



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de un sistema de retiro de residuos metálicos  
dentro del concentrado de fosfatos**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Carlos Raúl Morales Peña**

Asesor(es):  
Mgtr. Jorge Machacuay Arévalo

Piura, mayo de 2020





*Dedicado a Dios y a mis seres queridos.*



## Resumen Analítico-Informativo

### **Diseño de un sistema de retiro de residuos metálicos dentro del concentrado de fosfatos**

**Carlos Raúl Morales Peña**

Asesor(es): Mgtr. Jorge Machacuay Arévalo

Tesis.

Título de Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Universidad de Piura.** Facultad de Ingeniería.

**Piura, junio de 2020**

**Palabras claves:** fosfatos / minería / secadores rotatorios / separadores magnéticos / método LFRD

**Introducción:** El presente trabajo se enfoca en la problemática generada por la presencia de residuos metálicos en el producto final de un mineral no metálico y de proponer una solución para eliminar estos residuos del concentrado y disminuir los problemas generados en los diferentes equipos de transporte dentro del proceso de secado. Este trabajo tiene como caso de estudio una planta de secado de una mina de fosfatos ubicada en el norte del Perú, cuya producción tiene como destino las actividades vinculadas a la agricultura e industria química.

**Metodología** Se identificaron los residuos metálicos generados en una planta de secado de mineral fosfato y se analizó el impacto generado por esta problemática. Se realizó la selección de un tipo de separador magnético para la extracción de los residuos metálicos presentes en el concentrado seco del mineral, se diseñó la estructura metálica del soporte del equipo utilizando el método LFRD, empleando el software Solidworks se creó un modelo 3D del sistema y se estimaron los costos de implementación.

**Resultados:** La causa del problema de generación de residuos metálicos en el proceso de secado de un mineral no metálico es originada por la corrosión al interior de los secadores rotatorios. Se detalla la propuesta de implementación de un sistema de residuos metálicos con la selección de un electroimán suspendido, materiales, planos de diseño, y se establece la evaluación económica para su instalación.

**Conclusiones:** La relación costo beneficio de la solución propuesta ante la problemática es muy favorable lo cual hace viable su puesta en marcha. La implementación de separadores magnéticos es usada en concentrados seco de mineral, asegurando la calidad del producto final. Esta propuesta se limita a la extracción de residuos metálicos dentro del concentrado seco, por consiguiente, se deberá realizar posteriormente un estudio integral de la planta de secado con el objetivo de reducir la generación de residuos metálicos ocasionado por la corrosión.

**Fecha de elaboración del resume:** 28 de mayo de 2020

## Analytical-Informative Summary

### **Diseño de un sistema de retiro de residuos metálicos dentro del concentrado de fosfatos**

**Carlos Raúl Morales Peña**

Asesor(es): Mgtr. Jorge Machacuay Arévalo

Tesis.

Título de Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Universidad de Piura.** Facultad de Ingeniería.

**Piura, junio de 2020**

**Keywords:** phosphate mineral / mining / rotary drum dryer / magnetic separator / LRFD method

**Introduction:** This thesis focuses on the problems generated by the presence of metallic residues in the final product of a non-metallic mineral to propose a solution to eliminate these residues from the ore concentrate and reduce the problems generated in the different transport equipment within the drying process. The case study is a drying plant of a phosphate mine in northern Peru, whose production is destined for activities related to agriculture and the chemical industry.

**Methodology:** The problem and its impacts produced by metallic residues in a non-metallic ore drying plant were studied. A type of magnetic separator was selected, the equipment support structure was designed using the LFRD method, Solidworks software was used to create a 3D model of the system, and the cost of implementing the proposal were estimated.

**Results:** Corrosion inside the rotary drums dryers causes the generation of metallic residues in the drying process of the non-metallic mineral. The proposal for the implementation of a metal waste system is detailed with the selection of a suspended electromagnet, materials, and design plans, and establishes the economic evaluation for its implementation.

**Conclusions:** The cost-benefit analysis indicates that the implementation of the proposed solution is feasible. Magnetic separators are used in ore concentrates, ensuring the quality of the final product. This proposal is limited to the extraction of metallic residues present in the concentrate, later an integral study in the drying plant must be carried out with the purpose of reducing the generation of metallic residues caused by corrosion inside the rotary drum dryers.

**Summary date:** May 28th, 2020

## Tabla de contenido

Introducción .....	1
Capítulo 1 .....	3
Descripción de la mina de fosfatos .....	3
1.1. Minería metálica.....	3
1.1.1. Situación actual en el Perú .....	4
1.2. Minería no metálica.....	8
1.2.1. Situación actual en el Perú .....	9
1.3. Roca Fosfórica.....	11
1.4. Mina de fosfatos .....	13
1.4.1 Mina .....	14
1.4.2 Planta concentradora .....	14
1.4.3 Planta de secado .....	15
1.5 Importancia de los fosfatos en la región.....	16
Capítulo 2 .....	17
Planta de secado .....	17
2.1. Proceso de secado.....	17
2.1.1 Secadores rotatorios .....	21
2.1.2 Faja transportadora.....	26
2.1.3 Elevador de cangilones.....	27
2.2 Problemática actual .....	30

2.2.1 Abrasión .....	30
2.2.2 Corrosión .....	30
Capítulo 3 .....	35
Sistemas de retiro de residuos metálicos .....	35
3.1 Separadores en la industria .....	35
3.1.1 Separadores mecánicos .....	36
3.1.2 Separadores neumáticos .....	38
3.1.3 Separadores hidráulicos .....	39
3.2. Separadores magnéticos .....	41
3.2.1 Imanes .....	42
3.2.2 Magnitudes magnéticas .....	43
3.2.3 Aspectos generales de un electroimán .....	46
3.2.4 Equipos de separación magnética .....	49
3.3 Electroimanes suspendidos sobre fajas transportadoras .....	52
3.3.1 Selección de electroimanes suspendidos .....	53
3.3.2 Instalación .....	54
Capítulo 4 .....	59
Diseño del sistema de retiro de residuos metálicos .....	59
4.1 Ubicación del separador .....	59
4.2 Selección de separador .....	61
4.3 Diseño de la estructura de soporte .....	64
4.3.1 Equipos y accesorios .....	64
4.3.2 Diseño de la viga de carga .....	68
4.3.3 Diseño de las vigas de soporte .....	78
4.3.4 Diseño de las columnas .....	88
4.3.5 Diseño de uniones .....	95
Capítulo 5 .....	99

Implementación del sistema de retiro de residuos metálicos .....	99
5.1 Operación .....	99
5.2 Mantenimiento .....	100
5.3 Seguridad y Medio ambiente.....	101
5.4 Costos de implementación .....	102
Conclusiones .....	105
Recomendaciones.....	109
Referencias Bibliográficas .....	111
Anexos.....	119
Planos .....	127





## Lista de tablas

Tabla 1. Variedad de minerales metálicos .....	3
Tabla 2. Yacimientos de minerales metálicos .....	4
Tabla 3. Regiones con mayor producción de minerales metálicos .....	5
Tabla 4. Inversiones mineras en las regiones del Perú .....	5
Tabla 5. Producción de minerales metálicos en toneladas métricas finas .....	6
Tabla 6. Destinos de exportación metálica .....	7
Tabla 7. Ranking mundial de producción minera en el Perú .....	7
Tabla 8. Minerales no metálicos .....	8
Tabla 9. Yacimientos de minerales no metálicos .....	9
Tabla 10. Producción de minerales no metálicos en toneladas .....	10
Tabla 11. Principales destinos de exportación no metálica .....	11
Tabla 12. Datos de tambores secadores .....	24
Tabla 13. Parámetros del proceso de secado .....	25
Tabla 14. Dimensiones de aleta del elevador .....	32
Tabla 15. Dimensiones del soporte del elevador .....	33
Tabla 16. Tipo de separadores .....	35
Tabla 17. Tipos de aparatos para separación .....	35
Tabla 18. Acero A36 y AR400 .....	62
Tabla 19. Modelos de electroimanes suspendidos Eriez .....	62
Tabla 20. Especificaciones del electroimán separador .....	64

Tabla 21. Cargas soportadas por viga de carga.....	69
Tabla 22. Propiedades del acero ASTM A992.....	71
Tabla 23. Dimensiones perfil W10x30 .....	73
Tabla 24. Especificaciones de perfil W10x30.....	73
Tabla 25. Razón límite ancho – espesor.....	74
Tabla 26. Razón límite ancho – espesor de perfil W10x30 .....	74
Tabla 27. Falla por cortante según relación $h/tw$ .....	76
Tabla 28. Cargas soportadas por viga de soporte.....	79
Tabla 29. Dimensiones perfil W8x31 .....	82
Tabla 30. Especificaciones de perfil W8x31.....	82
Tabla 31. Razón límite ancho – espesor de perfil W8x31 .....	82
Tabla 32. Dimensiones perfil W10x30 .....	87
Tabla 33. Cargas soportadas por las columnas .....	89
Tabla 34. Longitudes efectivas de columnas .....	91
Tabla 35. Dimensiones perfil W6x9 .....	91
Tabla 36. Valores $\phi_c$ Fcr. respecto a relación de esbeltez .....	92
Tabla 37. Especificaciones de unión roscada.....	96
Tabla 38. Resistencia de diseño de sujetadores.....	96
Tabla 39. Recursos para elementos del sistema.....	103
Tabla 40. Recursos para fabricación e instalación .....	103
Tabla 41. Recursos para instalación.....	104

## Lista de Figuras

Figura 1 Exportaciones de minerales metálicos .....	6
Figura 2. Exportaciones de minerales no metálicos .....	11
Figura 3. Mapa de la ubicación de yacimientos de fosfatos de Bayóvar .....	14
Figura 4. Diagrama de la planta concentradora.....	15
Figura 5. Diagrama de proceso de la planta de secado .....	20
Figura 6. Secador rotatorio y componentes.....	22
Figura 7. Secador rotatorio directo.....	22
Figura 8. Formación de la cortina de material en el tambor rotatorio.....	23
Figura 9. Perfiles de temperatura del material y gases.....	24
Figura 10. Componentes y accesorios en una faja transportadora .....	26
Figura 11. Sección de faja transportadora del concentrado de fosfato seco .....	27
Figura 12. Componentes de un elevador de cangilones .....	28
Figura 13. Funcionamiento de un elevador de cangilones .....	29
Figura 14. Modelado 3D de elevador .....	31
Figura 15. Modelado 3D de unión emperrada del soporte del elevador.....	32
Figura 16. Modelado 3D de la aleta del elevador .....	32
Figura 17. Modelo 3D de soporte con nervio.....	33
Figura 18. Soportes de elevador siniestrados .....	34
Figura 19. Aleta de elevador siniestrado .....	34
Figura 20. Rejilla para limpieza de agua.....	36

Figura 21. Zaranda vibratoria.....	37
Figura 22. Criba de tambor .....	38
Figura 23. Clasificador gravitacional .....	39
Figura 24. Clasificador de aire centrífugo.....	39
Figura 25. Esquema de hidrociclón.....	40
Figura 26. Representación esquemática de flotación por espuma .....	41
Figura 27. Teoría molecular de los imanes .....	42
Figura 28. Campo magnético de un imán permanente.....	43
Figura 29. Densidad de flujo .....	44
Figura 30. Curva de magnetización del hierro .....	45
Figura 31. Campo magnético de un imán permanente.....	46
Figura 32. Esquema de un electroimán .....	48
Figura 33. Separador automático con barras magnéticas.....	50
Figura 34. Rodillo magnético.....	51
Figura 35. Tambor magnético.....	51
Figura 36. Electroimán suspendido sobre faja transportadora.....	52
Figura 37. Electroimán de limpieza manual.....	54
Figura 38. Electroimán de autolimpieza .....	55
Figura 39. Electroimán de limpieza manual en posición 1.....	55
Figura 40. Electroimán autolimpiante en posición 1.....	56
Figura 41. Posición 1 de electroimán de limpieza manual.....	56
Figura 42. Electroimán de limpieza manual en posición 2 .....	57
Figura 43. Electroimán autolimpiante en posición 2.....	57
Figura 44. Electroimán suspendido sobre faja .....	58
Figura 45. Ubicación del separador en la faja transportadora.....	61
Figura 46. Sección de faja transportadora.....	63
Figura 47. Tanque de expansión de aceite .....	63

Figura 48. Dimensiones de Electroimán Eriez SE 7535 .....	64
Figura 49. Especificaciones de trolley de 3 toneladas .....	65
Figura 50. Dimensiones de trolley de 3 toneladas .....	65
Figura 51. Disposición de eslingas de cuatro ramales .....	66
Figura 52. Especificaciones de Grillete.....	66
Figura 53. Especificaciones de Gancho .....	67
Figura 54. Especificaciones de Eslabón.....	67
Figura 55. Electroimán suspendido .....	67
Figura 56. Especificaciones de Eslinga de cable de acero .....	68
Figura 57. Estructura de soporte de electroimán.....	69
Figura 58. Diagrama para carga distribuida .....	70
Figura 59. Diagramas para dos cargas puntual .....	70
Figura 60. Diagramas para una carga puntual (AISC, 1994).....	70
Figura 61. Perfil W .....	73
Figura 62. Valores de parámetros para análisis de viga de carga .....	78
Figura 63. Máxima deformación de viga de carga.....	78
Figura 64. Fuerzas generadas en la viga que soporta el puente grúa .....	79
Figura 65. Vigas de soporte.....	80
Figura 66. Valores de parámetros para análisis de viga de soporte .....	86
Figura 67. Máxima deformación de viga de soporte.....	87
Figura 68. Diseño de estructura de soporte de electroimán .....	88
Figura 69. Electroimán ubicado en el centro de la viga de carga.....	90
Figura 70. Electroimán ubicado en el extremo de la viga de carga .....	90
Figura 71. Valores de parámetros para análisis de columna .....	93
Figura 72. Evaluación de columna.....	93
Figura 73. Máxima deformación (mm) presente en la placa de unión entre columna y viga ..	94
Figura 74. Mínimo factor de seguridad presente en la placa de unión entre columna y viga ..	94



## **Introducción**

Actualmente en el Perú la actividad minera ha logrado un lugar importante en la producción minera mundial, siendo considerada esta actividad como la base de la economía peruana.

La minería dentro del territorio peruano se puede clasificar como: minería metálica donde se lleva a cabo la explotación de minerales metálicos como la plata, cobre, zinc, hierro, molibdeno, estaño, plomo y oro principalmente, y la minería no metálica con la producción de diferentes tipos de minerales no metálicos, tales como fosfato, travertino, caliza, hormigón, talco, sal, arcilla, yeso, cuarzo, calcita, mármol, entre otros.

La producción de los minerales no metálicos se lleva a cabo tras pasar varios procesos usando como mecanismo de transporte del mineral un sistema de fajas transportadoras, cubriendo grandes tramos dentro de la mina para llevar el mineral de un punto a otro desde la extracción hasta el almacenamiento y embarque del concentrado del mineral. A lo largo de este trayecto el mineral va pasando por los equipos de los diferentes procesos hasta la obtención del producto final. Muchas veces al pasar por estas etapas el producto adquiere residuos no deseados que son originados en los procesos previos por causa de problemáticas tales como la corrosión principalmente.

El principal objetivo del presente trabajo de tesis es proponer un sistema para la extracción de residuos metálicos del concentrado seco de mineral en una mina de fosfatos ubicada en el norte de Perú.



## Capítulo 1

### Descripción de la mina de fosfatos

#### 1.1. Minería metálica

La actividad minera consiste en la obtención selectiva de minerales (metálicos y no metálicos) y otros materiales presentes en la corteza terrestre, implicando usualmente la extracción física de grandes cantidades de materiales, que después de pasar por varios procesos de tratamiento se obtiene sólo pequeños volúmenes del mineral deseado para su comercialización (Herrera Herbert & Castilla Gómez, 2012).

La minería metálica constituye la actividad de extracción para conseguir un metal determinado. Estos metales extraídos son diversos y se pueden agrupar en seis tipos tal como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Variedad de minerales metálicos

Tipos	Minerales
Preciosos	Oro, plata y los metales del grupo platino.
Siderúrgicos	Hierro, níquel, cobalto, titanio, vanadio y cromo.
Básicos	Cobre, plomo, estaño y zinc.
Ligeros	Magnesio y aluminio.
Nucleares	Uranio, radio y torio.
Especiales	Litio, germanio, galio y arsénico.

Fuente: (Lira & Molinelli Aristond, 2007)

La actividad minera inicia con la búsqueda de yacimientos de mineral para luego tener un estimado de la cantidad de reservas que se tienen, de acuerdo con ello, se elabora un estudio técnico económico en el que se calculan las reservas, costos de extracción, costos de tratamiento, beneficios y se determina si es factible o no llevar a cabo la explotación. Luego del

proceso de extracción del mineral es necesario procesarlo para aumentar su concentración y ser finalmente comercializado.

El desarrollo de esta actividad extractiva integra el soporte de la industria manufacturera y representa una importante fuente de crecimiento económico para los países en vías de desarrollo (Matamoros & Polit, 2011). Uno de estos países es el Perú, que posee grandes yacimientos de minerales metálicos (ver Tabla 2) y esta actividad es de gran importancia para el país.

Tabla 2. Yacimientos de minerales metálicos

Yacimientos	Minerales	Ubicación
Yanacocha	Oro	Cajamarca
Lagunas norte	Oro	La Libertad
Antamina	Zinc, Cobre, Molibdeno, Plata, Plomo	Ancash
Cerro Lindo	Zinc, Cobre	Ica
Marcona	Hierro	Ica
Cerro Verde	Cobre	Arequipa
Cuajone	Cobre	Moquegua
Animón	Zinc, Cobre	Pasco
Antapaccay	Cobre	Cusco
San Rafael	Estaño	Puno
Toquepala	Cobre	Tacna

Fuente: (PricewaterhouseCoopers, 2013)

### 1.1.1. Situación actual en el Perú

La industria minera metálica constituye uno de los pilares preponderantes para el desarrollo económico del Perú, repercute en la inversión, en las exportaciones, en la recaudación tributaria, en el empleo y en el PBI. (Macroconsult, 2012)

En el Perú la minería está agrupada en tres categorías: gran y mediana minería, la pequeña minería y la minería artesanal. Se tiene un registro total de 9780 titulares mineros según el Ministerio de Energía y Minas, de los cuales 1575 pertenecen a la pequeña minería, 5335 a la minería artesanal y 2960 a la gran y mediana minería. (MINEM, 2017)

Actualmente son ocho los minerales metálicos más importantes para el Perú por ser los principales productos mineros exportados, los cuales son: oro, plata, cobre, zinc, plomo, estaño, hierro y molibdeno (Osinergmin, 2016).

Esta actividad productiva minera es desarrollada en 23 de las 25 regiones del Perú. Las regiones que lideran como los mayores productores de los diferentes minerales metálicos que se explotan en el Perú se detallan en la Tabla 3. Se destacan también regiones como Cajamarca con la producción de oro y cobre, Moquegua y Tacna que explotan el cobre y molibdeno, y finalmente Lima que aporta a la producción nacional con su diversidad polimetálica (MINEM, 2016).

