidad total por etapa (g)
	5,79	
3	4,74	15,79
	5,37	
	5,79	
4	4,74	15,79
	3,94	
	1,32	
	5,79	
	4,74	
5	2,65	15,79
	1,33	
	1,318	

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo del diseño de experimentos se evidenció que, al reducir el número de etapas, se generó una mayor formación de lodos y poca formación de sulfato de magnesio heptahidratado, puesto que en un menor número de etapas hay mayor concentración de óxido de magnesio (MgO) y por lo tanto no reacciona en su totalidad.

El resultado más viable fue el de 5 etapas de adición de óxido de magnesio a un pH de 6,0, pues al compararlo con la prueba patrón realizada a nivel laboratorio, ésta mostró mayor productividad dado que aumenta en un 17,34 % comparado con el de la empresa, en un menor tiempo de reacción, es decir que con la aplicación a nivel industrial de éste ensayo HEBESTA S.A.S tendría mayor producción de sulfato de magnesio heptahidratado y menores pérdidas, así mismo una disminución en el tiempo de reacción que actualmente es de 8 horas y puede ser de 5 horas con 42 minutos aproximadamente.

Tabla 39. Comparación patrón vs experimento seleccionado.

	Etapas de adición de MgO	Ph	Tiempo (s)	Sulfato de magnesio producido (g)	Lodos producidos (g)
Patrón	6	6	2.880	125,38	52,96
Experimento seleccionado	5	6	2.055	147,13	34,21

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, si se desea implementar este experimento a nivel industrial se debe realizar una modificación en la forma actual de adición de óxido de magnesio (MgO) como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 40. Modo de adición recomendado a nivel industrial.

	Número de etapa	Cantidad nivel laboratorio (g)	Cantidad nivel industrial (kg)	Cantidad de bultos por etapa
5	1	5,79	579	23,16
	2	4,74	474	18,96
	3	2,65	265	10,6
	4	1,33	133	5,32
	5	1,31	131	5,24

Fuente: elaboración propia.

3.2 ALTERNATIVA DE MEJORA PARA LA ETAPA DE CRISTALIZACIÓN

3.2.1 Enchaquetamiento de las tinas de cristalización. Para esta etapa se debe hacer una modificación a cada una de las tinas, realizando el debido enchaquetamiento de las mismas por medio de acero inoxidable (con espesor de 1 mm) permitiendo la recirculación de agua a bajas temperaturas (10°C) o líquido refrigerante, teniendo en cuenta la agitación constante en el interior de cada una de las tinas.

Figura 20. Tina de cristalización enchaquetada.



Fuente: Contenedores y recubrimientos industriales – Profesionales en fibra. s.f.

3.2.2 Nucleación. Como modificación a la técnica de producción de cristales que actualmente se usa en la empresa, se propone hacer uso del método de nucleación que consiste en realizar el riego uniforme de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) dentro de cada una de las tinas con solución en proceso de enfriamiento, generando la réplica de cristales que crecen rápida y uniformemente uno sobre otro como se observa en la figura 21.

Figura 21. Nucleación.



Fuente: LORES, Manuel. Modelo de nucleación homogénea. s.f.

Otra alternativa para aumentar la producción de cristales es inducir la nucleación, que es “la formación de un núcleo sobre el que puede comenzar a crecer el cristal”³⁹ generando réplicas de éste. Para esto se debe realizar un riego uniforme del producto terminado sobre la solución que se encuentra dentro de las tinas cuando la temperatura sea de 35°C.

³⁹ GOKEL, G. Química orgánica experimental. 2007. p. 67.

Después de haber planteado y desarrollado los experimentos correspondientes para las posibles alternativas de mejora en las etapas de reacción y cristalización se debe llevar a cabo de forma detallada la aplicación de estas dentro de la empresa, para lo cual se dan las especificaciones técnicas en el siguiente capítulo, mostrando las implicaciones que estas tienen para el proceso de producción de este fertilizante.

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE SULFATO DE MAGNESIO (MgSO₄)

4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DONDE SE DETECTARON FALLAS IMPORTANTES APLICANDO LA ALTERNATIVA DE MEJORA PLANTEADA

En este capítulo se exponen las modificaciones que se deben aplicar a las etapas correspondientes de reacción y cristalización, puesto que es en ellas donde se detectaron las fallas importantes del proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO₄*7H₂O) en HEBESTA S.A.S., planteadas dependiendo de la viabilidad y factibilidad económica y de diseño con que cuenta la empresa; teniendo en cuenta el cuidado del medio ambiente y en busca del aumento de la producción de este fertilizante.

4.1.1 Reacción. En esta etapa se realiza la reacción dentro del reactor entre las materias primas, óxido de magnesio (MgO), ácido sulfúrico (H₂SO₄) y aguas madre obteniendo una solución compuesta de sulfato de magnesio y aguas madre, se debe tener presente que el tiempo de esta reacción tiene una duración de 8 horas pero que con la alternativa de mejora y su aplicación de forma correcta se busca la disminución de este tiempo en un estimado de dos horas aproximadamente.

Es importante tener en cuenta los siguientes parámetros para lograr una etapa eficiente pues de esta depende la calidad del producto terminado y que este cumpla los parámetros de las normas anteriormente mencionadas:

- Agregar agua madre aproximadamente 11.500 L.
- Agregar el ácido sulfúrico (H₂SO₄) aproximadamente 1.800 L.
- Mantener encendido la agitación constante dentro del reactor.
- Realizar la adición del óxido de magnesio (MgO) en 5 etapas, según se muestra en la siguiente tabla, pues se pudo comprobar con el desarrollo del trabajo que es más productivo para la empresa. Esta adición se debe llevar a cabo de forma pausada puesto que de no ser así la espuma generada por la reacción puede llegar a rebasar el reactor con capacidad de 25.000 L.

Tabla 41. Cantidad y tiempo de adición de MgO a nivel industrial.

Número de etapas	Cantidad a nivel industrial. (kg)	Tiempo de adición. (h)
1	579	1
2	474	1:19:16
3	265	2:43:36
4	133	5:13:29
5	131	5:42:51

Fuente: elaboración propia

- Mantener la temperatura de la solución en un intervalo entre los 70° y 85 °C.
- La reacción ha terminado cuando se observa ausencia de espuma dentro del reactor, esto quiere indica que el óxido de magnesio agregado a terminado de reaccionar.
- Al verificar el pH de la solución formada este debe encontrarse en 6,0, lo que hace que a este fertilizante ligeramente ácido.
- En caso de encontrar un pH < 6 se debe agregar óxido de magnesio (MgO) con cautela.

4.1.2 Cristalización. En esta etapa la solución ingresa a 6 tinas aproximadamente a 80°C y se deja enfriar a temperatura ambiente (25 a 18°C), se debe agitar constantemente pues en esta etapa del proceso es donde se define el tamaño de los cristales y así evitar la formación de los mismo en tamaños no permitidos (>1,9mm). Cuando la solución se encuentre aproximadamente alrededor de 35°C, es ahí donde inicia la formación de los cristales de sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO₄*7H₂O), por ende, se plantearon alternativas que logran llevar a cabo el enfriamiento rápido de la solución a una temperatura entre los 15°C y 18°C, para una mayor obtención de cristales, la empresa cuenta con libre decisión frente a la aplicación de estas.

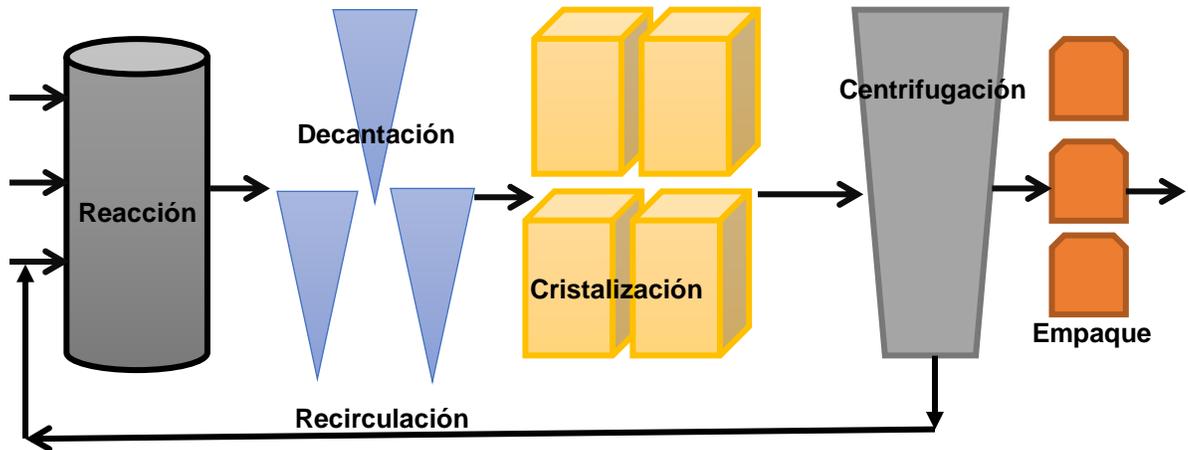
- Una es la modificación respectiva de cada una de las tinas, llevando a cabo el enchaquetamiento de estas por medio de láminas de acero inoxidable puestas alrededor de cada una y así dar paso a la recirculación de agua fría o un refrigerante que transite alrededor de estas, generando la disminución de la temperatura de la solución.
- Otra alternativa para aumentar la producción de cristales es inducir la nucleación, que es “la formación de un núcleo sobre el que puede comenzar a crecer el cristal”⁴⁰ generando réplicas de éste. Para esto se debe realizar un riego uniforme del producto terminado sobre la solución que se encuentra dentro de las tinas cuando la temperatura sea de 35°C.

4.2 BALANCE DE MASA

Con el fin de conocer los flujos de materia del proceso de producción del sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO₄*7H₂O), se realizó un balance de masa, el cual parte de la aplicación de la alternativa de mejora para la etapa de reacción teniendo en cuenta el desarrollo experimental previamente explicado (Numeral 3.1.2), permitiendo cuantificar y unificar la cantidad de materias primas involucradas, la generación del producto y formación de desechos o pérdidas. El cual se basa en la siguiente figura:

⁴⁰ GOKEL, G. Química orgánica experimental. 2007. p. 67.

Figura 22. Representación gráfica del proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.



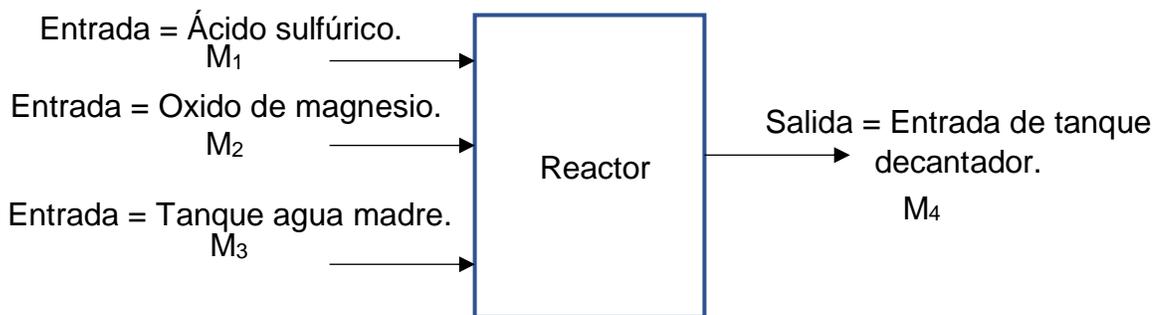
Fuente: elaboración propia.

Se realiza el cálculo del balance de masa para mostrar cómo se ven afectadas cada una de las etapas si se aplica la alternativa de mejora, teniendo conocimiento de las cantidades de solución y producto en las respectivas corrientes de circulación cuando se realiza la modificación de la técnica de adición de las materias primas.

4.2.1 Balance de masa en el reactor

ξ = Símbolo que representa el avance de la reacción.

Figura 23. Flujos del reactor.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 42. Ecuaciones para desarrollo del balance de masa en el reactor.

	Entra	Genera	=	Sale	Consume
B: H ₂ SO ₄	M ₁ x ¹ _{H₂SO₄}	+	0	=	M ₄ x ⁴ _{H₂SO₄} + \mathcal{Z}
B: MgO	M ₂ x ² _{MgO}	+	0	=	M ₄ x ⁴ _{MgO} + \mathcal{Z}
B: H ₂ O	M ₃ x ³ _{H₂O}	+	\mathcal{Z}	=	M ₄ x ⁴ _{H₂O} + 7 \mathcal{Z}
B: MgOSO ₄ * 7H ₂ O			\mathcal{Z}	=	M ₄ x ⁴ _{MgOSO₄ * 7H₂O}
Ecuación general					M ₁ + M ₂ + M ₃ - 7 \mathcal{Z} = M ₄

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- M₁ H₂SO₄: 33,12 g
- M₂ MgO: 15,8286 g
- M₃ H₂O: 138 g
- M₄ MgOSO₄: 181,338 g
- Base de cálculo: 100 g de sulfato de magnesio (nivel laboratorio).

Ecuación 51. Ecuación general para el balance de masa en el reactor.

$$M^1 + M^2 + M^3 - \mathcal{Z} = M^4$$

$$\mathcal{Z} = M^1 + M^2 + M^3 - M^4$$

$$\mathcal{Z} = 5,602$$

Ecuación 52. Fracción de ácido sulfúrico de la corriente M₄.

$$x_{\text{H}_2\text{SO}_4}^4 = (M^1 x_{\text{H}_2\text{SO}_4}^1 - \mathcal{Z}) / M^4$$

$$x_{\text{H}_2\text{SO}_4}^4 = 0,1518$$

Ecuación 53. Fracción de óxido de magnesio de la corriente M₄

$$x_{\text{MgO}}^4 = (M^2 x_{\text{MgO}}^2 - \mathcal{Z}) / M^4$$

$$x_{\text{MgO}}^4 = 0,0564$$

Ecuación 54. Fracción de agua de la corriente M₄

$$x_{\text{H}_2\text{O}}^4 = (M^3 x_{\text{H}_2\text{O}}^3 - 6\mathcal{Z}) / M^4$$

$$x_{\text{H}_2\text{O}}^4 = 0,7301$$

Ecuación 55. Fracción de sulfato de magnesio en la corriente M_4 .