Tabla 3. Regiones con mayor producción de minerales metálicos

Región	Minera	Mineral
Arequipa	Cerro Verde	Cobre
La Libertad	Barrick Misquichilca, La arena	Oro
Pasco	Buenaventura y Milpo	Plomo
Junín	Volcan	Plata
Ica	Marcona de Shougang	Hierro
Puno	Minsur	Estaño
Ancash	Antamina	Zinc

Fuente: (MINEM, 2016)

La localización de los yacimientos mineros dentro del territorio peruano obliga al carácter descentralizado y territorial de las inversiones mineras permitiendo generar flujos dinámicos en las economías locales del país. Las regiones del Perú que han recibido las mayores inversiones mineras en el año 2019 se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Inversiones mineras en las regiones del Perú

Región	Inversiones (Millones de US\$)
Moquegua	1,482
Ica	1,069
Junín	589
Arequipa	411
Ancash	393
Otras regiones	2213

Fuente: (MIMEN, 2019)

La producción de los minerales metálicos ha registrado un crecimiento de 21,20 % en 2016, el más alto de los últimos 25 años como se muestra en la Tabla 5, asimismo las exportaciones mejoraron después experimentar cinco años de descenso, esto debido principalmente a la reducción de los precios internacionales de los metales y del volumen

exportado (ver Figura 1). En el año 2018 la producción del estaño creció un 4.5 % y el hierro en 8.1% (MINEM, 2019). Sin embargo, metales como la plata, oro, plomo, cobre y molibdeno tuvieron una caída en su producción.

Tabla 5. Producción de minerales metálicos en toneladas métricas finas

PRODUCTO		2013	2014	2015	2016	2017	2018 <sup>1/</sup>
COBRE	MILLONES DE TMF	1.38	1.38	1.70	2.35	2.45	2.44
ORO	TMF	151.49	140.10	146.82	153.01	151.96	142.64
ZINC	MILLONES DE TMF	1.35	1.32	1.42	1.34	1.47	1.47
PLATA	TMF	3,674	3,768	4,102	4,375	4,418	4,163
PLOMO	TMF	266,472	277,294	315,525	314,422	306,784	289,195
HIERRO	MILLONES DE TMF	6.68	7.19	7.32	7.66	8.81	9.53
ESTAÑO	TMF	23,668	23,105	19,511	18,789	17,790	18,601
MOLIBDENO	TMF	18,140	17,018	20,153	25,757	28,141	28,034

Fuente: (MINEM, 2019)

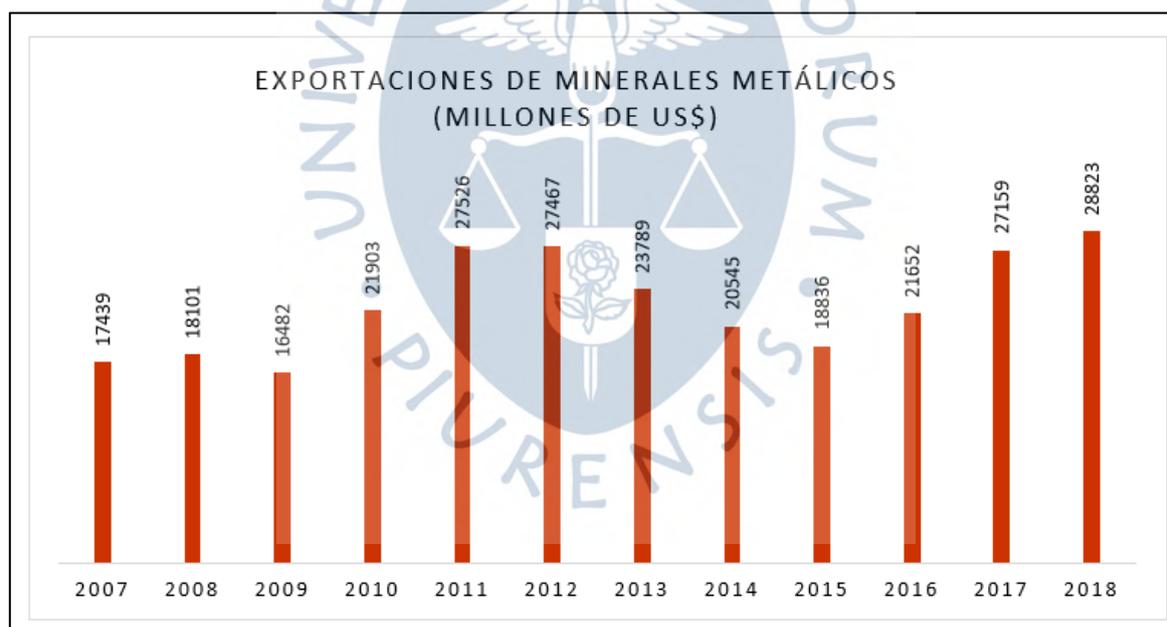


Figura 1 Exportaciones de minerales metálicos

Fuente: (MIMEN, 2019)

El empleo de la producción minera metálica en el Perú presenta una clara tendencia hacia el mercado externo, teniendo un registro que aproximadamente el 95% de la producción de minerales metálicos es exportada (MINEM, 2017). En la Tabla 6 se indican los países de destino con los respectivos productos exportados a cada uno de ellos.

Tabla 6. Destinos de exportación metálica

PAIS DESTINO	PRODUCTOS	US\$ MM
CHINA	COBRE, HIERRO, MOLIBDENO, ORO, ZINC, OTROS	11,040
INDIA	COBRE, ORO, OTROS	2,811
ESTADOS UNIDOS	ESTAÑO, HIERRO, MOLIBDENO, ORO, PLATA, PLOMO, ZINC, OTROS	2,695
SUIZA	COBRE, ORO, PLATA, OTROS	2,365
COREA DEL SUR	COBRE, MOLIBDENO, PLOMO, ZINC, OTROS	1,643
JAPÓN	COBRE, ESTAÑO, HIERRO, PLOMO, ZINC, OTROS	1,608
BRASIL	COBRE, HIERRO, PLATA, OTROS	855
ESPAÑA	COBRE, ESTAÑO, HIERRO, OTROS	686
CANADÁ	PLOMO, ZINC, OTROS	607
ALEMANIA	COBRE, ESTAÑO, OTROS	588
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	ORO, OTROS	504
ITALIA	COBRE, MOLIBDENO, ORO, PLOMO, ZINC, OTROS	399
BULGARIA	COBRE, OTROS	280
REINO UNIDO	COBRE, ESTAÑO, ORO, OTROS	230
CHILE	COBRE, ZINC, MOLIBDENO, PLATA, OTROS	202
FILIPINAS	COBRE, OTROS	201
BÉLGICA	PLOMO, ZINC, OTROS	168
PAÍSES BAJOS (HOLANDA)	COBRE, ESTAÑO, MOLIBDENO, PLOMO, OTROS	141
AUSTRALIA	PLOMO, ZINC, OTROS	67
TAIWÁN	COBRE, ZINC, OTROS	65
OTROS	VARIOS	1,666
<b>TOTAL</b>		<b>28,823</b>

Fuente: (MINEM, 2019)

El incremento en la producción de los minerales metálicos es el resultado de la inversión minera con la entrada en operación de nuevas minas grandes y medianas y la ampliación de las minas ya existentes. Todo esto ha conllevado al Perú, a ser considerado como uno de los mayores productores de minerales metálicos, y referente de actividad minera en Latinoamérica y a nivel mundial, tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Ranking mundial de producción minera en el Perú

Producto	Latinoamérica	Mundo
Cobre	2	3
Plata	1	1
Zinc	1	3
Oro	1	5
Plomo	1	5
Molibdeno	1	3
Estaño	3	11

Fuente: (MINEM, 2019)

El Perú cuenta con reservas minerales suficientes para la generación de un flujo constante de producción de minerales metálicos durante varias décadas, según el Servicio Geológico de Estados Unidos. Se ubica como el primer país con reservas de plata a nivel mundial, a nivel de

Latinoamérica ocupa el primer lugar en reservas de oro, plomo y zinc y el segundo lugar en cobre y molibdeno (MINEM, 2017).

Para el largo plazo en el Perú se espera el inicio de futuras operaciones ya que existe una serie de proyectos que se encuentra en etapa de exploración bajo la expectativa de que se confirmen sus reservas. Sumado a esta situación favorable para el país está la mejora de los precios internacionales de los minerales y el incremento de las inversiones mineras, esperando lograr el 8% de la inversión mundial en las exploraciones para el 2021 (MINEM, 2018).

## 1.2. Minería no metálica

La minería no metálica está constituida por las actividades de extracción de recursos de minerales no metálicos, los cuales son aquellos elementos geológicos que poseen valor económico y que no son ni metales ni combustibles que después de pasar por un tratamiento (Osinergmin, 2016), en el que se involucran varios procesos, se convertirán en productos con propiedades físicas y/o químicas determinadas.

Los minerales no metálicos constituyen un grupo especial de elementos químicos de los cuales no se puede generar ningún nuevo producto si son fundidos. Estos minerales carecen de características metálicas como buena conductividad eléctrica y térmica, brillo, rigor y maleabilidad, sin embargo, son esenciales para los sectores industriales y agrícolas. La variedad de los minerales no metálicos extraídos, sin ser limitante, se pueden agrupar en dos tipos como se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Minerales no metálicos

Tipos	Minerales
Minerales industriales	Potasio, cuarzo, sal común, feldespato, amianto, caliza, dolomita y los fosfatos.
Materiales de construcción	Arena, grava, arcillas, caliza, esquistos para la fabricación de hormigón, granito, mármol, piedra.

Fuente: (Lira & Molinelli Aristond, 2007)

Esta actividad representa una gran oportunidad para diversificar la producción de la mediana y pequeña minería. Es por este motivo que la gran parte de los yacimientos no metálicos se explotan a nivel de pequeño tamaño, normalmente en operaciones de superficie o también denominada de cielo o tajo abierto (MINEM, 2017), luego de un tratamiento simple de molienda, clasificación, lavado, secado, etcétera.

Del conjunto de minerales producidos en el Perú, la minería no metálica se caracteriza por la producción de grandes volúmenes de material, excediendo largamente la de los minerales metálicos, no obstante, el valor unitario es mucho menor comparado con estos últimos (Haberer,

2009). La ubicación de los principales yacimientos de minerales no metálicos en el Perú se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9. Yacimientos de minerales no metálicos

Ubicación	Minerales
Piura	Bentonita, fosfatos, sal, yeso, diatomita.
La Libertad	Dolomita y arcillas.
Cajamarca	Piedra caliza.
Amazonas	Dolomita, arcillas.
Lima	Sal, caliza, yeso, arcilla y bentonita.
San Martín	Dolomita y arcillas.
Ica	Sulfatos, yeso y sal.
Arequipa	Borato, ulexita y potasio.
Junín	Caliza, dolomita, puzolana, yeso, arcilla y bentonita.

Fuente: (PricewaterhouseCoopers, 2013)

### 1.2.1. Situación actual en el Perú

El país produce más de 34 tipos de minerales no metálicos que, a diferencia de la minería metálica, su desarrollo no solo se orienta a la fase productiva sino al uso final de los productos derivados, generando gran interés en diversos sectores.

Abastece de materias primas a un amplio mercado, fundamentalmente vinculado a la industria de la construcción y la elaboración de cemento; así como sales, nitratos y carbón relacionados a actividades productivas industriales (MINEN, 2019).

El consumo de la producción no metálica ha experimentado un crecimiento exponencial en el Perú, esto debido al auge del sector vivienda y construcción (Tamayo, Salvador, Vásquez, & Zurita, 2017).

Según el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), refiere que el 16% de las concesiones mineras otorgadas en el Perú corresponden a minerales no metálicos, destacando por su número las regiones de Piura, Cajamarca, La Libertad, Ancash, Lima, Junín, Ica, Arequipa, Cusco y Puno.

Los minerales no metálicos con más demanda y más importantes para el Perú son: la caliza o dolomita, el hormigón, arcilla, calcita, piedra, arena gruesa y fina y sal común y la cantidad de producción se muestra en la Tabla 10 comprendida entre los años 2014 y 2018 (MINEM, 2019). Dentro de estos minerales no metálicos se ha sumado la producción de fosfatos o roca fosfórica, que ha cobrado relevancia con las operaciones mineras de fosfatos

ubicada en Bayóvar (Piura), siendo considerada esta unidad minera como la más grande de su tipo en Latinoamérica.

Tabla 10. Producción de minerales no metálicos en toneladas

PRODUCTO	2014	2015	2016	2017	2018 <sup>1/</sup>
CALIZA/DOLOMITA	21,985,639	24,661,948	18,819,424	20,273,312	30,526,000
FOSFATOS	10,884,269	11,161,636	10,561,111	8,450,379	10,308,276
HORMIGÓN	8,755,510	7,202,734	5,529,134	7,014,038	8,337,118
CALCITA	1,006,527	1,587,265	2,149,981	1,908,364	2,157,037
ARENA (GRUESA/FINA)	1,213,404	1,873,669	1,699,371	1,501,715	1,578,070
SAL	1,175,157	1,471,131	1,450,415	1,481,398	1,509,564
PIEDRA (CONSTRUCCIÓN)	1,237,080	2,189,092	1,708,521	1,342,812	1,452,514
CONCHUELAS	57,864	443,363	1,270,521	922,161	1,401,317

Fuente: (MINEM, 2019)

En el número de empresas que ha registrado actividad no metálica durante el año 2017 asciende a 212 (MINEM, 2018). Entre los principales productores de minerales no metálicos en el Perú destacan: Vale, Unión Concreteras, Minera Chinalco, Unión Andina de Cementos, Cementos Pacasmayo, Yura, Cemento Andino, entre otras compañías.

La categoría minería pequeña y artesanal posee una composición concentrada en la minería no metálica, las cuales registran un volumen de extracción del 9% y 1 % respectivamente. Lo volúmenes de producción agregada, liderada por los insumos destinados a la construcción se distribuyen en mayor proporción en las empresas bajo la categoría de gran y mediana minería, registrando un volumen de extracción equivalente al 90% (MINEM, 2017).

En tanto, la exportación de minerales no metálicos en el año 2017, fue inferior en un 8,43% a lo registrado en el año 2016, tal como se muestra en la Figura 2, esto debido a un menor volumen exportado por una baja producción general, especialmente de calizas y fosfatos, asimismo en la Tabla 11 se indican los países de destino con los respectivos productos exportados a cada uno de ellos.



Figura 2. Exportaciones de minerales no metálicos

Fuente: (MINEM, 2017)

Tabla 11. Principales destinos de exportación no metálica

PRODUCTO	
Estados Unidos	Fosfatos, Cerámicos, Vidrio / Silice; Andaluca; Antracita, Marmol, Sal, Otros.
Brasil	Fosfatos, Cemento, Andaluca; Antracita, Otros.
Chile	Fosfatos, Cerámicos, Vidrio / Silice; Cemento, Antracita, Marmol, Talco, Sal, Yeso, Caolin,
India	Fosfatos, Otros.
Bolivia	Cemento, Cerámicos, Vidrio / Silice; Antracita, Talco, Caolin, Otros.
Colombia	Cerámicos, Antracita, Talco, Sal, Caolin, Otros.
Argentina	Fosfatos, Cemento, Talco, Otros.
Ecuador	Cerámicos, Antracita, Marmol, Talco, Yeso, Caolin, Otros.
República Dominicana	Cerámicos, Vidrio / Silice; Sal, Otros.
Indonesia	Fosfatos, Otros.
Puerto Rico	Cerámicos, Cemento, Sal, Otros.
México	Fosfatos, Cerámicos, Cemento, Andaluca; Antracita, Marmol, Otros.
Malasia	Fosfatos, Otros.
Venezuela	Vidrio / Silice; Antracita, Marmol, Talco, Caolin, Otros.
Guatemala	Cerámicos, Vidrio / Silice; Antracita, Otros.
Australia	Fosfatos, Otros.
Panamá	Cerámicos, Antracita, Marmol, Talco, Caolin, Otros.
Países Bajos (Holanda)	Vidrio / Silice; Andaluca; Otros.
Alemania	Vidrio / Silice; Andaluca; Antracita, Otros.
Emiratos Árabes Unidos	Vidrio / Silice; Marmol, Otros.
Otros / Other	Varios

Fuente: (MINEM, 2017)

### 1.3. Roca Fosfórica

Roca fosfórica es un nombre colectivo que cubre una amplia variedad de tipos de rocas con diferentes texturas y composición mineral que contienen fosfatos. Es la principal fuente de

fósforo y el contenido total de este elemento de la roca fosfórica se expresa convencionalmente como pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ). A mayor contenido de fosfato ( $P_2O_5$ ), mayor es el potencial económico de la roca (FAO, 2007).

Las rocas fosfóricas constituyen un recurso natural finito, no renovable y constituyen la materia prima básica para la producción de los fertilizantes fosfatados (FAO, 2007).

Los depósitos geológicos de diferente origen se encuentran en todo el mundo. Estos depósitos de roca fosfórica se encuentran distribuidos en todo el mundo, tanto geográfica como geológicamente y la enorme cantidad de estos recursos existentes son capaces de satisfacer la demanda estimada para el futuro.

Aproximadamente cerca del 80 % de la producción mundial de roca fosfórica es de origen sedimentario marino, un 17 % es de origen ígneo y de sus productos derivados de la meteorización; el resto proviene de los depósitos sedimentarios residuales y de tipo guano (FAO, 2007).

La industria mundial de los fosfatos está basada en la explotación de algunos depósitos de rocas fosfóricas que se encuentran principalmente como sedimentos marinos y se estima que los recursos mundiales de fosfato de roca son más de 300 mil millones de toneladas (Jasinski, Phosphate Rock , 2018).

Las rocas fosfóricas de acuerdo con sus características pueden ser utilizadas para las siguientes aplicaciones (FAO, 2007):

- Las rocas fosfóricas pueden ser utilizadas como materia prima para la fabricación industrial de los fertilizantes fosfatados solubles en agua. La industria de los fertilizantes consume cerca del 90 por ciento de la producción mundial de roca fosfórica.
- Utilizadas para fines industriales y para la producción de productos alimenticios y de suplementos para la alimentación de animales.
- La práctica de la aplicación directa de diversas fuentes de rocas fosfóricas como fertilizantes presenta muchas ventajas, pueden ser utilizadas en la agricultura, esto por ser productos naturales. Sin embargo, no todas son las adecuadas para la aplicación directa.

Los depósitos de roca fosfórica de Estados Unidos de América en Carolina del Norte, de Perú y de Túnez pueden ser considerados como los más importantes a nivel mundial para la aplicación directa por su mayor reactividad (solubilidad) (Jasinski, Phosphate Rock, 2003).

El uso de las rocas fosfóricas con las tecnologías adecuadas como fuente de fósforo en el sector de la agricultura puede contribuir a la intensificación sostenible en los países en vías de desarrollo, particularmente en aquellos que cuentan con depósitos sedimentarios de roca fosfórica como es el caso de Perú.

A nivel mundial se espera que la capacidad de producción de roca fosfórica aumente un 2% anual hasta 2020, siendo las mayores áreas de crecimiento previstas para África y el Medio Oriente. Además, se espera que otros importantes proyectos de roca fosfórica se inicien en el año 2020 en Argelia, Brasil, Egipto, Jordania, Kazajstán, Perú, Rusia y Senegal (Jasinski, Phosphate Rock, 2003).

#### **1.4. Mina de fosfatos**

Los fosfatos se encuentran entre las 3 primeras actividades extractiva de minerales industriales a nivel nacional. Su producción que tiene como destino a las actividades vinculadas a la agricultura y la industria química, alcanzó en el año 2017, un volumen de 8.5 millones de toneladas, reduciendo su producción en un 20% respecto del año anterior (MINEM, 2018).

Los fosfatos formados por fósforo, nitrógeno y potasio constituyen un mineral no metálico que se encuentra en gran cantidad en los yacimientos de salmuera de Bayóvar, en Sechura, Piura. Esta roca fosfórica se caracteriza y es reconocida mundialmente por los siguientes aspectos (Oruna, 2015):

- Buen contenido de  $P_2O_5$ , con una concentración mínima de 29%.
- Alta solubilidad.
- Bajo nivel de impurezas.

Piura es único departamento del Perú en ser productor de dicho mineral no metálico, en donde el proyecto de fosfatos ubicado en Bayóvar tiene como objetivo principal la extracción y concentración del yacimiento de fosfatos más grande de Sudamérica.

Los yacimientos de fosfatos están ubicados al sur de la bahía de Sechura, en la costa del departamento de Piura (ver Figura 3), en la zona denominada Bayóvar, al sur de la bahía de Sechura a 30 kilómetros del Océano Pacífico.



Figura 3. Mapa de la ubicación de yacimientos de fosfatos de Bayóvar  
Fuente: (MINEM, 2016)

La infraestructura de este proyecto comprende principalmente 4 componentes: el área de mina, planta concentradora, zona de secado y puerto.

#### 1.4.1 Mina

La explotación del mineral se realiza a cielo abierto o también denominada tajo abierto, eliminando las capas superiores del suelo para la extracción de la roca fosfórica. El material sedimentario y la arena son removidos para dejar expuesta la roca fosfórica.

Las características que posee el terreno permiten llevar a cabo la excavación mediante maquinaria con palas hidráulicas, niveladoras, cargadores frontales y camiones.

La arena y el material sedimentario extraídos son depositados en el botadero de desmonte, mientras que el mineral extraído es transportado en camiones y acopiado en una zona conocida como pilado de mineral.

#### 1.4.2 Planta concentradora

La finalidad de esta planta es producir concentrado húmedo de fosfato. El mineral llega mediante una faja transportadora hasta la planta concentradora donde es sometido en forma sucesiva a lavados con agua de mar y separaciones gravimétricas. Para la etapa final del proceso el concentrado de fosfato es lavado con agua desalinizada para retirar la mayor cantidad de sales presentes en el concentrado (ver Figura 4).

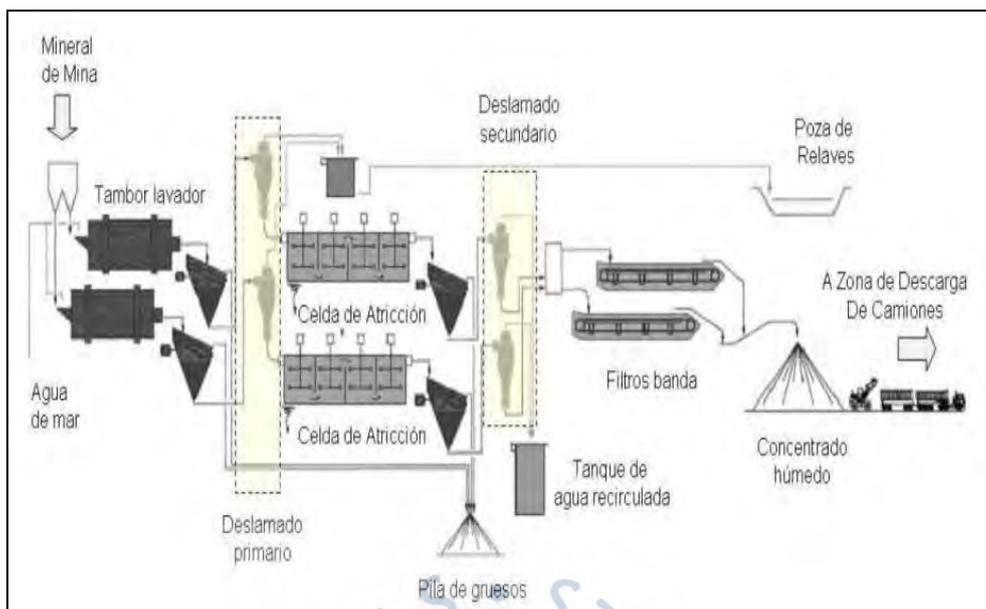


Figura 4. Diagrama de la planta concentradora  
Fuente: (Vale, 2011)

Dentro de la planta concentradora se emplean cantidades grandes de volúmenes de agua de mar y agua desmineralizada. Cuenta con un sistema de captación y la línea de impulsión de agua de mar, diseñada para el suministro de agua para la planta concentradora. El agua de mar es descargada en pozas de sedimentación, donde se separa principalmente la arena, y el agua por rebose se almacena en la poza de almacenamiento para ser usado en el lavado de la roca fosfórica. Una parte del agua de mar que llega a la planta concentradora es procesada adicionalmente para obtener agua desmineralizada, la cual es usada en el lavado final de los concentrados de fosfatos (Oruna, 2015).

Dos tipos de desechos son generados denominados relaves gruesos y relaves finos que son dispuestos en zonas específicas dentro de la mina. El concentrado de fosfato es almacenado para luego ser transportado hacia la zona de descarga de camiones. Posteriormente el transporte de concentrado húmedo de fosfato desde la planta concentradora hasta la descarga de camiones se lleva a cabo a través la carretera industrial. Esta carretera tiene una distancia aproximada de 30 km, por la cual circulan camiones de 70 toneladas de capacidad (Oruna, 2015).

El mineral proveniente de la planta concentradora es depositado por los camiones en dos grandes tolvas de recepción y el concentrado húmedo es transportado hacia la planta de secado y almacenamiento por medio de un sistema de faja transportadora. Esta faja transportadora cubre una distancia aproximadamente de 5 kilómetros.

### 1.4.3 Planta de secado

Ubicada al sur de la bahía de Sechura, está constituida por el sistema de secado, silo de almacenamiento e instalaciones auxiliares.

Es en esta planta de secado, donde el concentrado húmedo es secado en los hornos rotatorios hasta conseguir un producto seco para luego ser almacenado en los silos. Posteriormente el concentrado seco de fosfatos es llevado mediante un sistema de fajas transportadoras y ser embarcados en la zona del puerto.

### **1.5 Importancia de los fosfatos en la región**

Los fosfatos de Bayóvar fueron descubiertos en el siglo pasado y representa uno de los yacimientos más grandes del mundo, siendo su geología y reservas muy conocidas. Son fertilizantes de gran importancia para los suelos ácidos y lavados, teniendo así un gran potencial en países amazónicos como es el caso de Perú, Brasil y otros países (Mincetur, 2004).

Las propiedades de los productos químicos de estos recursos no renovables son únicas, debido al importante papel que juega el fósforo en numerosos procesos bioquímicos al interior de personas, animales y pueden ser usados como fertilizantes de aplicación directa en nuestro país, ya que uno de los aspectos que caracteriza este producto es su alta solubilidad, favoreciendo que el mineral en forma de ion fosfato  $P_2O_5$  sea absorbido rápidamente por las plantas.

Piura es una de las principales regiones minera no metálica del país, siendo considerado el complejo Minero-Industria Bayóvar como uno de los grandes yacimientos de roca fosfórica y minerales no metálicos a nivel mundial (Mincetur, 2004).

Desde el año 2010 se vienen explotando los yacimientos de fosfatos en Sechura, cuyos yacimientos cuentan con reservas comprobadas de concentrado de fosfatos de 238 millones de toneladas. Constituyendo uno de los mayores yacimientos de explotación de fosfatos de América del Sur, con unas previsiones de producción anual de 3,9 millones de toneladas de concentrados para la exportación (Oruna, 2015).

La etapa productiva de la minería de fosfatos ubicada en Bayóvar marca un hito histórico hacia un nuevo desarrollo del Perú, comparable con la producción del gas natural de Camisea (MINEM, 2017).

Uno de los principales beneficios es el aumento de las exportaciones, siendo el destino principal de la producción fosfatos el mercado brasileño, donde la demanda de fertilizantes es creciente y debido a que en la actualidad Brasil importa el 53% de los fosfatos que consume para producir fertilizantes. Otros destinos son los países asiáticos de la cuenca del Pacífico, sin dejar de priorizar la demanda interna (MINEM, 2017). Estas exportaciones de fosfato a nivel regional se han llevado a cabo proyectos en los sectores de agua y saneamiento, salud, energía, educación y agricultura en beneficio de la población, siendo fuente de trabajo directo e indirecto en la región y el país.

## Capítulo 2

### Planta de secado

#### 2.1. Proceso de secado

El secado describe el proceso térmico de retirar el agua u otros líquidos de una solución, suspensión u otra mezcla sólido-líquido para formar un sólido seco (C.Rolle, 2006).

Es una operación compleja que implica transferencia transitoria de calor y masa junto con varios procesos, tales como transformaciones físicas o químicas, que a su vez pueden causar cambios en la calidad del producto.

El secado de sólidos requiere un conocimiento cuantitativo de los factores que afectan al movimiento tanto del líquido como del vapor bajo ciertas condiciones térmicas dadas (G. Nonhebel & A.A.H Moss, 1979). Durante el secado, un sólido húmedo experimentará dos procesos que producen de forma simultánea (Mujumdar, 2006):

1. Transferencia de energía principalmente en forma de calor del entorno circundante para evaporar la humedad superficial.

Las condiciones externas son especialmente importantes durante las etapas iniciales de secado cuando se elimina la humedad superficial. La evaporación superficial es controlada por el vapor de difusión de la superficie del sólido a la atmósfera circundante a través de una fina película de aire en contacto con la superficie.

En este proceso las variables esenciales son la temperatura, la humedad, la velocidad y la dirección del flujo de aire, asimismo la forma física del sólido, la conveniencia de la agitación y el método de manejo del sólido durante el secado.

2. Transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido y su evaporación posterior debido al proceso anteriormente mencionado. El movimiento de la humedad interna dentro del sólido es una función de la naturaleza física del sólido, de la

temperatura, y del contenido de humedad. Este proceso permite que el contenido alto de humedad de un producto pueda ser llevado a un contenido final de humedad bajo.

En una operación de secado, cada de uno de estos dos procesos puede ser un factor limitante que determine la velocidad de secado, a pesar de que ambos actúen simultáneamente a lo largo de todo el ciclo del proceso de secado (Mujumdar, 2006).

El método más común en el secado industrial de un producto es introducir aire caliente, evaporando de esta forma la humedad contenida en el material.

El comportamiento del secado de los productos sólidos puede caracterizarse por medir la pérdida de contenido de humedad en función del tiempo. El contenido final de humedad del producto es el determinante para configurar el tiempo y las condiciones requeridas para el secado. Asimismo, la elección del contenido de humedad final está determinado en gran medida por el almacenamiento y por requisitos de establecidos por los clientes.

Actualmente en la industria la gran mayoría de productos son sometidos al proceso de secado en alguna etapa de todo el proceso de producción, salvo con algunas pocas excepciones.

El secado es una operación esencial en el sector químico, agrícola, biotecnológico, alimentario, polímero, cerámico, farmacéutico, papel y celulosa, procesamiento de minerales, etcétera (Ruiz, 2014).

En la minería, el producto pasa por un proceso de secado en algún momento de todo el tratamiento, debido al contenido de humedad que poseen, ya sea por el alto contenido de humedad natural en cantera o porque hayan sido sometidos previamente a algún proceso de clasificación o limpieza por vía húmeda.

La producción de los fosfatos no es ajena a este proceso, por ello el objetivo de la planta de secado es obtener un producto seco de mineral. Para la obtención del producto final de concentrado de fosfato es necesario realizar un proceso de secado, esto debido a que la roca fosfórica es sometida por un proceso de lavado con agua de mar en la planta concentradora, adquiriendo así un alto contenido de humedad, la cual es removida del mineral en la planta de secado de acuerdo con los estándares requeridos por los usuarios finales.

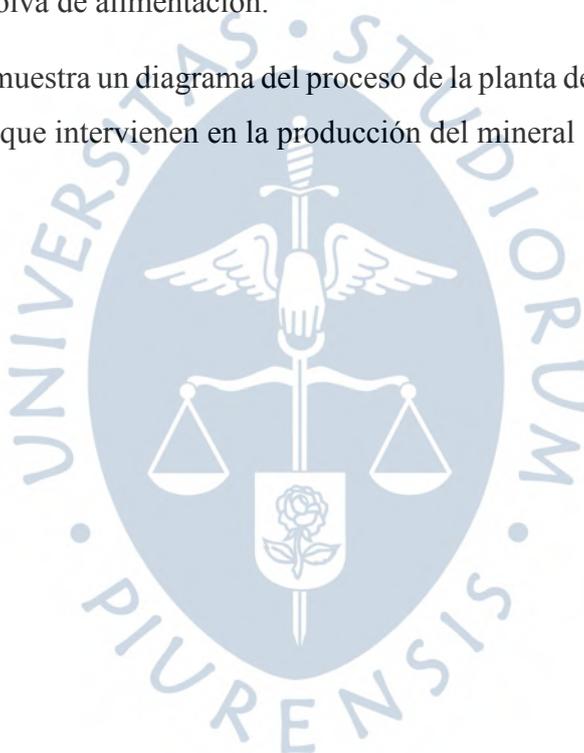
El proceso de secado del mineral fosfato en la planta de secado se inicia con el transporte del mineral húmedo proveniente de la planta concentradora ubicada en el área de mina con un contenido de humedad entre 15% y 17%, este mineral es transportado a través de una faja transportadora y depositado en dos silos de almacenamiento de material húmedo para luego ser

dirigido hacia los secadores. A partir de este punto se derivan dos líneas de proceso con características iguales de operación denominadas Línea 1 y Línea 2.

Cada uno los dos silos de almacenamiento de material húmedo cuentan con una faja transportadora denominada alimentadora, que tiene como función el determinar el flujo de mineral húmedo hacia los secadores porque trabajan con un variador de velocidad.

Estas fajas denominadas alimentadoras operan al 75% de su velocidad, representando un ingreso de 300 t/h de material húmedo a cada tambor rotatorio por cada línea de proceso. Descargan el mineral que será transportado posteriormente hacia el tambor secador rotatorio por medio de otras fajas transportadoras que opera a velocidad constante y depositan el material a través de un chute o tolva de alimentación.

En la Figura 5 se muestra un diagrama del proceso de la planta de secado, donde se indican los equipos principales que intervienen en la producción del mineral seco.



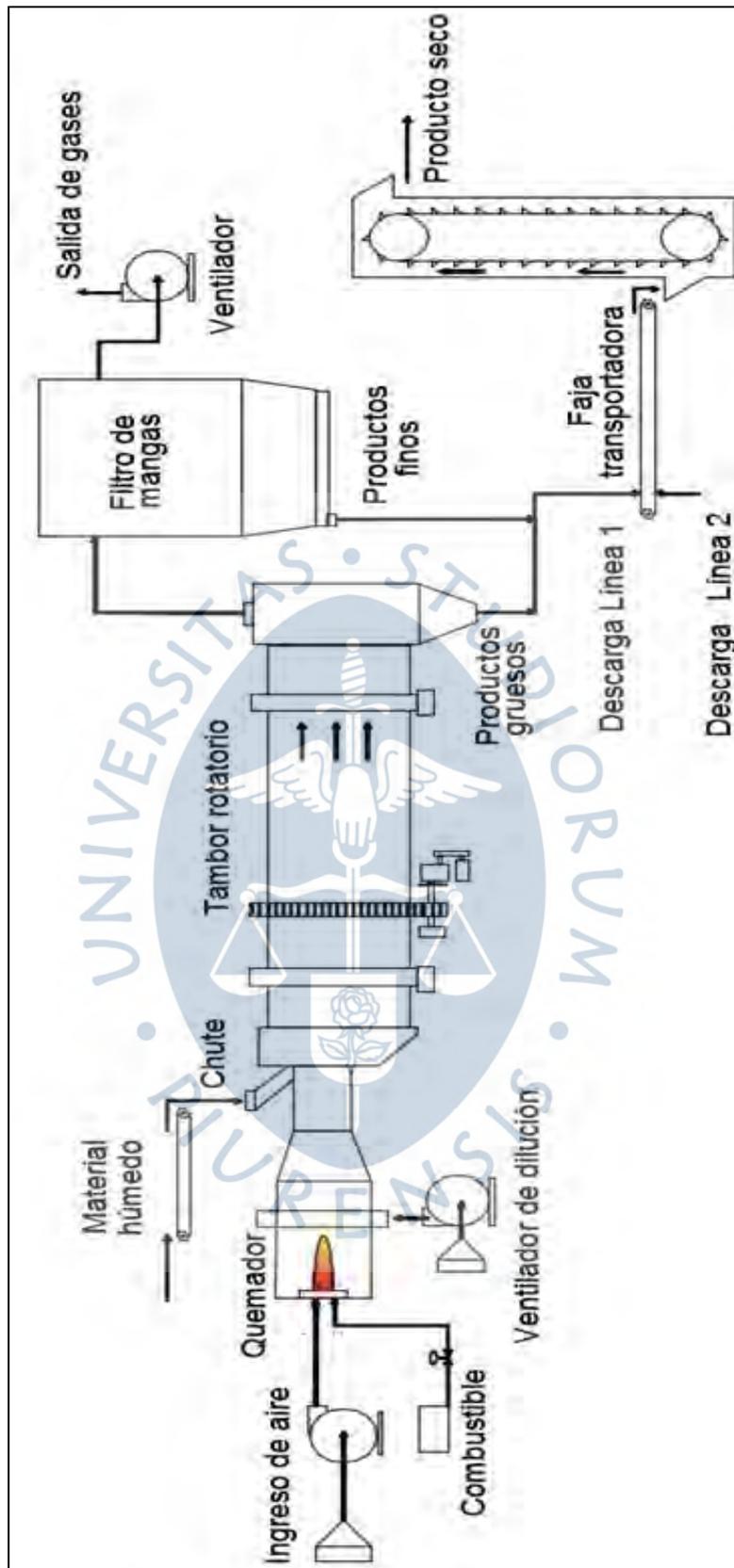


Figura 5. Diagrama de proceso de la planta de secado  
Fuente: Elaboración propia

### 2.1.1 Secadores rotatorios

El secado de sólidos depende del mecanismo predominante, según sea, transferencia de calor por convección, conducción o radiación. En la práctica, el mecanismo predominante es la convección, utilizada en secadores directos donde el material es secado por contacto directo con una corriente de gas caliente que pasa a través o sobre el material; y la conducción, en secadores indirectos en los cuales el material se calienta a través de una pared. Es raro que un secador opere solamente por radiación (G. Nonhebel & A.A.H Moss, 1979).

Son muy adecuados para el secado de productos granulares, con buenas características de flujo que requieren tiempos de secado, materiales termosensibles. No son aplicables para las condiciones en los cuales los materiales de trabajo sean demasiado pegajosos que requieran de un tiempo de secado prolongado.

A nivel industrial este tipo de secadores son los más utilizados para el proceso de secado por constituir un método rápido y de bajo costo para las grandes cantidades de producción. Los principales componentes de un secador rotatorio son los siguientes (FEECO Internacional, 2017):

- Quemador: son los equipos donde se lleva a cabo la combustión. Es el motor detrás de cualquier secador, determinando la salida de BTUs / Watts. Pueden trabajar con la cámara de combustión con entradas de aire.
- Cámara de combustión, actúa como reactor y dirige el flujo de aire del secador rotativo. Las cámaras de combustión también se pueden acomodar a una gran variedad de quemadores.
- Elevadores también conocidos como *lifters*: son paletas que remueven el material facilitando el flujo del producto dentro del tambor rotatorio y favorecen el incremento del coeficiente de transferencia térmica del equipo.

Al girar el tambor rotatorio, los elevadores levantan el material y lo dejan caer en forma de cascada favoreciendo el contacto entre los gases calientes y las partículas del material.