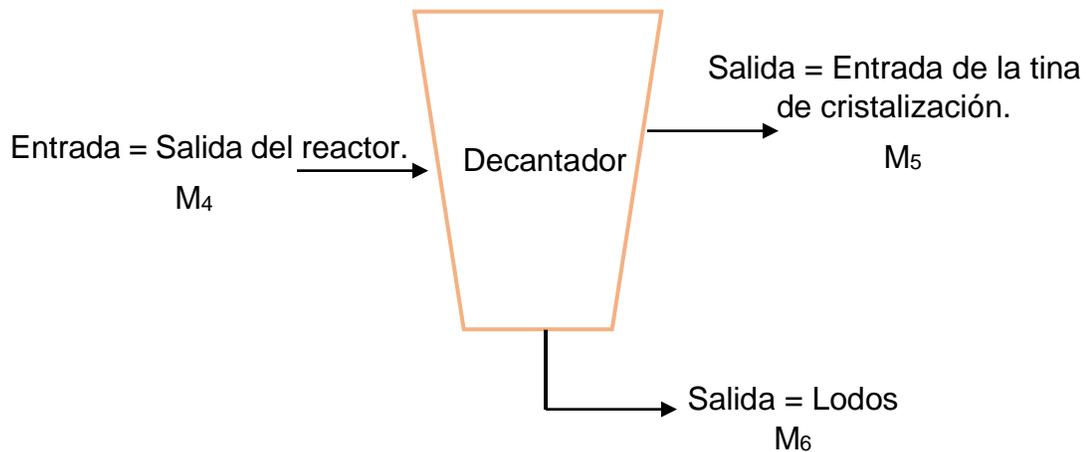
$$x_{MgSO_4}^4 = \mathcal{Z} / M^4$$

$$x_{MgSO_4}^4 = 0,031$$

A partir del anterior balance de masa de la etapa reacción, se puede observar que ingresan 33,12g de ácido sulfúrico (H_2SO_4), 15,82g de óxido de magnesio (MgO) y 138 g de agua (H_2O), tomando como base de cálculo 100g de solución de sulfato de magnesio teniendo en cuenta que para el cálculo del avance de la reacción se conocían las corrientes M_1 , M_2 , M_3 y M_4 y realizando el respectivo despeje del avance en la ecuación global, se obtuvo como resultado 5,602 y se determinaron las fracciones de cada una de las corrientes para dar inicio a la siguiente etapa.

4.2.2 Balance de Masa en el decantador.

Figura 24. Flujos de tanque decantador.



Fuente: elaboración propia.

Como anteriormente se había mostrado en la tabla de resultados del desarrollo experimental, según la alternativa seleccionada las pérdidas son 34,208 g valor que tomaremos como M_6 y M_4 igual a 181,338 g, con la diferencia del valor de estas dos corrientes se realiza el cálculo de M_5 , que corresponde a la solución de sulfato de magnesio limpia (Sin presencia de lodos) dirigida a las tinas de cristalización:

Ecuación 56. Ecuación general para el balance en la decantación.

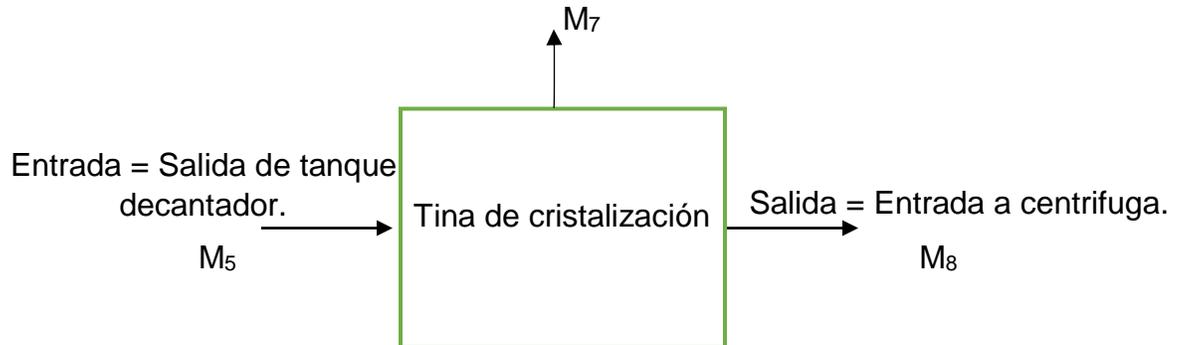
$$M_4 = M_5 + M_6$$

$$M_5 = M_4 - M_6$$

$$M_5 = 147,13 \text{ g}$$

4.2.3 Balance de masa en la tina de cristalización

Figura 25. Flujos de tina de cristalización.



Fuente: elaboración propia.

La eficiencia de la tina es del 77%, es decir que de 147,13 g de M_5 pasan a la centrifuga 113,29 g correspondientes a la corriente M_8 y 33,84 g se evaporan, es decir la corriente M_7 .

Ecuación 57. Ecuación general para el balance de masa en la cristalización.

$$M_5 = M_7 + M_8$$

Ecuación 58. Ecuación para el cálculo del flujo M_8

$$M_8 = M_5 * (77\%)$$

$$M_8 = 147,13 \text{ g} * (77\%)$$

$$M_8 = 113,29 \text{ g}$$

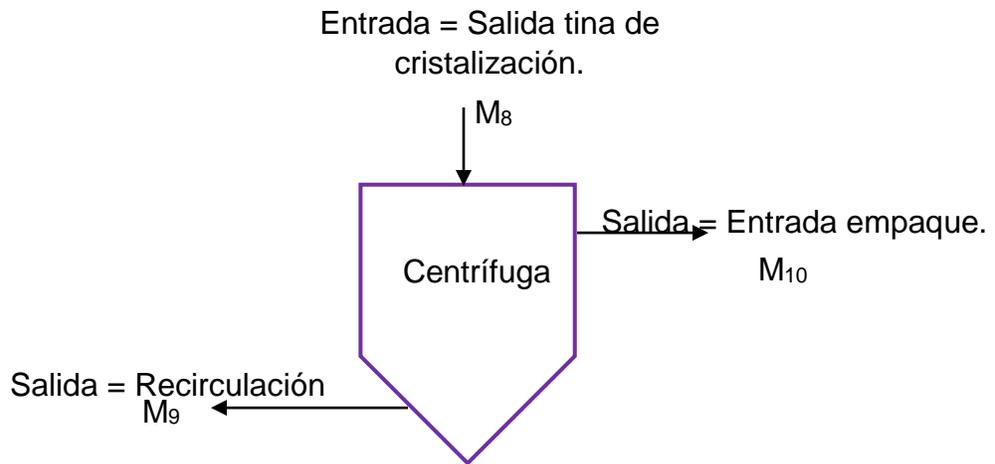
Ecuación 59. Cálculo de M_7 .

$$M_7 = M_5 - M_8$$

$$M_7 = 33,84 \text{ g}$$

4.2.4 Balance de masa en la centrífuga

Figura 26. Flujos de la centrífuga.