- Tambor rotatorio: es un cilindro hueco por el cual circula el material. Al interior de este componente se produce la transferencia de calor entre los gases y el material húmedo. Tiene una zona para el ingreso del material húmedo denominado chute o tolva de alimentación y otra para la descarga del material seco ubicada el extremo inferior del tambor. Estos componentes del secador rotatorio se muestran en la Figura 6. Estos tambores secadores rotatorios pueden ser de intercambio directo o indirecto. Los secadores rotatorios de

intercambio directo introducen los gases de combustión directamente en el tambor rotatorio y por otro lado los secadores rotatorios de intercambio indirecto se utilizan cuando los productos no pueden entrar en contacto con los gases de combustión.

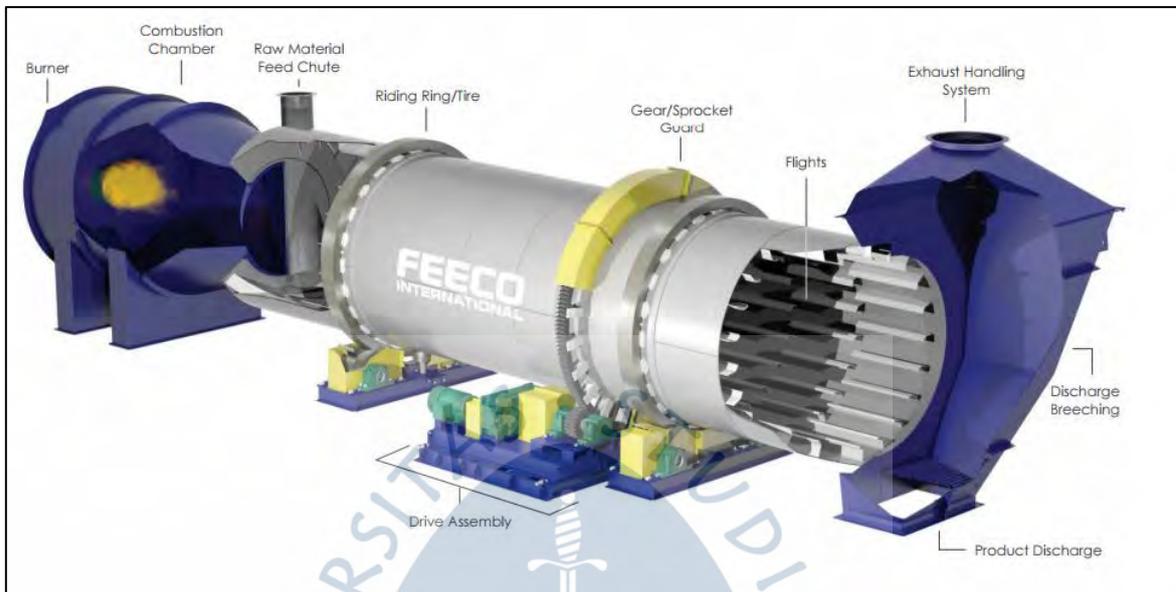


Figura 6. Secador rotatorio y componentes  
Fuente: (FEECO Internacional, 2017)

### 2.1.1.1 Principio de funcionamiento:

Los secadores rotatorios trabajan por caída o volcadura del material en el interior de un tambor giratorio en presencia de una corriente de gases calientes provenientes de la cámara de combustión (ver Figura 7).

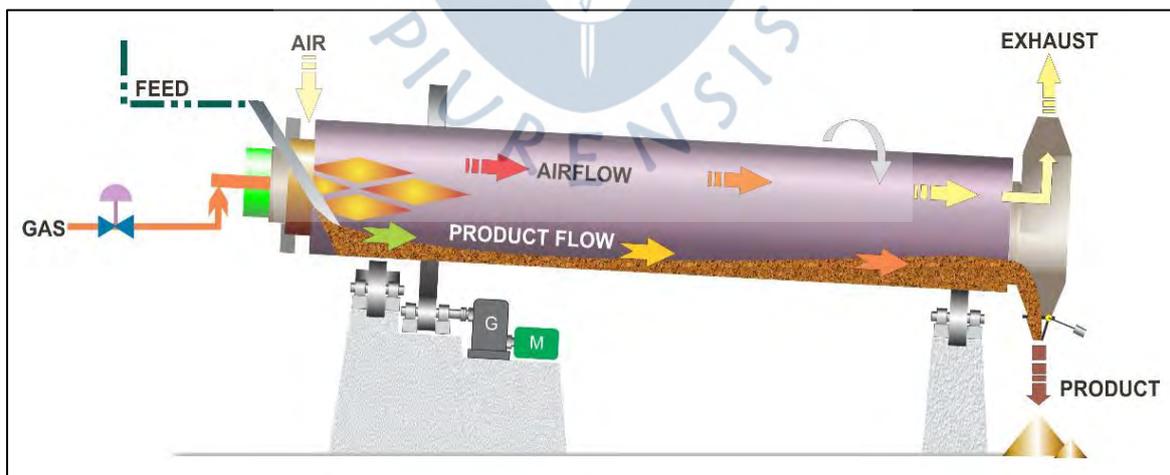


Figura 7. Secador rotatorio directo  
Fuente: (FEECO Internacional, 2017)

El tambor es colocado a manera que presente una ligera pendiente horizontal para permitir que la gravedad favorezca el movimiento del material que circula a través del tambor. A medida

que el tambor gira, los elevadores toman el material y lo dejan caer formando una cortina de material (Olukayode, 2011) como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Formación de la cortina de material en el tambor rotatorio  
Fuente: (Olukayode, 2011)

El material húmedo está en contacto con el gas en su temperatura más alta, evaporando rápidamente la humedad superficial del material. La velocidad de transferencia de calor inicial es alta, provocando una caída inmediata y considerable de la temperatura del gas, que evita el sobrecalentamiento del material y del casco del tambor secador. El producto final está en contacto con el gas en su temperatura más baja, permitiendo que el contenido de humedad sea fácilmente controlado y manteniendo en un valor preestablecido la temperatura del gas de escape del secador (Castaño, Rubio, & Ortega, 2009). En la Figura 9 se muestra el comportamiento de la temperatura de los gases y del material a lo largo del tambor rotatorio.

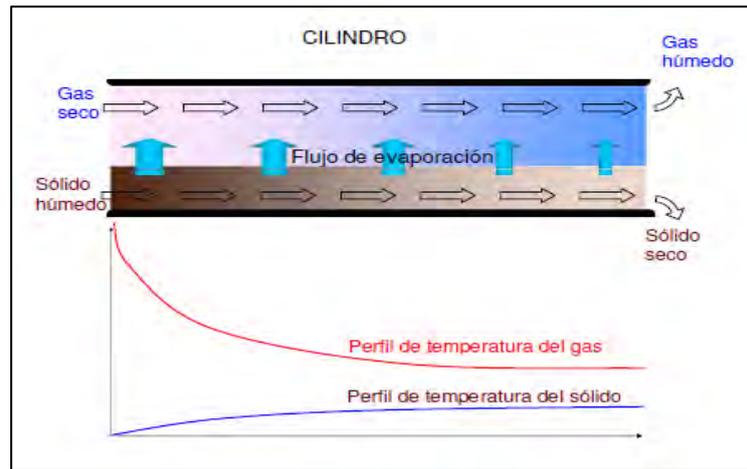


Figura 9. Perfiles de temperatura del material y gases  
Fuente: (Castaño, Rubio, & Ortega, 2009)

La eficiencia del secador depende en gran medida de la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida de los gases, aunque hay otros factores que tienen influencia sobre la transferencia de calor como son la relación entre el diseño de los elevadores y la velocidad de rotación del tambor secador. Sin embargo, independientemente de las temperaturas del gas y del material, el tiempo de secado o tiempo de residencia del material en el interior del tambor secador puede ser crítico, ya que esto se rige por la velocidad de difusión del agua desde el núcleo hasta la superficie del material (FEECO Internacional, 2017).

La planta de secado de fosfato cuenta con dos secadores rotatorios, ubicados cada uno en las dos líneas de proceso. Son de intercambio directo que son particularmente adecuados para el secado de materiales que contienen una elevada cantidad de humedad. Los datos de diseño de los secadores rotatorios pertenecientes a la planta de secado se especifican en la Tabla 12:

Tabla 12. Datos de tambores secadores

Secador Rotatorio	Valores de diseño
Velocidad de alimentación	300 t/h
Contenido Inicial de Humedad	17%
Velocidad de Producción	260 t/h
Contenido Final de Humedad	1%
Evaporación de Agua	50 t/h
Temperatura de entrada del secador	900°C - 950°C
Temperatura de escape del secador	100°C - 135°C

Fuente: Elaboración propia

El concentrado de fosfato húmedo ingresa a los dos tambores rotatorios a través de las tolvas o chutes de alimentación. Al interior del tambor rotatorio se lleva a cabo el intercambio de calor entre el material húmedo y los gases calientes provenientes de la cámara de combustión.

En la planta de secado de fosfato para realizar la combustión son requeridos dos ventiladores. La cámara de combustión utilizada de cada secador rotatorio utiliza como combustible GLP o gas natural indistintamente que después de la dilución alimentan a cada uno de los tambores rotatorios. El quemador es operado con una razón aire-combustible fija para controlar la máxima eficiencia térmica.

Al interior del tambor rotatorio entran en contacto el concentrado húmedo de fosfato y los gases calientes produciéndose el proceso de transferencia de calor que tiene por objetivo retirar la humedad excedente del concentrado de mineral fosfato hasta obtener un porcentaje de humedad entre 3% y 5%. Los datos de la entrada y salida de los secadores son presentados en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros del proceso de secado

Datos del proceso de secado del mineral en el tambor secador		
Parámetros	Entrada	Salida
Material	Concentrado de Fosfato	Concentrado de Fosfato
Humedad del concentrado	13-17%	3-5%
Densidad de material	1.44-1.6 t/m <sup>3</sup>	1.44-1.6 t/m <sup>3</sup>
Temperatura de material	20°C	90°C - 110 °C
Capacidad	300TPH húmedas	260TPH
Temperatura de gases	900°C - 950°C	100°C - 135°C

Fuente: Elaboración propia

A la salida de cada tambor secador se tienen dos corrientes, una corriente de productos gruesos o sólidos secos que salen por la parte inferior del secador y una corriente de gases que arrastra los productos finos (GEA Process Engineering) hacia los filtros de mangas, los cuales permiten cumplir con las normas de emisión de partículas en los gases de salida de los secadores. Los gases limpios que salen de los filtros son dirigidos hacia las chimeneas donde son expulsados al ambiente y los productos finos del concentrado de fosfato captados en los filtros de mangas son descargados en fajas que serán dirigidos a una faja transportadora

principal. Los productos finos y gruesos son trasladados a través de una faja transportadora para ser almacenados posteriormente.

### 2.1.2 Faja transportadora

Las fajas transportadoras son elementos esenciales para el transporte de materiales ya sea en minería, construcción, agroindustria e industria en general ya que constituye la forma más práctica y económica de transportar materiales de un punto a otro (Jorvex, 2018). Entre las principales ventajas presentadas por las fajas transportadoras, se mencionan las siguientes:

- Cubrir grandes distancias para el transporte de materiales.
- Gran capacidad de transporte.
- La carga y la descarga puede ser realizada en cualquier punto del tramo.
- El producto transportado no es alterado.

Es un sistema de transporte que consiste en una cinta o banda que se mueve continuamente entre dos tambores. La banda es soportada por rodillos o polines y es arrastrada por fricción por uno de los dos tambores. La fricción entre la banda y este tambor es la encargada de transmitir la potencia y el movimiento al sistema, mientras que el otro tambor gira libremente y tiene como función permitir el retorno de la banda (González Días & Gonzalo, 2018) (ver Figura 10).

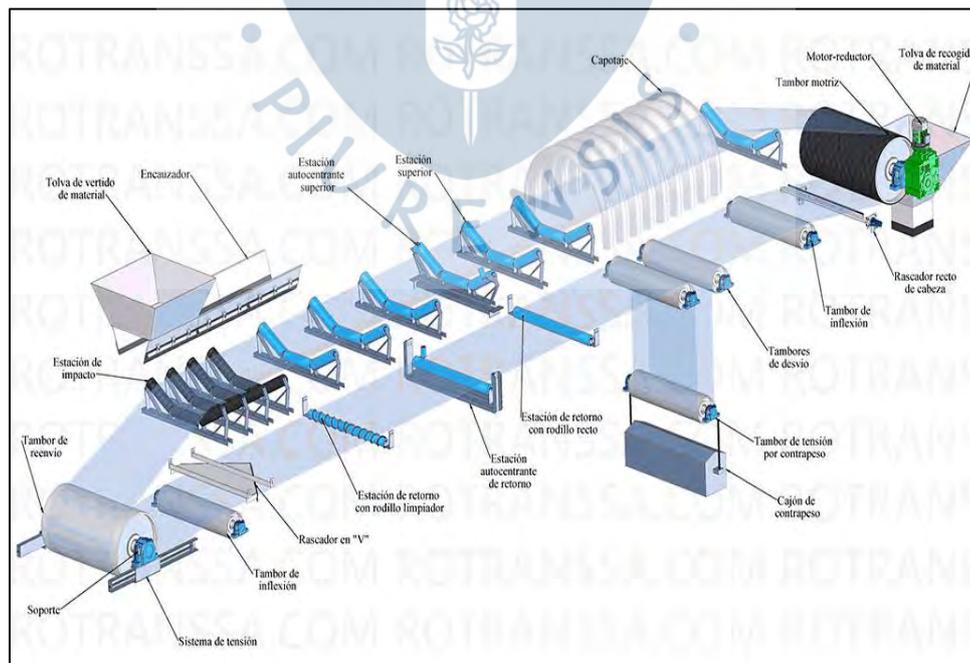


Figura 10. Componentes y accesorios en una faja transportadora  
Fuente: (ROTRANS, s.f.)

La faja transportadora cuya sección se muestra en la Figura 11, traslada los productos finos provenientes de los filtros de mangas y los productos finos gruesos provenientes de la salida del tambor secador, es fabricada con cubiertas de caucho, tiene 0.8 m de ancho, una longitud de 158 m, rueda a una velocidad de 3.1 m/s y una capacidad de 530 t/h.

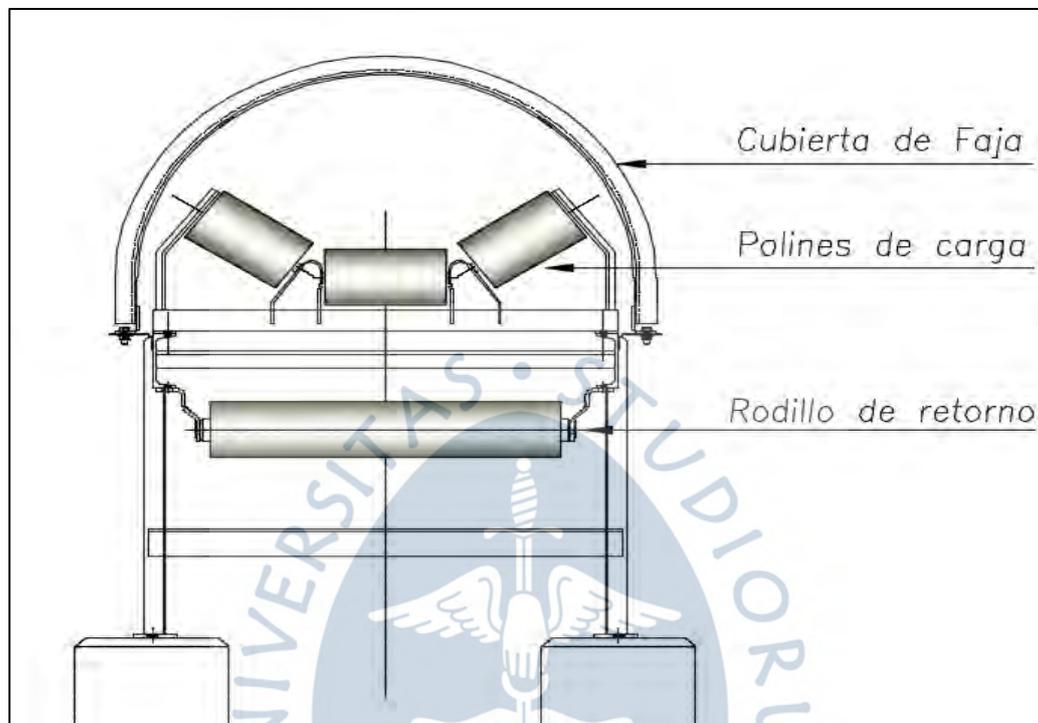


Figura 11. Sección de faja transportadora del concentrado de fosfato seco  
Fuente: Elaboración propia

Esta faja transportadora se extiende desde la salida de los filtros de mangas hasta la descarga de concentrado de fosfato en el elevador de cangilones y cuenta con una cobertura en todo el tramo para evitar el arrastre del polvo del producto seco por efecto del viento.

### 2.1.3 Elevador de cangilones

Un elevador de cangilones es considerado como un sistema de transporte continuo de materiales a granel en una trayectoria vertical o inclinada, sin que se produzcan paradas entre la carga y descarga del material transportado (Manga Rodríguez, 2014). Los elevadores de cangilones poseen de algunas ventajas, que incluyen simplicidad de diseño y fabricación, requiere espacio mínimo en el suelo y baja inversión inicial.

Entre los componentes principales de un elevador de cangilones se pueden mencionar los siguientes: bota, piernas, cabeza, banda o cadena y cangilones. Estos componentes se aprecian en la Figura 12.

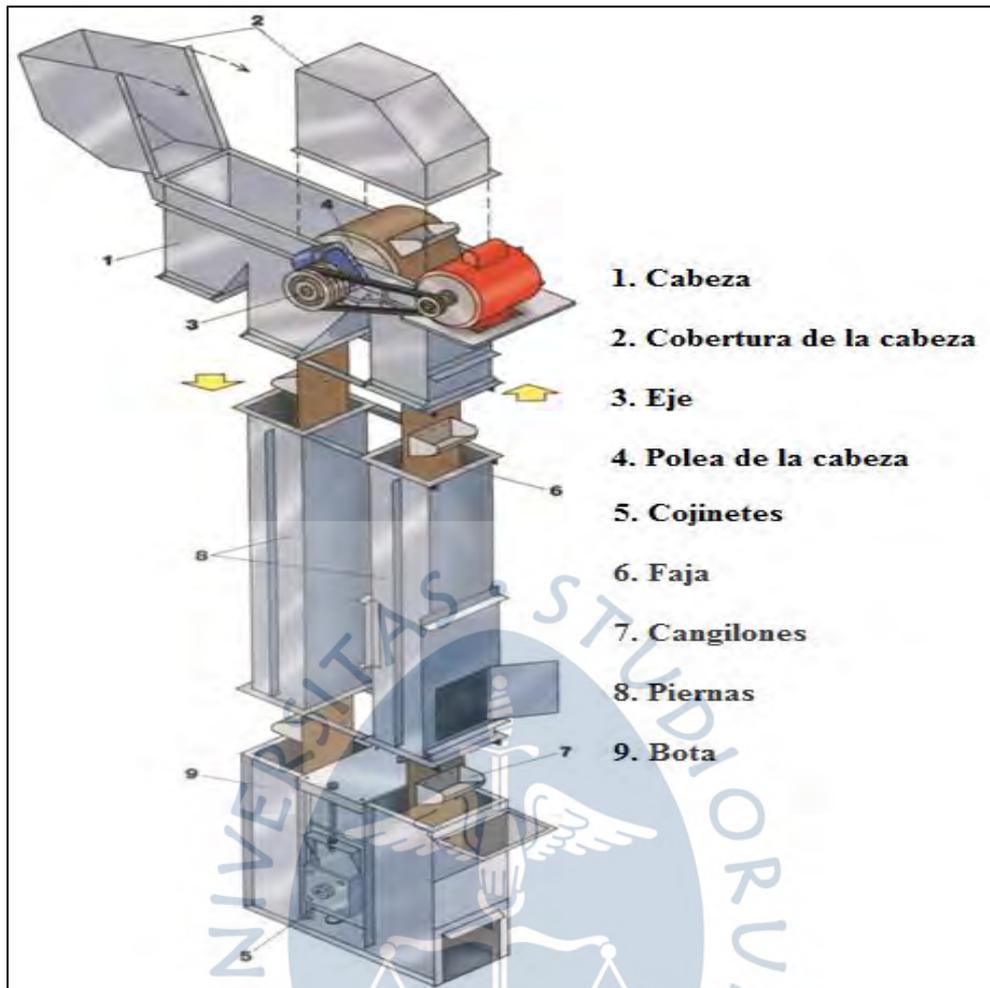


Figura 12. Componentes de un elevador de cangilones  
Fuente: (Honeyville Metal Inc., 2012)

A continuación, se detalla cada parte de los elevadores de cangilones (Aguirre Cruz, 2012):

- La bota o caja: es el componente inferior que recibe el material para ser elevado y contiene la banda inferior o rueda motriz.
- Las piernas también denominadas caja o envoltura del elevador, forma la estructura para soportar la cabeza y otros componentes, protegiendo contra el polvo y contra el agua a los cangilones, a la banda o cadena del elevador.
- La cabeza ubicada en la parte superior del elevador, encargada de soportar la polea de mando y el peso total de la banda y cangilones. Descansa en las piernas y contiene el sistema propulsor.
- La banda: es el componente donde los cangilones son fijados y utilizada para la elevación. Recorre alrededor de un par de poleas grandes colocadas en ejes paralelos horizontales en los extremos de las piernas de subida y de bajada.