Fuente: elaboración propia.

La centrífuga aproximadamente remueve un 28% de agua, es decir que, de 113,29g de M_8 pasan 31,72g de agua a recirculación del proceso, es decir corriente M_9 y 81,57 g son empacados correspondientes a la corriente M_{10} .

Ecuación 60. Balance general en la centrifugación.

$$M_8 = M_9 + M_{10}$$

Ecuación 61. Cálculo corriente recirculada.

$$M_9 = M_8 * (28\%)$$

$$M_9 = 113,29 \text{ g} * (28\%)$$

$$M_9 = 31,72 \text{ g}$$

Ecuación 62. Cálculo corriente de producto terminado.

$$M_{10} = M_8 + M_9$$

$$M_7 = 81,57 \text{ g}$$

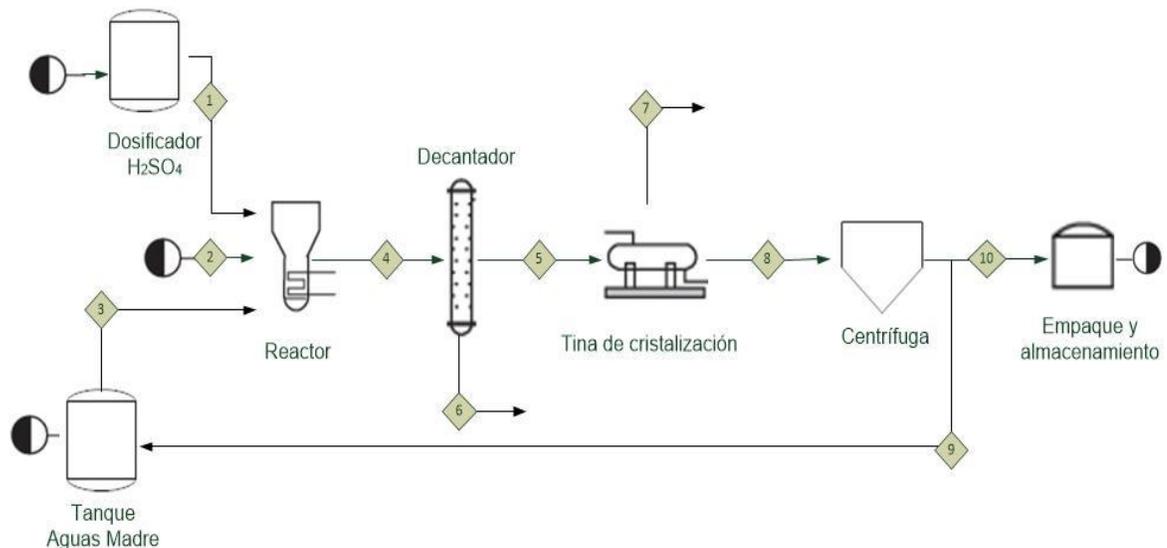
Con el desarrollo del balance de masa anterior, se logró determinar que, al realizar la debida aplicación de la alternativa de mejora en la etapa de reacción planteada en el capítulo anterior, este proceso sufre cambios significativos aumentando en su

producción un 17,34% y los disminuyen en un 35,4% ambos valores con respecto a la producción actual.

4.3 PFD

Se debe realizar un nuevo Diagrama de Flujo (PFD) para el proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) aplicando la alternativa de mejora desarrollada en la etapa de reacción, teniendo en cuenta que se lleva a cabo con el número de etapas seleccionadas (5) y a partir de las cantidades obtenidas en el experimento (3.1.2), con el fin de comprender fácilmente los cambios que tendría este, viéndose afectados directamente el aumento de la producción y la disminución de lodos o desechos.

Diagrama 3. Diagrama de flujo de proceso PFD con alternativas de mejora.



Fuente: elaboración propia.

Donde:

Corriente 1: Ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Corriente 2: Óxido de Magnesio (MgO).

Corriente 3: Aguas madre.

Corriente 4: Solución de MgSO_4 .

Corriente 5: Solución de MgSO_4 .

Corriente 6: Lodos.

Corriente 7: Vapor de agua.

Corriente 8: Sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Corriente 9: Aguas madre.

Corriente 10: Sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Tabla 43. Información de las corrientes del PFD.

Corriente	Cantidad [g]	Temperaturas °C
1	33,120	20
2	15,829	20
3	138,000	20
4	181,338	20
5	147,130	70-80
6	34,208	70-80
7	33,840	25-18
8	113,290	25-18
9	31,720	25-18
10	81,570	25-18

Fuente: elaboración propia.

Con la correcta aplicación de las especificaciones técnicas descritas en este capítulo, la empresa podrá tener un aumento en la producción de sulfato de magnesio heptahidratado de forma significativa pues será de un 17,34% y de la misma forma un mejor aprovechamiento de las materias primas involucradas, teniendo una disminución en los desechos o más conocidos como lodos de un 35,4%. Lo cual afecta directamente los costos y gastos de la empresa lo que se expone en el último capitulo de este trabajo de grado.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA

Teniendo en cuenta las alternativas de mejora tales como la modificación en la forma de adición del óxido de magnesio (MgO) en la etapa de reacción, el enchaquetamiento de las tinas de cristalización y la implementación de la técnica de nucleación propuestas para la solución de las falencias determinadas en las etapas de reacción y cristalización en el proceso de producción de sulfato de magnesio se realiza un flujo de caja antes de implementar dichas propuestas y después de implementarlas.

A continuación, se registran los costos de fabricación de sulfato de magnesio heptahidratado con proyección de 5 años, el cual se calculó con los costos de fabricación del año 2.018 y se realizó la proyección con un IPC de 3,5% anual según los datos registrados por el DANE*.

Figura 27. Costos de fabricación con proyección a 5 años sin propuesta.

Costos de Fabricación	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Directos</i>						
Servicios	\$ 68.445.000	\$ 70.840.575	\$ 73.319.995	\$ 75.886.195	\$ 78.542.212	\$ 81.291.189
Mano de obra	\$ 131.625.000	\$ 136.231.875	\$ 140.999.991	\$ 145.934.990	\$ 151.042.715	\$ 156.329.210
<i>Materias primas</i>						
Acido sulfúrico	\$ 947.700.000	\$ 980.869.500	\$ 1.015.199.933	\$ 1.050.731.930	\$ 1.087.507.548	\$ 1.125.570.312
Oxido de Magnesio	\$ 1.053.000.000	\$ 1.089.855.000	\$ 1.127.999.925	\$ 1.167.479.922	\$ 1.208.341.720	\$ 1.250.633.680
Empaque	\$ 94.770.000	\$ 98.086.950	\$ 101.519.993	\$ 105.073.193	\$ 108.750.755	\$ 112.557.031
<i>Indirectos</i>						
Administrativos	\$ 300.105.000	\$ 310.608.675	\$ 321.479.979	\$ 332.731.778	\$ 344.377.390	\$ 356.430.599
Mantenimiento	\$ 52.650.000	\$ 54.492.750	\$ 56.399.996	\$ 58.373.996	\$ 60.417.086	\$ 62.531.684
Flete	\$ 300.105.000	\$ 310.608.675	\$ 321.479.979	\$ 332.731.778	\$ 344.377.390	\$ 356.430.599
Total	\$ 2.948.400.000	\$ 3.051.594.000	\$ 3.158.399.790	\$ 3.268.943.783	\$ 3.383.356.815	\$ 3.501.774.304

Fuente: elaboración propia.

5.1 COSTOS DE OPERACIÓN SIN PROPUESTA DE MEJORA

Con el fin de determinar el valor presente unitario (VPN) del proceso desarrollado actualmente por la empresa, se realiza un flujo de caja neto donde la participación anual de los clientes respecto a la cantidad de sulfato de magnesio heptahidratado producida anualmente se muestra en la tabla 45.

* Ver anexo 29.

Tabla 44. Participación de los clientes en la producción anual.

Grupo	Precio de venta / kg	Participación anual
Chía	\$ 640	2520
Disan	\$ 670	1920
Arysta	\$ 910	240

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los datos de la tabla anterior, se calcularon los ingresos para el año 2.019 y para los siguientes 4 años se calculó con un incremento 3,5% (IPC) anual según los datos registrados por el DANE.

Figura 28. Flujo de caja neto del proceso actual.

	2019	2020	2021	2022	2023
Ingresos	\$ 3.117.600.000	\$ 3.226.716.000	\$ 3.339.651.060	\$3.456.538.847	\$3.577.517.707
Costos de producción	\$ 3.051.594.000	\$ 3.158.399.790	\$ 3.268.943.783	\$3.383.356.815	\$3.501.774.304
Utilidad antes de impuestos	\$ 66.006.000	\$ 68.316.210	\$ 70.707.277	\$ 73.182.032	\$ 75.743.403
Impuesto (33%)	\$ 21.781.980	\$ 22.544.349	\$ 23.333.402	\$ 24.150.071	\$ 24.995.323
Utilidad después de impuestos	\$ 44.224.020	\$ 45.771.861	\$ 47.373.876	\$ 49.031.961	\$ 50.748.080
Flujo de caja neto	\$ 44.224.020	\$ 45.771.861	\$ 47.373.876	\$ 49.031.961	\$ 50.748.080

Fuente: elaboración propia.

5.2 COSTOS DE OPERACIÓN CON PROPUESTA DE MEJORA

A continuación, se registran los costos de fabricación de sulfato de magnesio heptahidratado con proyección de 5 años con la implementación de la propuesta de mejora, en este caso la implementación de la técnica de nucleación para la cristalización, el enchaquetamiento de las tinajas de esta misma etapa y la modificación en la forma de adición del óxido de magnesio (MgO) en la etapa de reacción el cual se calculó en base a los costos de producción sin propuesta, teniendo en cuenta el aumento de esta y se realizó la proyección con un IPC de 3,5% anual según los datos registrados por el DANE.

Figura 29. Costos de fabricación con proyecto aplicando propuesta de mejora

Costos de Fabricación	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Directos						
Servicios	\$ 67.500.000	\$ 69.862.500	\$ 72.307.688	\$ 74.838.457	\$ 77.457.803	\$ 80.168.826
Mano de obra	\$ 157.500.000	\$ 163.012.500	\$ 168.717.938	\$ 174.623.065	\$ 180.734.873	\$ 187.060.593
Materias primas						
Acido sulfúrico	\$ 913.500.000	\$ 945.472.500	\$ 978.564.038	\$ 1.012.813.779	\$ 1.048.262.261	\$ 1.084.951.440
Oxido de Magnesio	\$ 945.000.000	\$ 978.075.000	\$ 1.012.307.625	\$ 1.047.738.392	\$ 1.084.409.236	\$ 1.122.363.559
Empaque	\$ 126.000.000	\$ 130.410.000	\$ 134.974.350	\$ 139.698.452	\$ 144.587.898	\$ 149.648.475
Indirectos						
Administrativos	\$ 301.500.000	\$ 312.052.500	\$ 322.974.338	\$ 334.278.439	\$ 345.978.185	\$ 358.087.421
Mantenimiento	\$ 67.500.000	\$ 69.862.500	\$ 72.307.688	\$ 74.838.457	\$ 77.457.803	\$ 80.168.826
Flete	\$ 301.500.000	\$ 312.052.500	\$ 322.974.338	\$ 334.278.439	\$ 345.978.185	\$ 358.087.421
Total	\$ 2.880.000.000	\$ 2.980.800.000	\$ 3.085.128.000	\$ 3.193.107.480	\$ 3.304.866.242	\$ 3.420.536.560

Fuente: elaboración propia.

Puesto que con la implementación de la propuesta de mejora se aumenta la producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) usando las mismas cantidades de materia prima, se realiza una comparación de los costos de producción con propuesta y sin propuesta, pues al ser una proyección no se conoce la posible participación de los clientes en la nueva producción anual.

Figura 30. Costos de producción e inversión para propuesta de mejora

	2019	2020	2021	2022	2023	
Costos de producción		\$2.980.800.000	\$3.085.128.000	\$3.193.107.480	\$3.304.866.242	\$3.420.536.560
Inversiones	\$ 2.037.000					
Flujo de caja neto	-\$ 2.037.000	\$2.980.800.000	\$3.085.128.000	\$3.193.107.480	\$3.304.866.242	\$3.420.536.560

Fuente: elaboración propia.

Los costos de inversión corresponden al enchaquetamiento de las tinajas de cristalización, para esto es necesario 60 láminas galvanizadas con un costo por unidad de \$ 18.950 y mano de obra de \$900.000.

Finalmente se calculó la tasa interna de oportunidad (TIO), el valor presente (VP) y el costo anual uniforme equivalente (CAUE) para los dos escenarios obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 45. Comparación indicadores financieros.

	Sin Proyecto	Con Proyecto
TIO	17%	17%
VP	\$ 10.331.281.673	\$10.089.616.286
CAUE	-\$ 3.238.325.798	-\$3.162.576.120

Fuente: elaboración propia

Donde el TIO es la tasa mínima que la empresa estaría dispuesta a aceptar, es decir la rentabilidad mínima que ganaría al desarrollar la inversión y se calculó de la siguiente forma:

Ecuación 63. Tasa interna de oportunidad.

$$\text{TIO} = (1+\text{DTF}) * (1+8\%) * (1+3,5\%) - 1$$

Donde:

DTF: Tasa para depósitos a término fijo promedio (4,78%⁴¹).