- Cangilones: son los encargados de transportar el mineral en su interior y se encuentran fijados en la banda.

### 2.1.3.1 Principio de funcionamiento

El elevador de cangilones es puesto en marcha por medio del sistema propulsor, el material es introducido en la tolva de entrada que se encuentra en la parte inferior del elevador y luego los cangilones son cargados continuamente de material. Los cangilones están montados muy próximos entre sí sobre la banda o cadena, las cuales son utilizadas como órgano de tracción del elevador (ver Figura 13). Es así como la carga al interior de los cangilones es transportada desde la parte inferior hasta la parte superior donde el material es descargado en una tolva. Los cangilones son vaciados y luego continúan de regreso a la bota para continuar el ciclo (Tramco, Inc, 2011).

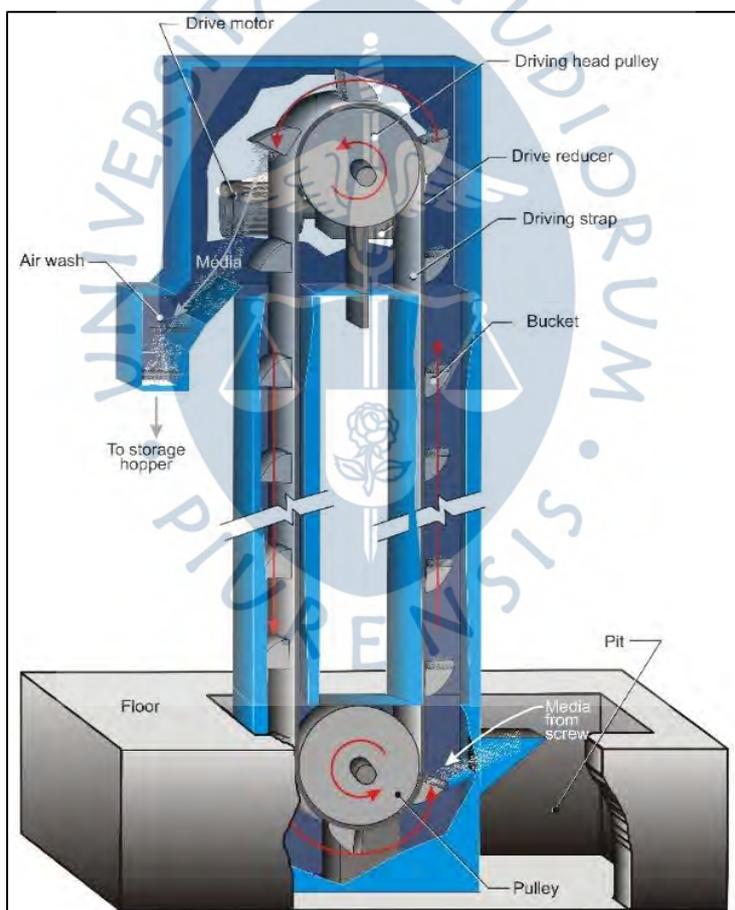


Figura 13. Funcionamiento de un elevador de cangilones  
Fuente: (International Surface Technologies, 2016)

La planta de secado de fosfato cuenta con un elevador de cangilones de una capacidad nominal de 530 TPH, el cual deposita el concentrado seco de mineral en dos silos de almacenamiento, los cuales tienen una capacidad almacenamiento de 45 toneladas.

El mineral es depositado en los dos silos de almacenamiento para luego ser trasladado hasta la zona de puerto por fajas transportadoras tubulares donde es embarcado en grandes navíos para su posterior exportación a los mercados internacionales.

## **2.2 Problemática actual**

Los dos principales problemas que deben afrontar los equipos ubicados en la planta de secado de fosfatos son la abrasión y la corrosión.

### **2.2.1 Abrasión**

La abrasión es la acción que causa desgaste. Definida por la ASTM como "el desgaste de cualquier parte de un material frotándose contra otra superficie". El desgaste por abrasión es provocado por acción de partículas sólidas, duras, extrañas al material base, como arcilla, arena y otros materiales sólidos no metálicos. Tiene lugar cuando las partículas que tienen igual o mayor dureza eliminan una parte de la superficie del material base, produciendo un rayado o surco (Vázquez Vaamonde & De Damborenea Gonzáles, 2000).

Una dificultad importante en la prevención y control del desgaste por abrasión es que no se describe con precisión los mecanismos de desgaste implicados, por lo general se presentan varios mecanismos diferentes de desgaste actuando en conjunto, todos con características diferentes. Es un efecto indeseable para el uso regular y normal de la exposición de una máquina o pieza. El mineral fosfato es considerado como un mineral altamente abrasivo y el impacto es evidenciado en los equipos y piezas de la planta de secado.

### **2.2.2 Corrosión**

La corrosión es definida en términos generales como la degradación o destrucción de un metal, debido al resultado de las interacciones entre el metal y el medio que lo rodea bajo condiciones de exposición determinadas (Cabrera, 2013).

A menudo puede ser predecible o puede ser totalmente impredecible y catastrófico. La corrosión obedece a leyes de la electroquímica y la termodinámica, y las diferentes variables que influyen en el comportamiento de un metal con su entorno pueden resultar en una corrosión acelerada.

Una de las muestras más claras de la evidencia del problema de la corrosión es el óxido, donde el hierro reacciona con el oxígeno en el aire para formar óxido de hierro. Este recubrimiento de óxido en algunos metales es tenaz y proporciona protección ante un ataque adicional del ambiente y en otros, tiende a agrietarse y no los protege (Bilurbina Alter, Liesa

Mestres, & Iribarren Laco, 2003). Si bien existe una variación significativa en las causas y formas de corrosión, una cosa es cierta: la corrosión nunca es deseable, y se llevan a cabo muchos pasos tanto en la prevención como en el tratamiento de la corrosión en secadores rotativos.

La corrosión es un problema común en los secadores industriales, capaz de causar daños costosos, ineficiencia del proceso e incluso fallas prematuras del equipo. Estos problemas se han evidenciado significativamente en los secadores rotatorios de la planta de secado, originando problemas aguas abajo y afectando la calidad del producto final del concentrado seco de mineral.

El casco de los tambores rotatorios está fabricado en acero al carbono ASTM A36 con un espesor de 25mm, con dimensiones de 29m de largo y 4.5m de diámetro. Desde la puesta en marcha, en estos equipos se ha observado e identificado el desgaste del espesor del tambor rotatorio con una reducción de 12 mm aproximadamente en zonas críticas, con pérdidas significativas a una razón de 2 mm/año. Para evitar que el casco del tambor secador se continúe desgastando, se han instalado planchas de acero ASTM A36 de 12 mm a manera de un revestimiento interno.

Los elevadores (*lifters*) que son las piezas metálicas dispuestas en el interior del tambor secador también han presentado una serie de fallas.



Figura 14. Modelado 3D de elevador  
Fuente: Elaboración propia

Estos elevadores son fabricados en dos tipos de aceros: al carbono ASTM A36 y AR400, este último es un acero resistente a la abrasión e impacto. Son aproximadamente 360 elevadores dispuestos en el interior del tambor rotatorio (SSAB, 2012). Están conformados por una aleta y

un soporte. Una de las caras del soporte se encuentra soldado al tambor secador y en la otra permanece unida mediante pernos a la aleta del elevador como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Modelado 3D de unión empernada del soporte del elevador  
Fuente: Elaboración propia

La aleta del elevador tiene las siguientes dimensiones mostradas en la Tabla 14.

Tabla 14. Dimensiones de aleta del elevador

Descripción	Unidad	Dimensión
Inclinación	mm	139
Longitud de inclinación	mm	200
Longitud de base	mm	260
Espesor	mm	12.7
Longitud de aleta	mm	1200

Fuente: Elaboración propia



Figura 16. Modelado 3D de la aleta del elevador  
Fuente: Elaboración propia

El soporte de elevador tiene las siguientes dimensiones mostradas en la Tabla 15.

Tabla 15. Dimensiones del soporte del elevador

Descripción	Unidad	Dimensión
Longitud de ala mayor	mm	200
Longitud de ala menor	mm	103
Espesor del soporte	mm	12.7

Fuente: Elaboración propia



Figura 17. Modelo 3D de soporte con nervio

Fuente: Elaboración propia

Los problemas que afectan a estas piezas metálicas son la corrosión acelerada y el desgaste por abrasión. Esto ha originado la generación de muchos residuos metálicos en el interior de los tambores rotatorios de los secadores. Un gran número de las planchas de revestimiento interno del casco del tambor rotatorio y componentes de los elevadores, al cabo de 6 meses necesitan ser reemplazados por presentar daños críticos como los mostrados en la Figura 18 y Figura 19.

Los residuos más grandes son contenidos en una rejilla de 100 mm x 100 mm ubicada en la salida de los tambores rotatorios, pero muchos otros de estos residuos son descargados juntamente con el producto grueso y transportado por la faja transportadora. La generación de estos residuos se produce de manera regular, debido a los problemas por corrosión acelerada y el desgaste por abrasión, que han reducido significativamente el tiempo de vida de los elevadores.



Figura 18. Soportes de elevador siniestrados  
Fuente: Elaboración propia



Figura 19. Aleta de elevador siniestrado  
Fuente: Elaboración propia

Esto ha conllevado a programar un mayor número de paradas de planta para proceder al retiro de los elevadores fallados, limpieza de la rejilla del tambor rotatorio, reemplazar estas piezas metálicas, realizar el mantenimiento correctivo en el elevador de cangilones, y limpieza en otros puntos aguas abajo.

Los residuos metálicos, que son pernos, tuercas, pedazos de aletas de elevadores siniestrados y partes de chapas de acero, luego de ser transportados por la faja transportadora llegan hasta el elevador de cangilones donde originan problemas de atoro por acumulación de estos en la parte inferior del elevador. Muchos residuos logran ser transportados por medio de fajas transportadoras, estos son llevados aguas abajo donde se han dispuestos rejillas para su retención en los chutes de transferencia. A pesar de ello muchos residuos logran pasar y tienen como destino final las embarcaciones.

Actualmente se vienen implementando recomendaciones para reducir el impacto de estos problemas, sin embargo, los residuos metálicos siguen siendo detectados en los equipos, generando los inconvenientes anteriormente mencionados y deben ser tratados de forma cuidadosa porque podrían causar problemas mayores en un futuro, causando daños a los activos de la planta, pérdidas económicas entre otros.

## Capítulo 3

### Sistemas de retiro de residuos metálicos

#### 3.1 Separadores en la industria

Los separadores son equipos empleados para realizar la separación de partículas y fragmentos contaminantes de una mezcla. Realizar la operación de separar materiales a nivel industrial juega un rol muy importante dentro de los procesos de esta. Es por ello que se tienen métodos de separación de fases y se clasifican de acuerdo al estado de agregación de los elementos a separar (Díaz , Arbulu, & Arbulu, 2000), tal como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Tipo de separadores

Estado de agregación	Tipo de separadores
Sólido de sólido	Mecánicos, hidráulicos, neumáticos y magnéticos.
Sólido de gas	Filtros de aire, filtros de bolsas, ciclones.
Líquido de sólido	Prensas, extractores centrífugos.
Sólido de líquido	Espesadores, clarificadores, filtros, centrifugas.
Líquido de gas	Cámaras de sedimentación, ciclones, precipitadores electrostáticos.
Gas de líquido	Tanques fijos, rompedores de espuma.
Líquido de líquido	Decantadores centrífugos, ciclones líquidos.

Fuente: (Universidad de Buenos Aires, 2015)

En el presente trabajo se prestará principal atención en los separadores que corresponde a la separación de sólidos. La separación de materiales sólidos se hace con el objeto de clasificar las partículas de materia de acuerdo con sus tamaños o de acuerdo con sus características. El tamaño y características del material a separar determina los distintos tipos de aparatos que se emplean para la separación de materiales sólidos (TYMSA, 2012); en la Tabla 17 se da una clasificación de dichos aparatos.

Tabla 17. Tipos de aparatos para separación

Tamaño de grano	Método de separación	Tipo de aparatos
> 200 mm	Mecánico	Parillas
De 200 a 1 mm	Mecánico	Parillas vibratorias, zarandas
De 50 a 1 mm	Magnético	Separadores electromagnéticos
< 2 mm	Hidráulico	Separadores hidráulicos
< 1.5 mm	Neumático	Separadores de aire

Fuente: (Universidad de Buenos Aires, 2015)

### 3.1.1 Separadores mecánicos

Este tipo de separación es efectuada por equipos especializados como tamices, zarandas vibratorias, cribas de tambor, entre otros.

- Parrilla

En una parrilla el material que es demasiado grande o grueso no puede pasar a través de las cuadrículas de la parrilla quedando almacenado en su parte superior, mientras que el material más fino pasa a través de las aberturas (ver Figura 20). Esto evita que el material grueso o fragmentos de gran volumen puedan ingresar a otros puntos en una línea de proceso, donde existan equipos que sólo pueden operar bajo determinadas condiciones de alimentación de material.



Figura 20. Rejilla para limpieza de agua

Fuente: (TEMMISA, s.f.)

- Zaranda o criba vibratoria

La zaranda vibratoria es un equipo de gran eficiencia y productividad para aplicaciones de clasificación secundaria o terciaria de materiales con condiciones complicadas (arcillosos, de alto contenido de humedad) para filtrar los materiales después de la trituración. Poseen capas

de diferentes dimensiones para que sean capaces de cribar muchos materiales de diferentes tamaños (Haver & Boeker, 2010). Estos equipos son empleados para la clasificación y selección de materiales en minería, construcción, transporte, energía, químicos, etcétera.

La zaranda está constituida en su interior por mallas para realizar la operación de clasificación. El tejido metálico de la malla superior es de mayor apertura y el de menor apertura se localiza en la parte inferior. Está montada sobre resortes y es atravesada transversalmente por un eje excéntrico que cuenta con un volante de contrapeso y se acopla un motor a través de correas trapezoidales (ver Figura 21). La vibración en la zaranda es originada por el movimiento del eje y el contrapeso del volante.

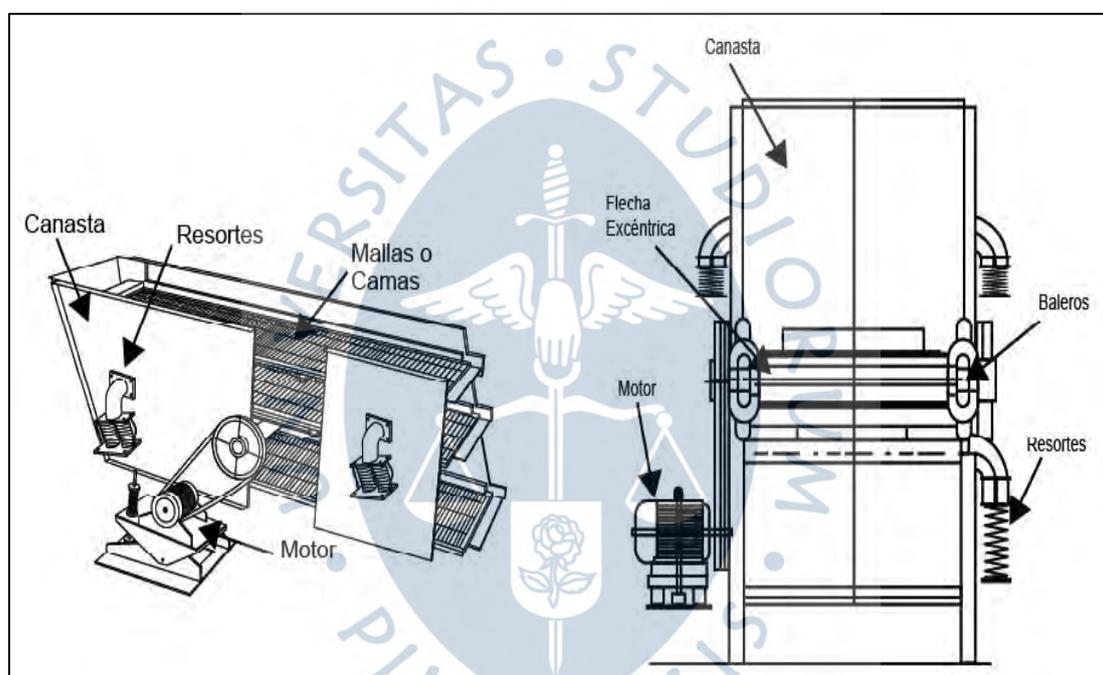


Figura 21. Zaranda vibratoria  
Fuente: (TYMSA, 2012).

- Cribas de tambor

Conformadas por un cilindro rotativo de chapa metálica perforada, presenta aberturas en los dos extremos y su eje se encuentra inclinado respecto de la horizontal, permitiendo que el material avance por gravedad a medida que gira el cilindro (ver Figura 22). Son utilizadas en,

áreas de tratamiento de residuos, plantas de compostaje y en la clasificación de finos (Comisión Europea, 2000) que acompañan un “todo uno<sup>1</sup>” en materiales con alta abrasividad o dureza.

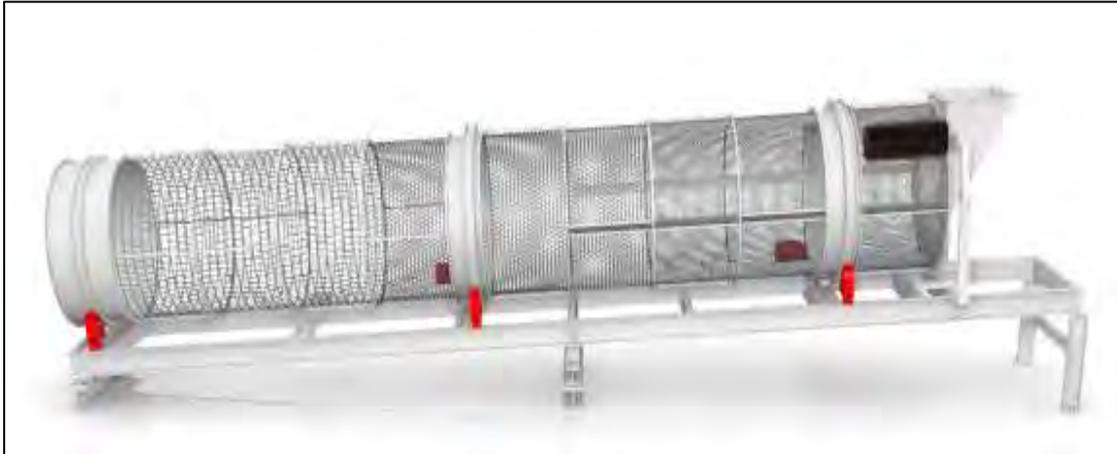


Figura 22. Criba de tambor  
Fuente: (Direct Industry, s.f.)