3,5%: Inflación promedio.

8%: Seguro de riesgos.

$$\text{TIO} = 17\%$$

La diferencia entre el costo anual uniforme equivalente (CAUE) con propuesta y el costo anual uniforme equivalente (CAUE) sin propuesta es de \$75.749.678, lo que quiere decir que este valor es el ahorro al implementar la propuesta de mejora, por lo tanto, el proyecto es viable. Se debe tener en cuenta que hay mayor producción de sulfato de magnesio heptahidratado debido a la disminución en los lodos, efecto que se produce al mejorar la técnica e implementar la mejora en la refrigeración de la etapa de cristalización por lo tanto los ingresos aumentan haciendo el proceso rentable y eficiente.

⁴¹ BANCO DE LA REPÚBLICA. DTF histórico promedio.

6. CONCLUSIONES

- En el diagnóstico se identificaron las fallas importantes del proceso de producción del sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), puesto que no se tiene una estandarización definida, ni un control estipulado sobre los tiempos, temperaturas y cantidades de materia prima que intervienen en cada una de las etapas del proceso mencionado esto quiere decir que la calidad del producto final depende del conocimiento y la experiencia de los operarios a cargo de cada una de las etapas, al realizar las respectivas pruebas para la caracterización del producto terminado, se identificó que la densidad aparente del producto no cumple con los estándares de calidad, es por esta razón que después del análisis detallado es necesaria la intervención en la solución de dichas fallas.
- A partir de un desarrollo experimental se comprobó que al disminuir en una etapa la adición de óxido de magnesio (MgO) este reacciona mejor con el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el agua (H_2O) produciendo un aumento del 17,34% en la cantidad de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) producido actualmente, por otra parte, en la etapa de cristalización se comprobó que los ventiladores que actualmente son implementados en la planta si ayudan a la refrigeración pero esta podría ser mejor, pues el objetivo es enfriar la solución en un menor tiempo para aumentar la producción de cristales manteniendo la agitación constante.
- Se detallaron las especificaciones técnicas del proceso con el fin de encontrar la mejor alternativa para dar solución a las fallas importantes identificadas en el desarrollo del diagnóstico y así aumentar la producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en HEBESTA S.A.S. partiendo de un diseño de experimentos con el cual se busca mejorar la dosificación de las materias primas al reactor y el aumento en la producción de cristales en la etapa de cristalización.
- Al aumentar la producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en un 17,34% usando la misma cantidad de materias primas los costos de producción disminuyen \$75.749.678, se debe tener en cuenta que la producción será mayor por esto las utilidades aumentarán, no se tiene un valor exacto pues al ser una aproximación a la proyección, no se conoce la participación de los clientes en la nueva producción; es importante garantizar la calidad del fertilizante para obtener nuevos clientes, pues al aumentar las ventas la utilidad es mayor.

7. RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar una caracterización del agua madre, dado que no se conoce exactamente cuál es su composición y que beneficios o deficiencias pueda traer al proceso de producción de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).
- Se recomienda a los operarios hacer uso obligatorio del kit de seguridad dotado por el encargado de seguridad y salud ocupacional de la empresa, dado que con esto busca prever futuras enfermedades y accidentes dentro de las instalaciones.
- Se recomienda tener en cuenta las alternativas planteadas y desarrolladas en el trabajo de grado presente, para futuras aplicaciones dentro de HEBESTA S.A.S., con las que se busca aumentar la productividad de la misma.
- Es recomendable hacer una modificación en la técnica de vaciado de las tinas de cristalización para evitar que los operarios que realizan este trabajo en la etapa de cristalización, no ingresen a cada una de ellas pues esto podría contaminar el producto terminado y generar baja calidad del mismo.
- Es necesario adecuar una zona exclusiva para realizar con mayor eficiencia la etapa de empaque, puesto que se encuentra expuesto el producto terminado a poluciones y al aire libre.
- Se recomienda la aplicación de la filosofía operacional planteada pues con una mejor estructura a nivel organizacional y operacional, HEBESTA S.A.S., podrá tener procesos eficientes para así poder competir frente a un mercado nacional e internacional.
- A pesar de la generación de lodos o desechos se recomienda realizar un análisis de estos y buscar formas de aprovechamiento de ellos, pues con la aplicación de este trabajo se busca su disminución, pero no certifica la desaparición en totalidad de estos.
- Se recomienda realizar una corrida en planta de esta propuesta y su aplicación correcta, pues esto puede ser clave para disminuir costos en los procesos y obtener un producto con mayor calidad.

BIBLIOGRAFÍA

AGROQUIMICOS. (2010). Compuestos quimicos de los fertilizantes. Retrieved from <https://agroquimicos2010.wikispaces.com/Compuestos+Quimicos+de+los+Fertilizantes>

ALVITES Leyva - De la Cruz Cerna. (2013). Optimización del proceso productivo de sulfato de magnesio heptahidratado mediante el diseño e implementación de una planta piloto de producción de fertilizantes solubles. Trujillo, Perú: Retrieved from [http://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=3214436](http://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=3214436)

AVALOS Miñano, L. J. (2016). Propuesta de mejora en la producción de cal viva para reducir costos operativos en la empresa phuyu yuraq II.

BOHÓRQUEZ Caro, J. M., Gavilán Zafra, P., & Salvatierra Bellido, B. (2008). Fertilización con riego localizado: un sistema en expansión. Agricultura: Revista agropecuaria, (910), 652-656. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=2722446>

BRECHELT, A. (2008). El compost como abono orgánico. Fundación Agricultura Y Medio Ambiente (FAMA)., , 8.

CAJA castañeda, R. R. Proyecto de prefactibilidad para la instalación de una planta de sulfato de magnesio heptahidratado

CAMACHO Lopez, A., Fernandez de la calle, Inmaculada, & Rivas Escudero, J. (2012). Seguridad funcional en instalaciones de proceso: Sistemas instrumentados de seguridad y análisis Diaz de Santos S.A.

CERISOLA, C. Los abonos verdes: Funciones y características. Retrieved from <https://www.ecoagricultor.com/los-abonos-verdes-funciones-y-caracteristicas/>

CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTEQUIOMETRÍA. Unidad: 7 “estequiometría”
Corredor Barrera, A., Sanabria Abreu, N., & Herrera Nova, S. (2014). Reactor enchaquetado Retrieved from <https://www.scribd.com/document/265644033/Reactor-Enchaquetado>
CursoHYSYS_03a. Equilibrium reactor. attachments. recycle. databook. destilación: Shortcut y colums.

Determinación de la Higroscopicidad, & Porosidad y Compacidad de un ladrillo. Trabajo práctico n°2
Ecured. Granulometría. Retrieved from <https://www.ecured.cu/Granulometr%C3%ADa>

Eulàlia Griful Ponsati, Eulàlia Griful, Miguel Ángel Canela Campo. (2005). Gestión de la calidad UPC.