### 3.1.2 Separadores neumáticos

Estos equipos realizan una clasificación neumática que consiste en separar el material de entrada en dos fracciones (las fracciones pesadas de las ligeras) en función de su densidad. Utilizan el flujo de aire, la gravedad y los cambios de dirección para clasificar eficientemente materiales en puntos de corte que van desde 300 y 75 micras (Smartercrush, s.f.).

Los separadores estáticos de aire son los más simples y se les llama así por no tener ninguna parte en movimiento mecánico. Usan aire para el transporte del material y solamente son recogidos los gruesos, los finos pasan con el aire. Por lo general las partículas finas separadas son dirigidas hacia un filtro de mangas para su recuperación (Metso Minerals Industries, Inc, 2010).

Se tienen dos tipos de separadores de aire: los gravitacionales (ver Figura 23) y los centrífugos (ver Figura 24), aplicados mayormente en la industria del cemento y asfaltos.

---

<sup>1</sup> “Todo uno” procede de una voladura de cantera con un tamaño que oscila entre 0 y 300 Kg.

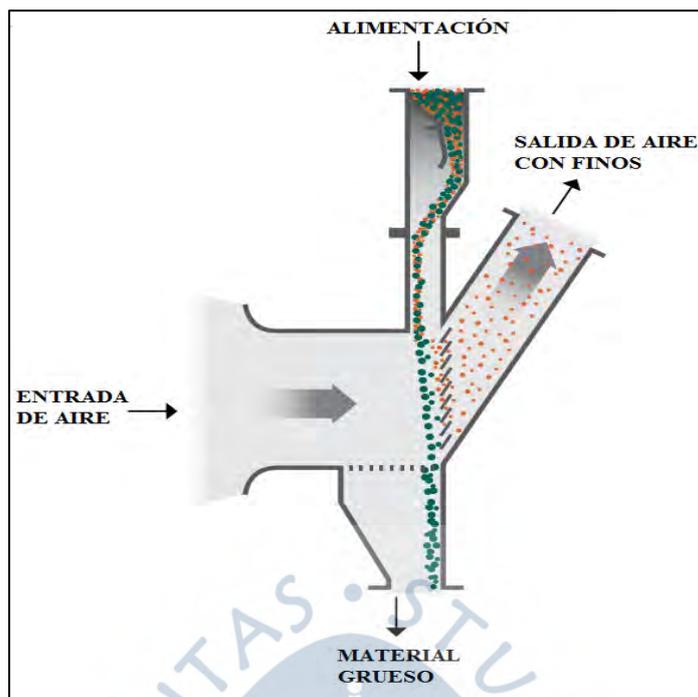


Figura 23. Clasificador gravitacional  
Fuente: (Metso Minerals Industries, Inc, 2010)

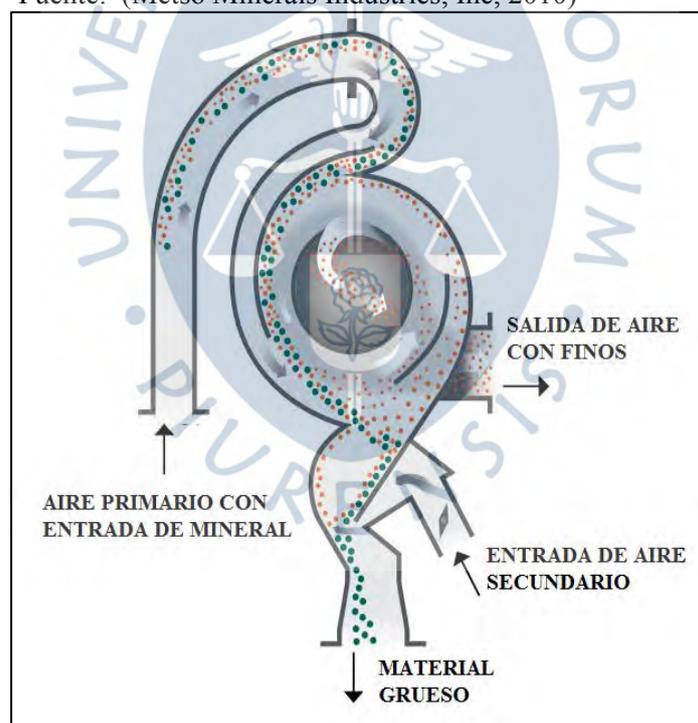


Figura 24. Clasificador de aire centrífugo  
Fuente: (Metso Minerals Industries, Inc, 2010)

### 3.1.3 Separadores hidráulicos

Las separaciones hidráulicas comprenden dos tipos de operaciones a realizar: la separación de sólidos de los líquidos en que están suspendidos y la separación de dos o más sólidos entre sí, distintos por su tamaño o por su peso específico, mediante un fluido separador

(Siegenthaler, 2017). Dentro de la separación de dos o más sólidos entre sí se dan dos casos: el primer caso es cuando la separación es por tamaños, denominada clasificación hidráulica y la segunda es cuando la separación se efectúa por pesos específicos que se conoce como concentración.

- Clasificación hidráulica

Sirve de separación de una mezcla de sólidos en distintas fracciones, basada en la diferente forma, tamaño y densidad de las partículas que constituyen la mezcla. Esta separación se efectúa en medio acuoso.

Un ejemplo de este tipo de separación son los hidrociclones, los cuales son equipos que tienen como función principal separar los sólidos suspendidos en un determinado flujo de alimentación en dos fracciones, una que acompaña al flujo denominado descarga que lleva a las partículas más gruesas en suspensión y otra fracción que acompaña al flujo denominado rebose que lleva las partículas más finas en suspensión (AMP, 2017) (ver Figura 25).

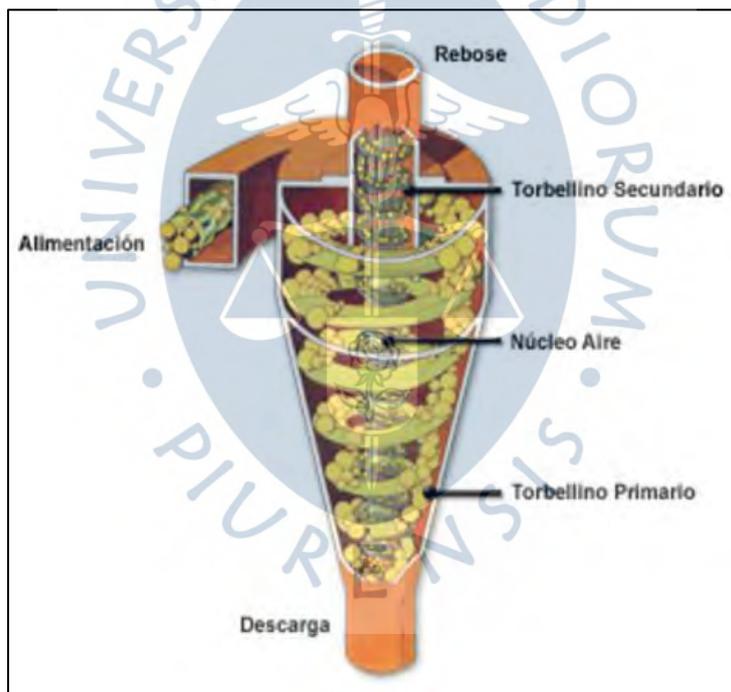


Figura 25. Esquema de hidrociclón  
Fuente: (Eral-Chile, s.f.)

- Concentración

La concentración de minerales es la operación en la cual se eleva el porcentaje de concentración de un mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación sólido-sólido produciéndose así una segregación de dos o más especies mineralógicas para generar una corriente enriquecida del mineral de interés. En este tipo de separación destaca la

concentración por flotación, la cual consiste en separar el mineral de la ganga<sup>2</sup>, donde se busca que las partículas del mineral de interés flote mediante burbujas de aire y hundir las correspondientes a la ganga mediante un líquido de densidad inferior a ambos (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008) .

El método que logra una flotación más rápida es la flotación por espuma la cual se realiza por dispersión de las partículas en la masa de un líquido (lo que se denomina pulpa) al que se le agregan sustancias que actúan sobre la superficie del mineral y lo hacen unir a burbujas de aire (producidas por la agitación y/o inyección de aire a la mezcla) las que llevan el mineral a la superficie del líquido y se reúnen formando una espuma (ver Figura 26).

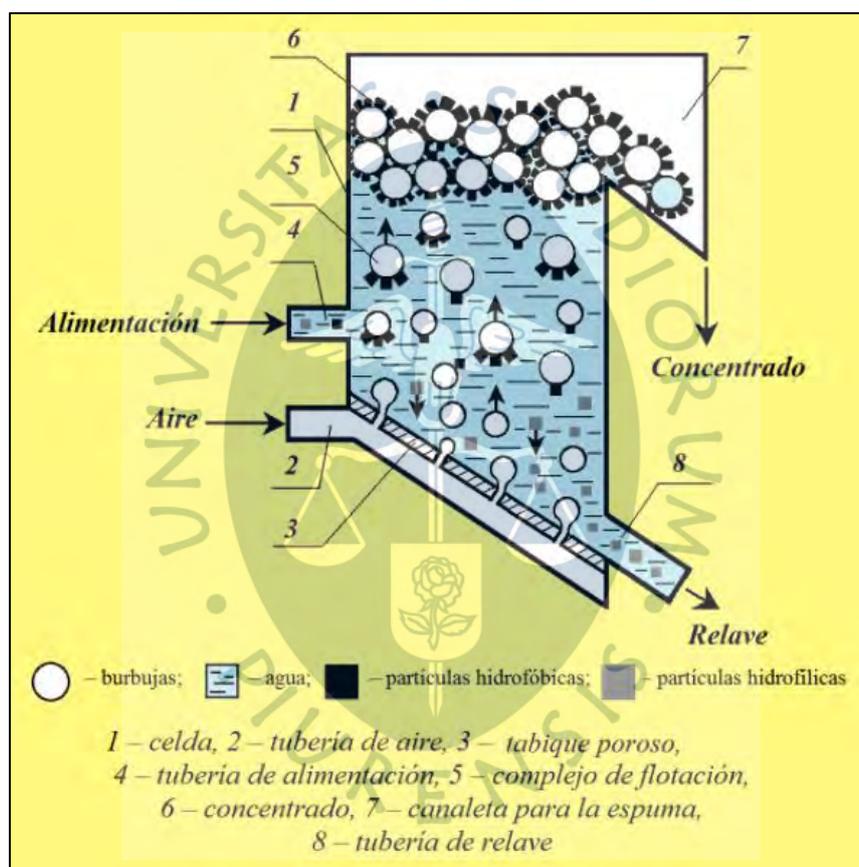


Figura 26. Representación esquemática de flotación por espuma

Fuente: (Petrovskaya, 2007)

### 3.2. Separadores magnéticos

Los separadores magnéticos son usados con los siguientes propósitos:

- Para retirar las partículas contaminantes (metales ferromagnéticos) de la materia prima como arena de fundición, carbón, piedra, fertilizantes, escoria, yeso, minerales y materiales similares, con la finalidad de proteger equipos costosos y vitales en el proceso aguas abajo.

<sup>2</sup> Minerales que no presentan interés minero en el momento de la explotación y acompañan a la mena o asociación de minerales de interés económico de un yacimiento (Canet Miguel & Campubí i Cano, 2006) .

- Para la purificación del fluido o material transportado.
- Para recuperar y rescatar restos ferrosos valiosos.

Para entender el principio de funcionamiento de los separadores magnéticos es preciso tener muy en claro la teoría de imanes y electroimanes.

### 3.2.1 Imanes

Los imanes han sido empleados desde tiempos muy antiguos, remontándose hace ya más de 2000 años donde los griegos tenían conocimiento que los fragmentos de magnetita (óxido de hierro) tenían la característica de atraer piezas de hierro, también existen referencias que datan del siglo XI de su uso como auxiliar para la navegación por los chinos, siendo este el inicio del uso de la brújula (Tipler, 2005)

Los imanes se dividen en dos tipos: imanes permanentes, que pueden retener sus propiedades magnéticas indefinidamente sin necesitar para ello la excitación de corriente eléctrica, y electroimanes cuyas propiedades magnéticas dependen de la acción magnética de una corriente eléctrica (J.Ney & G.Louis, 1977).

En un imán el polo norte atrae al polo sur, pero los polos iguales se repelen. Cada polo de un imán atrae objetos de hierro o de acero, aunque no estén magnetizados, y cuando estos objetos están en contacto con un imán atraen a su vez a otros objetos de iguales características. Asimismo, según la teoría molecular de los imanes, si un imán es dividido en dos partes, las partes resultantes son imanes con sus polos correspondientes. Esta división podría llevarse muchas veces hasta alcanzar la molécula magnética, tal como se muestra en la Figura 27.

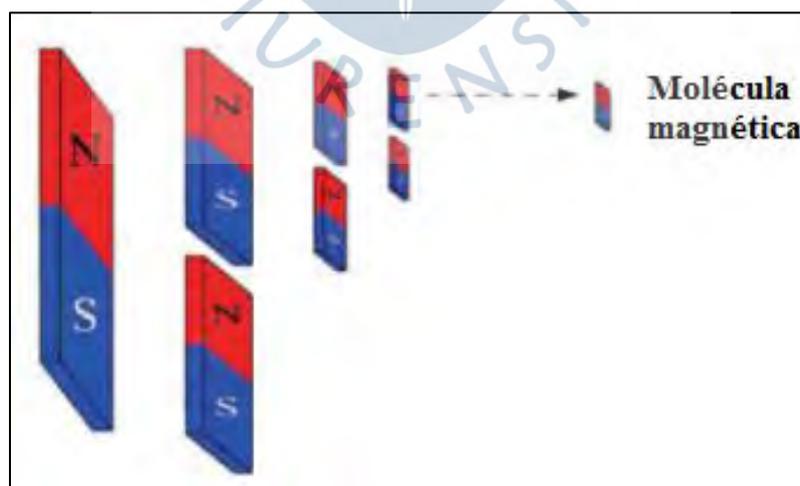


Figura 27. Teoría molecular de los imanes  
Fuente: (Alcalde San Miguel, 2011).

En los imanes la fuerza que ejercen sobre otro se describe como la interacción entre un imán y el campo magnético. Este campo magnético se define como la región próxima al imán donde los fenómenos magnéticos son apreciables y es generado alrededor del imán representándose mediante líneas de campo (ver Figura 28).

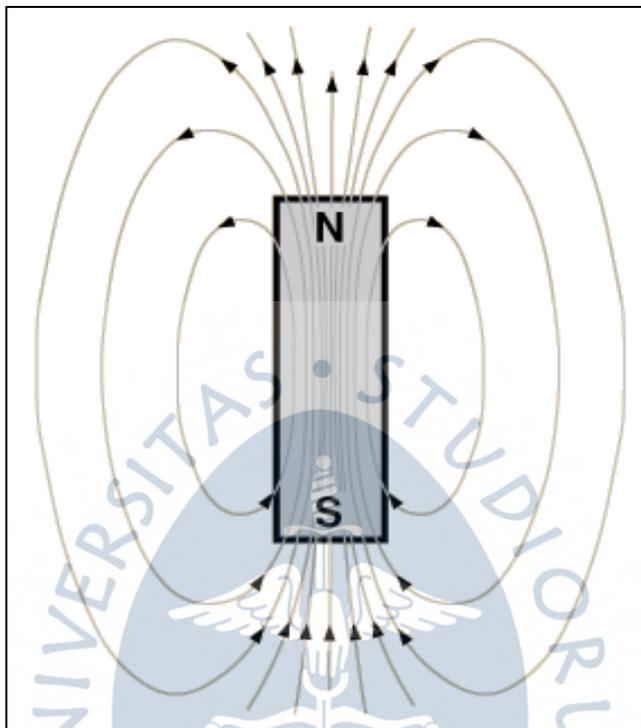


Figura 28. Campo magnético de un imán permanente  
Fuente: (FMAGNET XINFENG, 2013).

### 3.2.2 Magnitudes magnéticas

- **Fuerza magnetomotriz**

Se denomina fuerza magnetomotriz (fmm) al esfuerzo ejercido en la creación de un campo y flujo magnético. Está presente siempre que circule corriente eléctrica en la bobina (Alcalde San Miguel, 2011). Su unidad básica es el ampere-vuelta y está definida por el producto del número de vueltas en la bobina (N) por el valor de la corriente que circula en ella (I), tal como se describe en la siguiente fórmula:

$$fmm = N * I$$

- **Flujo magnético**

Está determinado por la cantidad de líneas de fuerza que representan al campo magnético. En un imán el flujo magnético expresa el valor total de su efecto magnético. La unidad básica del flujo magnético ( $\phi$ ) es el weber (Wb) definido en función de la variación de flujo en un conductor de una sola vuelta (Alcalde San Miguel, 2011).

- **Intensidad de campo magnético**

También llamada fuerza magnetizante o fuerza del campo magnético, refiere a la cantidad de fuerza magnetomotriz para crear un campo magnético por unidad de longitud. Su unidad básica es el ampere vuelta por metro (A.v/m). La intensidad de campo (H) está definida por la relación entre la fuerza magnetomotriz (A.v) y la longitud del circuito (m), expresándose de la siguiente forma:

$$H = \frac{fmm}{l}$$

- **Densidad de flujo**

También denominada inducción magnética, indican la concentración de las líneas de fuerza en una parte del campo magnético (ver Figura 29). La unidad básica de la densidad de flujo (B) es el tesla (T). El cálculo de la densidad de flujo se realiza dividiendo el flujo total por la sección recta, tal como expresa en la siguiente relación (J.Fowler, 1994):

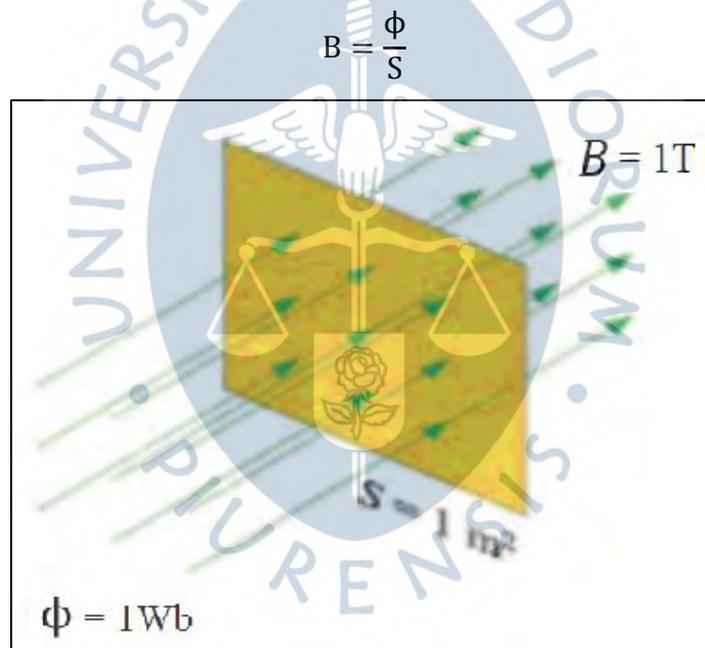


Figura 29. Densidad de flujo  
Fuente: (Alcalde San Miguel, 2011).

- **Permeabilidad magnética**

La permeabilidad magnética refiere a la facilidad de un material para conducir o transportar el flujo magnético. Su unidad básica en el SI se da en henrios/metro (H/m) y se define como la relación entre la densidad de flujo (B) y la intensidad del campo magnético (H) (J.Fowler, 1994):

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Esta relación (B-H) no es constante como se muestra en la Figura 30, por lo que es necesario conocer la curva de magnetización, que representa el valor de la inducción en función de la intensidad de campo en cada material.

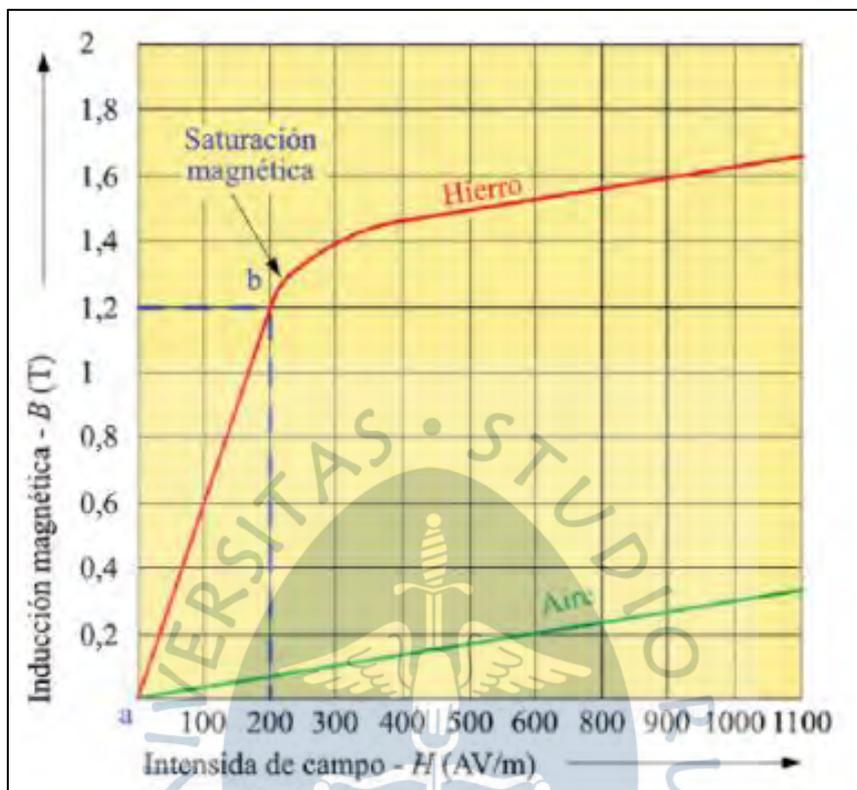


Figura 30. Curva de magnetización del hierro  
Fuente: (Alcalde San Miguel, 2011)

La permeabilidad es la forma más conveniente de describir las propiedades magnéticas de un material, dado que relaciona dos magnitudes que son independientes del tamaño físico. A medida que el valor propio de permeabilidad de un material es mayor, mejores son las propiedades magnéticas que poseen.

Usualmente la permeabilidad de un material ( $\mu$ ) se especifica como permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ) (J.Fowler, 1994), la cual compara la permeabilidad de un material respecto a la permeabilidad del aire ( $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  H/m) y define de con la siguiente expresión:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

De acuerdo con la permeabilidad relativa los materiales son clasificados en:

- Diamagnéticos ( $\mu_r < 1$  ;  $\mu_r \approx 1$  )

Los materiales denominados diamagnéticos se caracterizan por ser repelidos por los imanes y disminuyen ligeramente el valor de la densidad de flujo (B) en el solenoide. Entre los

materiales que se encuentran dentro de esta clasificación se tienen al bismuto (Bi), plomo (Pb), plata (Ag), entre otros (Bustamante J. Z., 2016).

- Paramagnéticos ( $\mu_r > 1$  ;  $\mu_r \approx 1$  )

Estos materiales tienen un comportamiento magnético muy débil e incrementan ligeramente el valor de la densidad de flujo (B) en el solenoide. Se puede mencionar al aluminio (Al), paladio (Pd), etcétera.

- Ferromagnéticos ( $\mu_r \gg 1$  ;  $\mu \gg \mu_0$  )

Estos materiales tienen muy buen comportamiento magnético e incrementan altamente el valor de la densidad de flujo (B) en un solenoide. La mayoría de los materiales ferromagnéticos se saturan sobre 1 a 2 teslas, como lo es el hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), etcétera (Bustamante J. Z., 2016).

### 3.2.3 Aspectos generales de un electroimán

Un electroimán es un imán cuyo campo magnético se produce mediante el paso de una corriente eléctrica. Bajo la acción de la corriente eléctrica se comporta como un imán y sus propiedades magnéticas cesan cuando se deja de circular corriente eléctrica (Pulido, 2010).

Para obtener un electroimán se coloca un núcleo ferromagnético en el interior de una bobina o arrollamiento, por cuyo hilo circula una corriente eléctrica (ver Figura 31). Los materiales ferromagnéticos como el hierro, el níquel o el cobalto, tienen la propiedad de concentrar campos magnéticos a través de ellos, haciendo que la intensidad del campo sea mayor que la del núcleo. Cuando la corriente eléctrica pasa a través de la bobina de alambre, un campo magnético se desarrolla alrededor de la bobina y es atrapado en el núcleo ferromagnético.

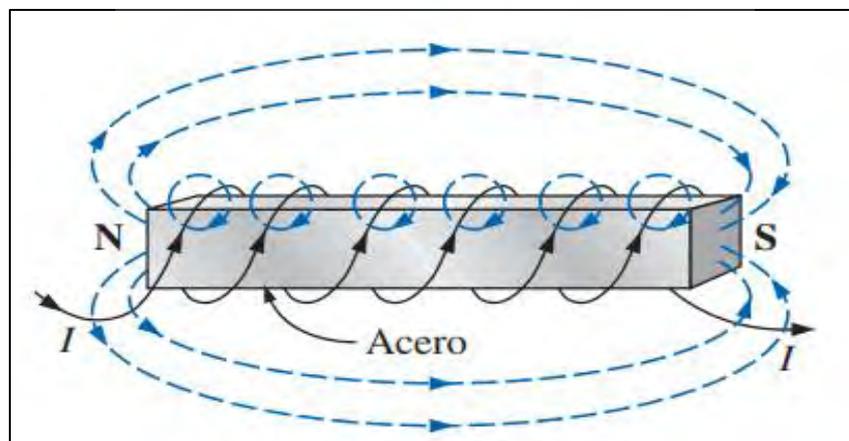


Figura 31. Campo magnético de un imán permanente  
Fuente: (Boylestad, 2004).

Los electroimanes transforman, de manera sencilla y eficaz, la energía eléctrica en mecánica presentando dos propiedades:

1. Son imanes temporales, los núcleos sólo son imantados cuando circula una corriente eléctrica. Esto permite poder imantar o desimantar el núcleo por simple maniobra de un interruptor de acuerdo con la necesidad que se tenga.
2. Producen un efecto magnético mucho más intenso que los imanes permanentes debido a que la inducción magnética del núcleo de un electroimán puede alcanzar la saturación, por lo que en general es superior que los imanes permanentes.

La ventaja principal de un electroimán respecto de un imán permanente es que se puede cambiar de forma rápida el campo magnético controlando la cantidad de corriente eléctrica en el devanado (Rodríguez Santillán & León Yungaicela, 2016). Sin embargo, a diferencia de un imán permanente, éste necesita una fuente continua de energía eléctrica para mantener el campo.

Los electroimanes de acuerdo con el efecto que se requiera obtener poseen diferentes tipos de núcleos, siendo los más usados los siguientes (J.Ney & G.Louis, 1977, pág. 237):

- Electroimanes rectos: son cilíndricos conformados por una barra prismática o cilíndrica y un enrollamiento de alambre de hierro puro. En este tipo de electroimanes los polos se ubican siempre a los extremos de las barras y la fuerza de atracción que corresponde a cada polo actúa en dirección diametral opuesta.
- Electroimán de herradura: son electroimanes curvos en forma de herradura, presentando tanto el polo positivo como negativo en una misma dirección. Usualmente los polos de este tipo de electroimanes están en contacto con una pieza de hierro denominada armadura.
- Electroimán acorazado: conformado por un núcleo central que es rodeado por una bobina que permanece encerrada dentro de una carcasa. El polo norte se localiza en el centro y en los extremos se sitúa el polo sur. La disposición es muy importante para un electroimán de fuerza es por ello que son empleados como grúas, pero no son apropiados a una acción a distancia.

Los electroimanes producen una fuerza atractiva con la que es atraída una pieza de hierro por un electroimán en herradura a través del aire o entrehierro, capaz de mantener un determinado peso. Esta fuerza (ver Figura 32) se origina al ser aproximada la armadura al núcleo, quedando la armadura imantada, de forma que en los extremos aparecen polos con

signos opuestos a los del núcleo en contacto y es calculada con la ayuda de la siguiente fórmula (J.Ney & G.Louis, 1977):

$$F = 10^7 * \frac{\beta^2 * S}{8 * \pi}$$

Donde:

F: Fuerza portante en Newton (N)

$\beta$ : Inducción en el núcleo en teslas (T)

S: Superficie de contacto entre el núcleo y el hierro móvil en  $m^2$

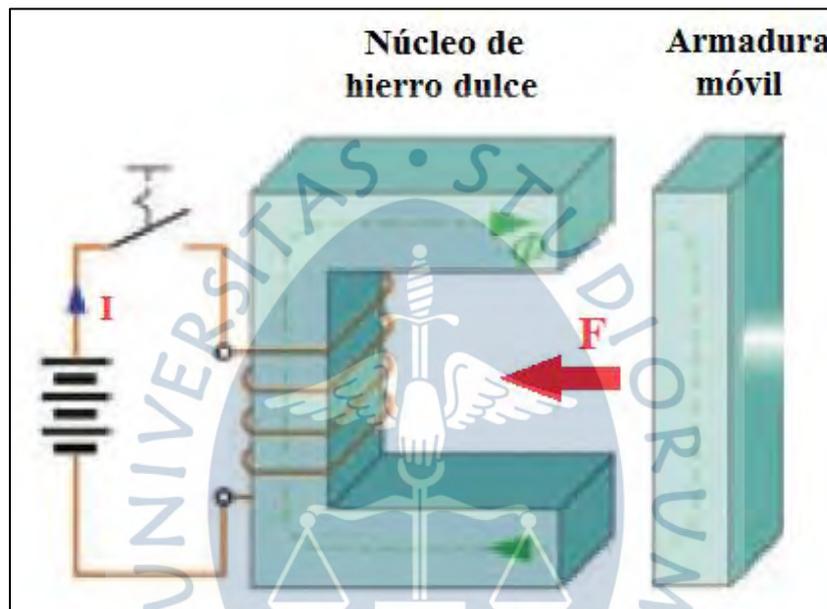


Figura 32. Esquema de un electroimán  
Fuente: (Alcalde San Miguel, 2011)

Los factores que influyen en la fuerza magnética de un electroimán son los siguientes (J.Fowler, 1994):

- El material del núcleo

La selección del núcleo metálico determina si el electroimán es más fuerte o débil. Los núcleos de hierro permiten que los electroimanes sean muy fuertes, mientras núcleos de acero los convierten en campos más débiles. A medida que el material del núcleo tenga la permeabilidad más elevada, el electroimán será más potente.

- Tamaño y forma del material del núcleo Una mayor área de la sección recta y menor longitud del núcleo para las líneas de flujo, dando lugar una reluctancia<sup>3</sup> baja.

<sup>3</sup> La reluctancia se define como la oposición al flujo magnético, depende del tipo de material y forma (J.Fowler, 1994).

- El número de vueltas de la bobina

La intensidad del campo magnético será mayor cuando se aumentan el número de vueltas en la bobina.

- El valor de la corriente en la bobina.

La intensidad del campo magnético será mayor cuando mayor sea la corriente que circula por la bobina, implicando el incremento del calibre en la misma.

Los electroimanes son ampliamente usados en diferentes aplicaciones, gracias a su característica de imantación temporal, pudiendo ser controlada a distancia y a voluntad. A continuación, se mencionan aplicaciones de los electroimanes (Alcalde San Miguel, 2011):

- Equipos de separación magnética que separan los materiales magnéticos de los no magnéticos; por ejemplo, para recoger objetos como la chatarra de hierro y acero.
- Platos magnéticos de máquinas- herramientas.
- Grúas magnéticas para ejercer una fuerza de atracción sobre otro material como piezas de hierro, cobalto o níquel.
- Frenos electromagnéticos empleados en aplicaciones de suspensión de cargas inclinadas y verticales, como montacargas o elevadores para carga y pasajeros, también para posicionamiento, paradas de emergencias, puentes grúas, máquinas herramientas, en definitiva, donde los equipamientos requieren paradas rápidas
- Embragues magnéticos para asegurar el acoplamiento de mecanismos de todo tipo de máquinas en las que se busque una ausencia de deslizamientos, pares elevados, espacios reducidos, y que la conexión se realice a mínima velocidad.
- Válvulas eléctricas.
- Componentes de generadores.
- Relés, disyuntores.
- Máquinas MRI (Imagen por resonancia magnética).

### **3.2.4 Equipos de separación magnética**

Los separadores magnéticos son usados con los siguientes propósitos:

- Para retirar las partículas contaminantes (metales ferromagnéticos) de la materia prima como arena de fundición, carbón, piedra, fertilizantes, escoria, yeso, minerales y materiales

similares, con la finalidad de proteger equipos costosos y vitales en las etapas posteriores del proceso.

- Para la purificación del fluido o material transportado.
- Para recuperar y rescatar restos ferrosos valiosos.

Los sistemas de separación magnética comprenden una gama muy extensa de separadores; desde las sencillas placas magnéticas hasta equipos complejos empleados en reciclaje industrial y tratamiento de residuos. Entre los equipos más utilizados en la industria se mencionan los siguientes:

- Separador con barras magnéticas

Son equipos (ver Figura 33) indicados para extraer los metales hierro de materiales inertes en las instalaciones de reciclaje, tratamiento de residuos, en la industria alimentaria, del plástico, de la madera, utilizados en tolvas en la salida o en la carga de cintas transportadoras, en los conductos de transporte en aspiración o en caída por gravedad para la desferrización de polvos, etcétera (Calamit España, 2012).

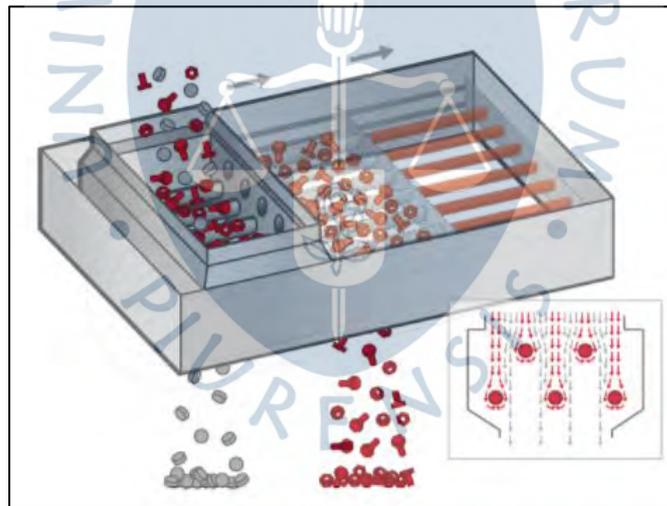


Figura 33. Separador automático con barras magnéticas

Fuente: (SOLLALU, 2015)

- Rodillo magnético

El rodillo magnético sustituye al rodillo conductor que se encuentra al final de la cinta transportadora (ver Figura 34). Extrae las partículas de hierro del material que circula y las conduce hasta la parte inferior, donde se desprenden y se recogen (SOLLALU, 2017).

Las partículas metálicas transportadas en la cinta junto con el material a limpiar se capturan debido a la acción del campo magnético y se conducen hacia detrás del eje del cilindro,

mientras que las partículas no magnéticas caen antes debido a la acción de la gravitación en una zona separada delante del cilindro (SOLLAU, 2017).

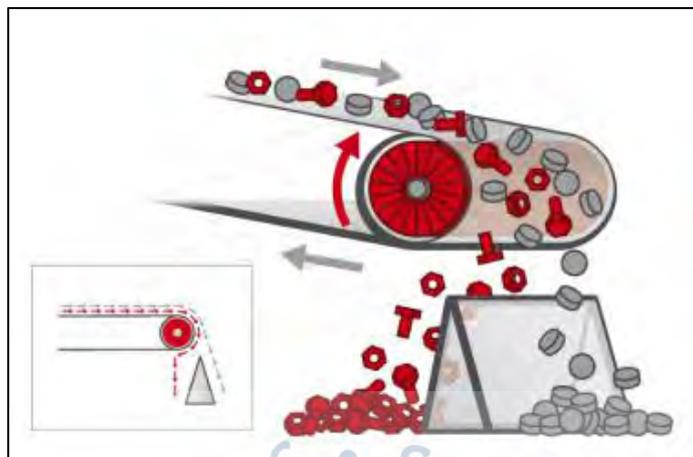


Figura 34. Rodillo magnético  
Fuente: (SOLLAU, 2017)

- Tambor magnético

El tambor separador está compuesto por dos secciones, una magnética y otra no magnética. El material que circula sobre una cinta cae sobre el sector magnético del tambor y las partículas férricas quedan atrapadas en el tambor. Al abandonar el campo magnético, estas partículas quedan libres y son separadas del resto del material (SOLLAU, 2017) (ver Figura 35).

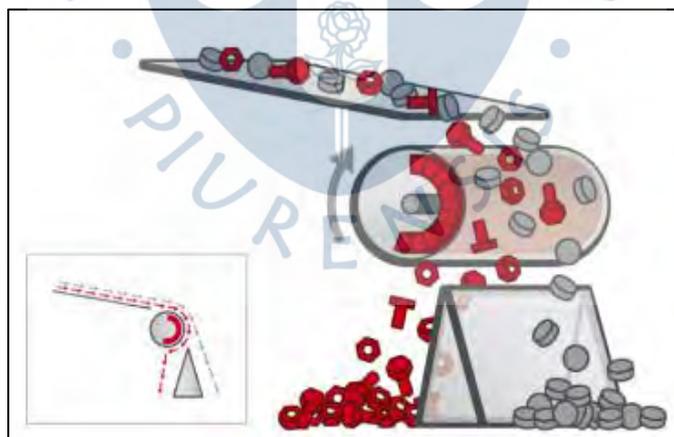


Figura 35. Tambor magnético  
Fuente: (SOLLAU, 2017)

- Separadores suspendidos sobre bandas

En la industria son utilizados tanto imanes permanentes como electroimanes los cuales son instalados sobre una banda o faja transportadora para el retiro de fragmentos ferromagnéticos (Carolina Material Technologies, s.f.).

Los imanes permanentes suspendidos son los sistemas más económicos, porque son de sencilla fabricación, no consumen energía y la imantación es de por vida. Son empleados en aplicaciones donde no exista excesiva cantidad de contaminación ferromagnética.

Los electroimanes suspendidos son unidades encajonadas con las bobinas adentro para generar un campo magnético de gran alcance. Se compone de un electroimán que crea unos potentes campos magnéticos que son generados por bobinas eléctricas que proporcionan la fuerza de atracción requerida para la separación de las piezas de hierro (Industrial Soutions, 2017).