Fertilizante potásico. (2014). Retrieved from https://www.ecured.cu/Fertilizante_Pot%C3%A1sico

Fertilizantes | qué son, usos, clasificación, orgánicos, químicos | plantas. (2017). Retrieved from <https://www.flores.ninja/fertilizantes/>
Fuente:, D.Importancia de los fertilizantes nitrogenados

FLOGLER. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas S. 4ta edición

GARCIA Yaranga, J.Análisis de magnesio por absorción atómica. Retrieved from <https://www.scribd.com/doc/97860817/ANALISIS-DE-MAGNESIO-POR-ABSORCION-ATOMICA>

GUERRERO, R.Manual técnico propiedades generales de los fertilizantes.

JIMEZ Gutierrez, A. (2014). Diseño de procesos en ingeniería química & nbsp;. Calaya, Guanajuato. MEXICO: Reverte S.A.

La guía de química.Valoración complexométrica. Retrieved from <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/valoracion-complexometrica>

LINNOW, K., Niermann, M., Bonatz, D., Posern, K., & Steiger, M. (2014). Experimental studies of the mechanism and kinetics of hydration reactions. Energy Procedia, 48, 394-404. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.046

LÓPEZ, C. (2001). 5S: Seiri, seiton, seiso, seiketsu y shitsuke. base de la mejora... Retrieved from <https://www.gestiopolis.com/5s-seiri-seiton-seiso-seiketsu-y-shitsuke-base-de-la-mejora-continua/>

MONZÓN, D. (1964). Introducción al diseño de experimentos. Maracay, Venezuela: Ministerio de Agricultura y Cria, Centro de Investigaciones Agronomicas. Retrieved from <http://catalog.crl.edu/record=b1470788>
Pág. nº/total:, 1. 9.Ácido sulfúrico 95-99%

NAVARRO Alan Kú. (2008). Sulfato de magnesio heptahidratado

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1486. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grados y otros trabajos de investigación. 2008.

PHILIPPE, G. (2010). Virtualización de sistemas de información con VMware arquitectura, proyecto, seguridad y feedbacks. Ediciones ENI.

QUIMICA Mavar, S. A. Diseño y construcción de planta piloto para la obtención de sulfato de magnesio cristal heptahidratado por medio de un proceso de cristalización continua.

RASHAD, M. M., & Baioumy, H. M. (2005). Chemical processing of dolomite associated with the phosphorites for production of magnesium sulfate heptahydrate. *Ejmp & Ep (European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection)*, 5(2)

ROBERTO, C. P., & Daniel, G. G. *Administración de las Operaciones*

SAIGER, A. El diagrama de ishikawa: Solucionar los problemas desde su raíz 50 minutos.

Sulfato de magnesio. Retrieved from <https://www.scribd.com/doc/12088417/Sulfato-de-Magnesio>
Temperatura Viscosidad Temperatura Viscosidad Temperatura Viscosidad, dinámica dinámica dinámica, & °C kg / (m·s) °C kg / (m·s) °C kg / (m·s). Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas www.vaxasoftware.com

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DE TACHIRA. Solubilidad. Retrieved from <http://www.unet.edu.ve/~labq1/Practicas/Practica%203.htm>

ANEXOS

ANEXO 1.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ENERO 5 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO			Lote:	2-020118
			Fecha:	5-ene-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,26
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	21,2
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	24
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,7
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	35
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8307

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 2.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ENERO 17 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO			Lote:	2-160118
			Fecha:	17-ene-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,38
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	19
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	23
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,6
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	35
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8305

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 3.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ENERO 25 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-230118
		Fecha:	25-ene-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	99,58
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,8306
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	19,34

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 4.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO FEBRERO 1 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-010218
		Fecha:	1-feb-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	99,36
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,8323
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	19,02

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 5.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO FEBRERO 7 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-070218
		Fecha:	7-feb-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	99,03
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,8332
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	16,08

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 6.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO FEBRERO 18 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO			Lote:	1-060218
			Fecha:	18-feb-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,26
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	20,3
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	27,9
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	2
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	30
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8307

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 7.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO FEBRERO 21 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO			Lote:	M-200218
			Fecha:	21-feb-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,52
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	23
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	25,1
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,8
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	80
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8303

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 8.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO FEBRERO 28 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-280218
		Fecha:	28-feb-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	98,51
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,8347
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	21,5

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 9.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO MARZO 5 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	1-050318	
		Fecha:	5-mar-18	
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,28
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	20
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	26,8
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,9
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	70
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8307

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 10.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO MARZO 10 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-100318
		Fecha:	10-mar-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	98,21
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,8335
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	11,31

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 11.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO MARZO 19 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	M-150318	
		Fecha:	19-mar-18	
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,25
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	25,2
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO₂/Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	25,1
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,8
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	119
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8307

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 12.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO MARZO 22 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-220318
		Fecha:	22-mar-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	99,29
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,8325
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	11,46

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 13.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ABRIL 2 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	2-020418	
		Fecha:	2-abr-18	
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,28
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	19,8
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	26,8
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,9
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	28
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8307

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 14.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ABRIL 9 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO			Lote:	1-020418
			Fecha:	9-abr-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,07
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	18,2
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	23,3
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,7
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	75
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,831

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 15.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ABRIL 13 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-130418
		Fecha:	13-abr-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	98,75
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,834
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	12,79

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 16.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ABRIL 23 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO			Lote:	1-230418
			Fecha:	23-abr-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,21
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	14,3
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	16,7
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,2
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	21
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8308

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 17.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO MAYO 10 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.			
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO		Lote:	ECO-090518
		Fecha:	10-may-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	ASTM E 223	98,85
Densidad: g/ml	Min. 1,820	ASTM D 1976	1,8337
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	ASTM D 4052	27,99

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 18.
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO MAYO 10 DE 2.018.

INDUSTRIAS BÁSICAS DE CALDAS S.A.				
Nombre del producto: ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO			Lote:	1-100518
			Fecha:	18-may-18
DESCRIPCIÓN PARÁMETROS	LÍMITE PERMISIBLE	METODO DE ENSAYO	REALIZADO POR	RESULTADO
Concentración: %H ₂ SO ₄ m/m	Min. 98	NTC 1084	EBL	98,17
Hierro: mg Fe/Kg	Max. 50	NTC 1350	EBL	12,8
Selenio: mg Se/Kg	Max. 20	NTC 1084	EBL	Menor 1,0
Sustancias Red. (como mg SO ₂ /Kg)	Max. 30	NTC 1084	EBL	19,1
Factor K	Máximo 5	NTC 1084	EBL	1,4
Turbidez: NTU	Max. 200	Turbidimétrico	EBL	20
Sólidos en suspensión	Sin sólidos	Cualitativo	EBL	Sin sólidos
Color	Incoloro	Cualitativo	EBL	Incoloro
Densidad: g/ml	Min. 1,820	Cálculo	EBL	1,8308

Fuente: industrias básicas de caldas.

ANEXO 19.
TABLA DE CONVERSIÓN MASA A VOLUMEN DE ÁCIDO SULFÚRICO.

Densidad de H₂SO₄: 1,84 g/cm³ =
 1840 kg/m³

Masa (kg)	Volumen (m ³)	Volumen (l)
50	0,0272	27,1739
100	0,0543	54,3478
150	0,0815	81,5217
200	0,1087	108,6957
250	0,1359	135,8696
300	0,1630	163,0435
350	0,1902	190,2174
400	0,2174	217,3913
450	0,2446	244,5652
500	0,2717	271,7391

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 20.
CÁLCULO DE FLUJO MÁSSICO.

$$* m = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}}$$

$$* m = \frac{1.582,86 \text{ kg}}{18000 \text{ s}}$$

$$* m = 0,087936 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 316,572 \text{ kg/h}$$

ANEXO 21.
FÓRMULA PARA NI.

$$Ni = \frac{1}{\rho * a} * \frac{Xi}{Dpi^3}$$

Donde:

- ρ : Densidad de partícula
 a : Factor de forma
 Xi : Masa
 Dpi : Diámetro de partícula.

ANEXO 22.

TABLA PARA CÁLCULO DE DIÁMETRO ARITMÉTICO MUESTRA A-1.

Densidad = 2,66 g/cm³

Masa (g)	Dpi (cm)	Ni/a	Ni/a * Dpi
2,6207	0,36495	20,26915	7,397
22,3000	0,28455	363,871	103,5
31,3000	0,21695	1152,348	250
45,5000	0,18245	2816,425	513,9
60,9000	0,15345	6336,289	972,3
18,3000	0,12905	3201,072	413,1
8,2000	0,1085	2413,476	261,9
1,9920	0,0912	987,241	90,04
2,5630	0,0767	2135,408	163,8
2,4308	0,0645	3405,559	219,7
Sumatoria		22831,96	2996

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 23.

TABLA PARA CÁLCULO DE DIÁMETRO ARITMÉTICO MUESTRA A-2.

Densidad = 2,66 g/cm³

Masa (g)	Dpi (cm)	Ni/a	Ni/a * Dpi
1,3460	0,3650	10,4103	3,799
12,4000	0,2846	202,3319	57,57
9,5000	0,2170	349,7543	75,88
43,2000	0,1825	2674,056	487,9
59,8000	0,1535	6221,84	954,7
33,6000	0,1291	5877,378	758,5
8,8000	0,1085	2590,072	281
4,7000	0,0912	2329,334	212,4
6,4000	0,0767	5332,271	409
16,2000	0,0645	22696,26	1464
Sumatoria		48283,7	4705

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 24.

TABLA PARA CÁLCULO DE DIÁMETRO ARITMÉTICO MUESTRA B-1.

Densidad = 2,66 g/cm³

Masa (g)	Dpi (cm)	Ni/a	Ni/a * Dpi
2,8340	0,3650	21,91887	7,999
6,9000	0,2846	112,5879	32,04
3,7000	0,2170	136,2201	29,55
35,5000	0,1825	2197,43	400,9
55,9000	0,1535	5816,068	892,5
45,3000	0,1291	7923,965	1023
27,5000	0,1085	8093,975	878,2
9,2000	0,0912	4559,547	415,8
2,2000	0,0767	1832,968	140,6
6,6000	0,0645	9246,623	596,4
Sumatoria		39941,3	4417

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 25.
 TABLA PARA CÁLCULO DE DIÁMETRO ARITMÉTICO MUESTRA B-2.

Densidad = 2,66 g/cm³

Masa (g)	Dpi (cm)	Ni/a	Ni/a * Dpi
1,3750	0,3650	10,6346	3,881
8,2000	0,2846	133,8001	38,07
3,5000	0,2170	128,8568	27,96
19,7000	0,1825	1219,419	222,5
62,1000	0,1535	6461,142	991,5
42,7000	0,1291	7469,168	963,9
41,6000	0,1085	12243,98	1328
9,5000	0,0912	4708,228	429,4
7,4600	0,0767	6215,429	476,7
0,4800	0,0645	672,4817	43,38
Sumatoria		39263,13	4526

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 26.
 CÁLCULO CORRIENTE 8.

$$7.000 \frac{kg}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 292 \frac{kg}{h}$$

Donde:

7.000 kg/día = Producción diaria.

ANEXO 27.
 CÁLCULO CORRIENTE 9.

Producción de MgSO₄* 7H₂O / h * Promedio del % de remoción de agua en la etapa de centrifugación = Cantidad de agua removida en la centrifugación

$$292 \frac{kg}{h} * 23\% = 67,16 \frac{kg}{h}$$

Donde 23% es el promedio de remoción de agua en la etapa de centrifugación.

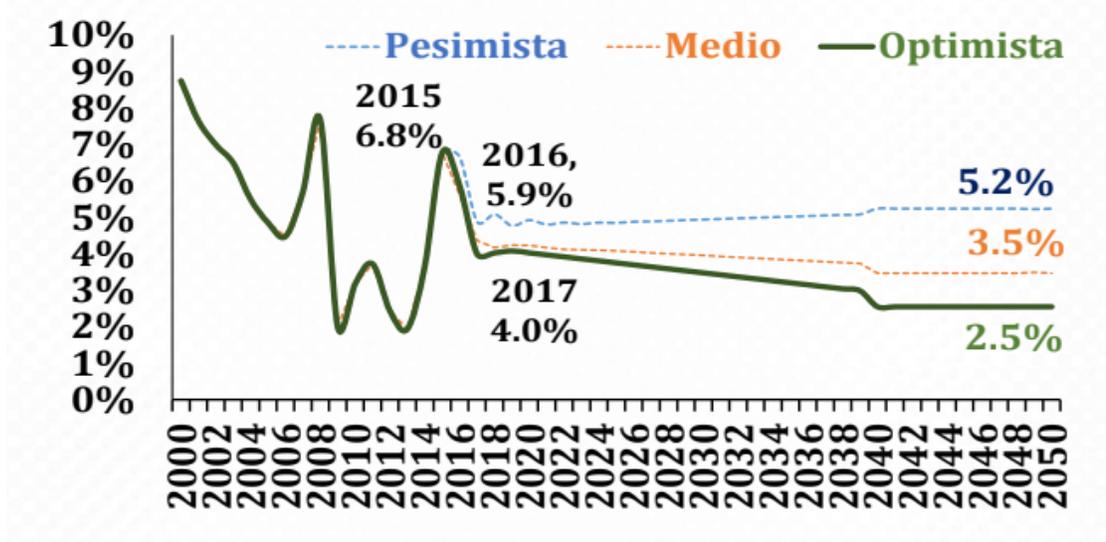
ANEXO 28.
 CÁLCULO CORRIENTE 7.

$$Corriente 7 = Corriente 8 + Corriente 9$$

$$\text{Corriente 7} = (292 + 67,16) \frac{kg}{h}$$

$$\text{Corriente 7} = 359,16 \frac{kg}{h}$$

ANEXO 29.
PROYECCIÓN INFLACIÓN ANUAL (PRECIO CONSUMIDOR) COLOMBIA.



Fuente: DANE- CÁLCULOS UPME