### 3.3 Electroimanes suspendidos sobre fajas transportadoras

En la década de los 80 fueron instalados los primeros electroimanes suspendidos en el extremo de descarga de las bandas transportadoras en la mina chilena Codelco Chuquicamata y fueron los primeros electroimanes con corazones rectangulares instalados en el mundo. Actualmente estos equipos se encuentran presentes en una gama de industrias como en la minería, canteras, reciclaje, química, procesamiento de alimentos, fabricación y otras aplicaciones industriales.

Estos equipos retiran automáticamente fragmentos sueltos de hierro de flujos de productos tales como madera, carbón, o roca que se estén transportando por correas, alimentadores vibratorios o chutes. Los separadores electromagnéticos suspendidos sobre bandas transportadoras (ver Figura 36) son el medio más eficaz para la separación de piezas de hierro de otros materiales no ferrosos (Eriez, 2016).



Figura 36. Electroimán suspendido sobre faja transportadora  
Fuente: (Eriez, 2016)

El uso de estos equipos permite reducir los costos de mantenimiento y producción al evitar reparaciones en los equipos. Es importante realizar la extracción temprana de los residuos metálicos en la corriente de mineral para evitar que corriente abajo se presente cualquier daño potencialmente costoso en algún equipo.

Las características principales de un electroimán suspendido son las siguientes (IDEMAG, 2013):

- Alta profundidad del campo magnético.
- Potentes bobinas electromagnéticas.
- Alta capacidad de captación y separación.
- Larga durabilidad del equipo.

El uso de estos equipos permite reducir los costos de mantenimiento y producción al evitar reparaciones en los equipos por problemas ocasionados por fragmentos metálicos. Al mismo tiempo aumenta la productividad al evitar paros de producción durante los períodos de reparaciones y el valor añadido de sus materiales al separar de ellos contaminantes ferrosos aumentando su pureza (Norrgran & Kohmuench, 2007).

### **3.3.1 Selección de electroimanes suspendidos**

Para seleccionar un electroimán suspendido es necesario considerar los siguientes factores (Eriez, 2014):

- Capacidad de transporte, velocidad y ancho de la faja transportadora.
- Tipo, densidad, estado y tamaño de material.
- La velocidad de la faja transportadora, el incremento de la velocidad de la faja hará más difícil la tarea de retirar los componentes ferrosos, requiriendo un equipo más potente.
- Tipo y tamaño máximo y mínimo de fragmentos de hierro a ser retirados. Pequeños trozos de metal pueden ser extremadamente difíciles de eliminar especialmente cuando están cubiertos por una sobrecarga pesada de material.
- Ángulo de los rodillos, esto determinará la profundidad de la carga en la cinta transportadora. Si esta profundidad aumenta se necesitará un aumento de la fuerza del campo magnético para tirar del hierro a través de la carga más profunda

### 3.3.2 Instalación

- Los modelos de electroimanes suspendidos están diferenciados básicamente por el sistema de limpieza que presentan. Dos modelos son los más comercializados: unidades de autolimpieza y de limpieza manual.

Los electroimanes de limpieza manual son aquellos que después de cierto tiempo de operación deben ser apagados para retirar el hierro acumulado en el lateral del imán (ver Figura 37). Estos equipos suelen suspenderse de un carro de rodadura (monorriel) de modo que puedan desplazarse de la faja transportadora en el momento en que se realiza la limpieza. Son adecuados cuando se prevén ocasionales fragmentos de hierro (Dings, 2016).



Figura 37. Electroimán de limpieza manual  
Fuente: (Dings, 2014)

Los electroimanes de autolimpieza eliminan los fragmentos de hierro de forma automática y de forma continua (ver Figura 38). La auto limpieza del equipo se realiza mediante una banda de goma muy resistente al desgaste y provista de salientes transversales. Esto facilita el arrastre del material y separa las piezas contaminantes atrapadas arrojándolas hacia un lado de la banda transportadora, dicha banda limpiadora está montada en una estructura metálica con poleas que giran con sus rodamientos y es propulsada por un motor eléctrico con un reductor de velocidad, el tensado de la cinta se efectúa a través del tambor de inversión. Son adecuados cuando se prevén grandes cantidades de fragmentos de hierro.

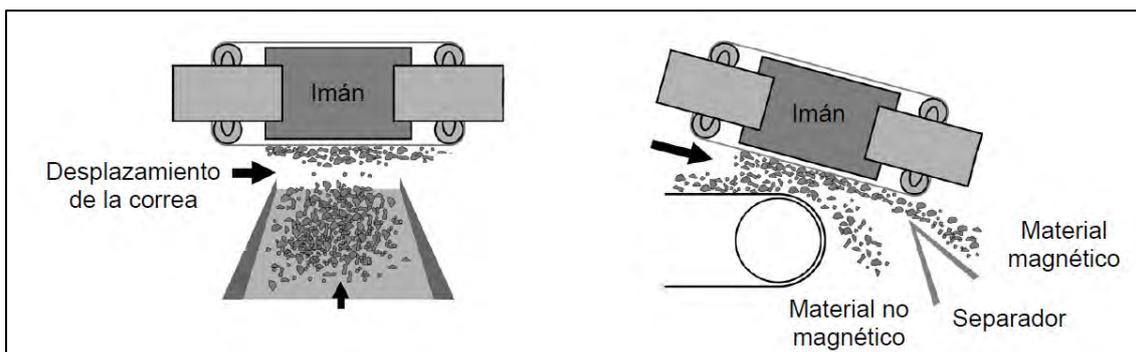


Figura 38. Electroimán de autolimpieza

Fuente: (Dings, 2016)

- **Orientación**

Para la orientación del electroimán se tienen disposiciones, la primera es el imán sobre polea principal del transportador y la segunda es a través de la faja transportadora. En la primera posición el electroimán suspendido permanece sobre la trayectoria del material de descarga de la faja transportadora. Al ser descargado el material sobre la polea principal de la faja transportadora, la carga se mueve directamente hacia el imán, facilitando la separación de los elementos metálicos del material de trabajo (Eriez, 2013)(ver Figura 39 y Figura 40).

En esta posición la línea central del imán debe pasar por centro de la polea y esta polea debe ser de material no magnético (acero inoxidable de la serie 300) para evitar el estímulo magnético que estaría presente si la polea fuera de acero al carbón. Esta posición es la más utilizada porque permite el uso más eficiente del separador magnético.

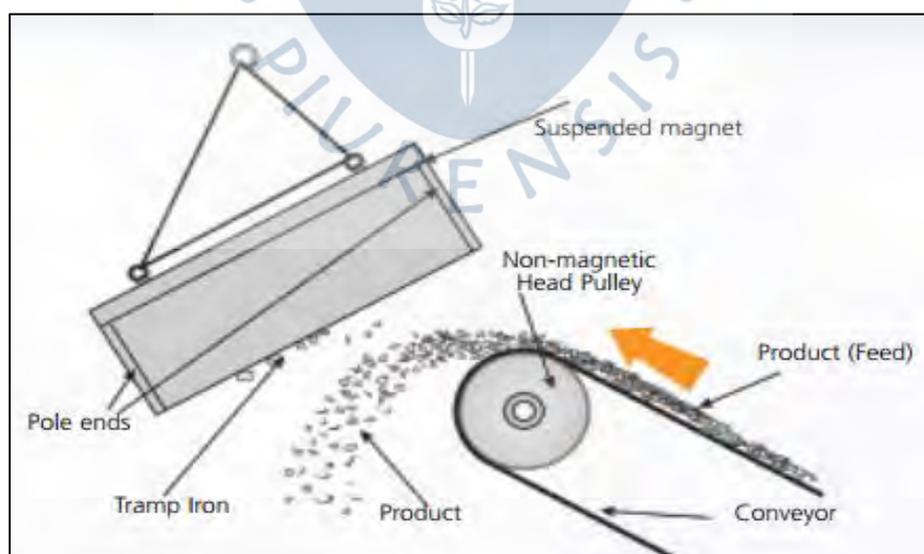


Figura 39. Electroimán de limpieza manual en posición 1

Fuente: (ERIEZ)

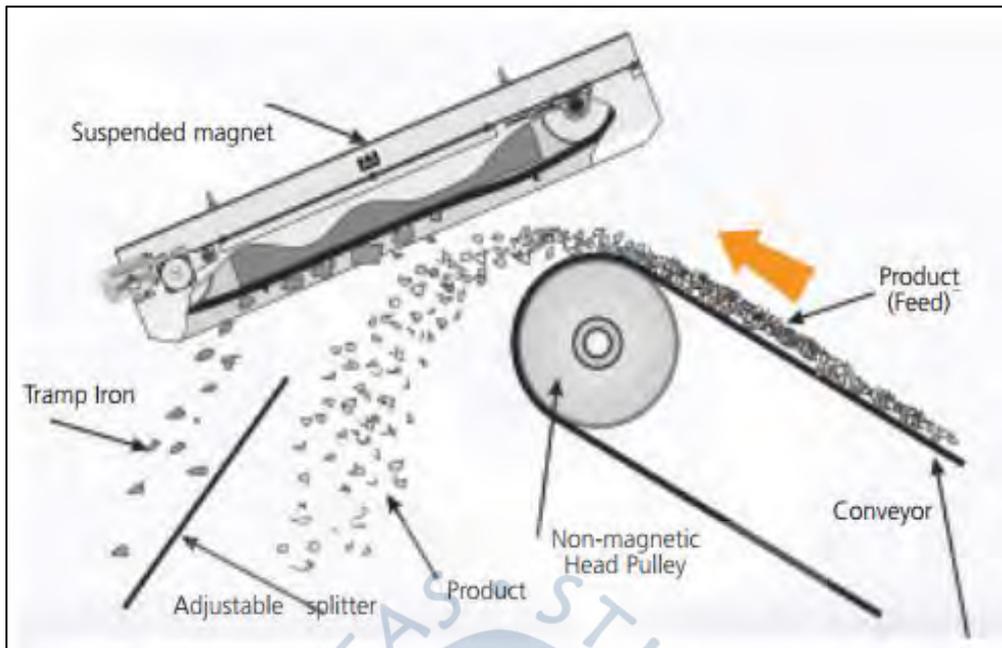


Figura 40. Electroimán autolimpiante en posición 1  
Fuente: (ERIEZ)

El ángulo normal del imán con respecto a un plano horizontal estará en el rango de  $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$  (ver Figura 41). A medida que las velocidades de la faja se incrementen, los ángulos de la instalación deben disminuir.

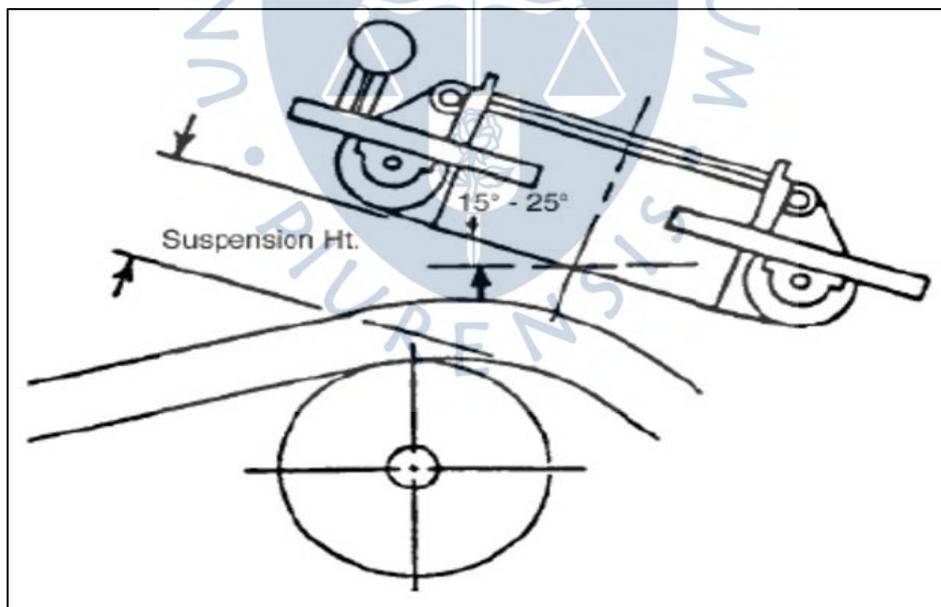


Figura 41. Posición 1 de electroimán de limpieza manual  
Fuente: (Eriez, 2013)

En la segunda posición las unidades limpieza manual y de autolimpieza deben instalarse en la línea central del transportador de material y paralelas a la pendiente del transportador (ver Figura 42 y Figura 43). Para este tipo de posición (Eriez, 2013), no se deben utilizar rodillos de

acero en la longitud del transportador debajo del separador. Cualquier rodillo de transporte debajo del separador debe estar hecho material no magnético (goma, madera, etcétera.).

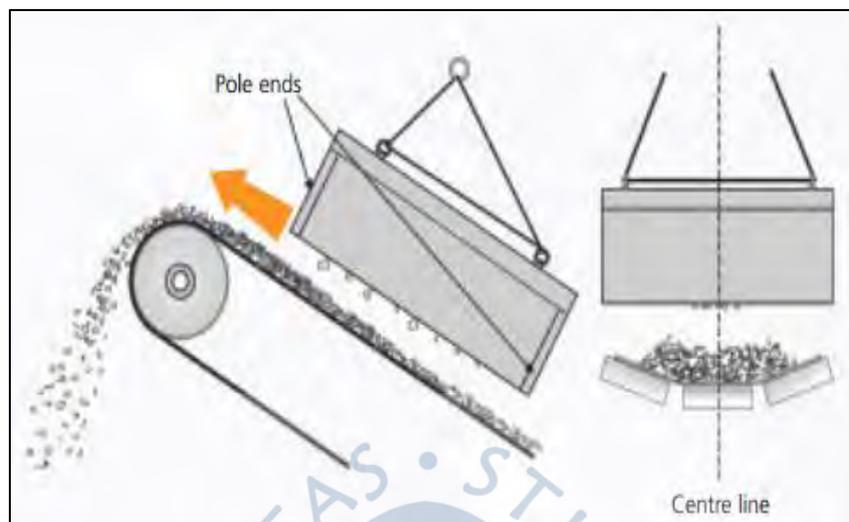


Figura 42. Electroimán de limpieza manual en posición 2  
Fuente: (ERIEZ)

Cuando un electroimán de autolimpieza está ubicado sobre a la faja transportadora, este equipo deberá instalado a una adecuada distancia de modo que un pedazo de hierro en la faja del imán pueda ser retirado por el borde de la faja transportadora (ver Figura 43).

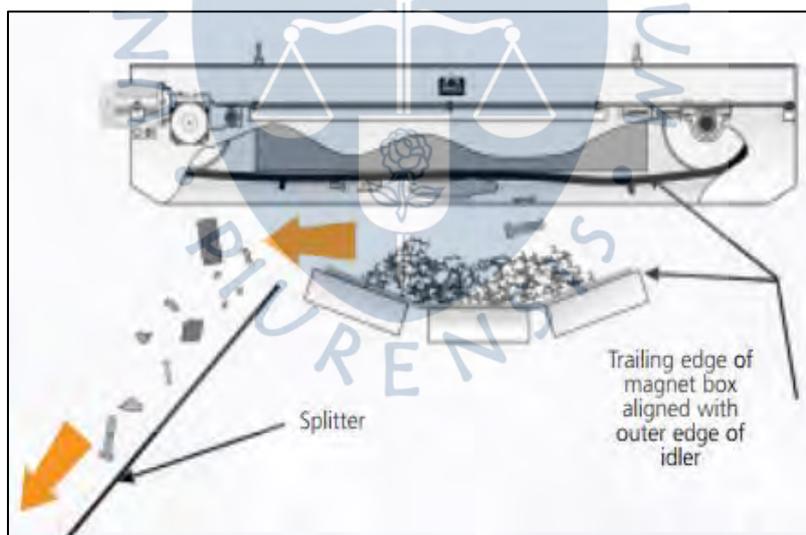


Figura 43. Electroimán autolimpiante en posición 2  
Fuente: (ERIEZ)

- **Altura de suspensión**

La altura especificada para la suspensión debe ser considerada un máximo y el imán se debe bajar lo más cerca posible a la carga real (Norrgran & Kohmuench, 2007). Al bajar el imán a la carga, asegurarse que no choque.

Para realizar la instalación se debe determinar el punto más alto de la trayectoria del material, el imán debe mantener una separación de 50 milímetros para la unidad de limpieza manual y 75 milímetros si es tipo auto limpiante, sobre el material (Eriez, 2013). Esta configuración asegura que el campo magnético se extienda hacia fuera desde el centro del imán, siendo el campo magnético más fuerte en el centro y menor a medida que se acerca a los bordes (ver Figura 44)

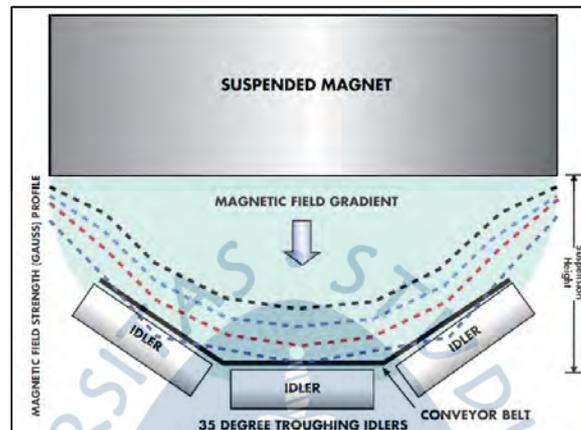
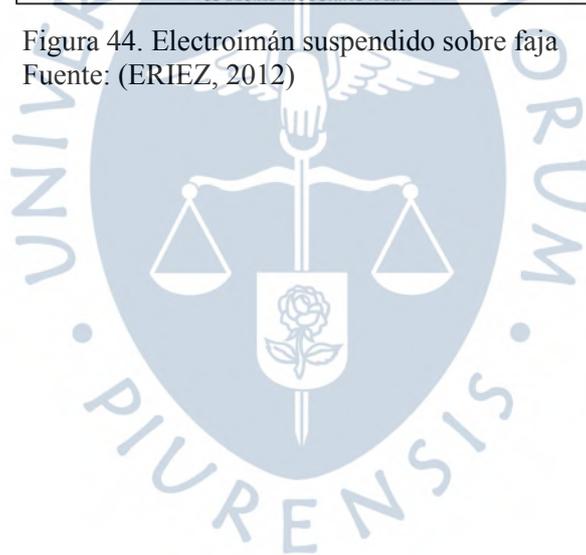


Figura 44. Electroimán suspendido sobre faja  
Fuente: (ERIEZ, 2012)



## Capítulo 4

### Diseño del sistema de retiro de residuos metálicos

#### 4.1 Ubicación del separador

La problemática actual evidenciada en los elevadores del equipo tambor secador ubicado en la planta de secado, ha provocado la generación de muchos residuos metálicos en el interior de estos secadores producto de problemas de corrosión acelerada y desgaste por abrasión.

Los restos metálicos son arrastrados juntamente con los productos de mineral grueso en la salida de los tambores rotatorios y se mezclan con los productos finos provenientes de los filtros de mangas en una faja transportadora que conecta el área de secado con los silos de almacenamiento. Es en esta faja, de longitud aproximada de 158 m y 0.8 m de ancho, donde las dos líneas de proceso de los secadores descargan el producto de mineral para ser almacenado. Por ello se evaluará una ubicación a lo largo de este tramo de la faja como un lugar estratégico para instalar un equipo de separación magnética.

Para determinar la ubicación del equipo separador han sido considerados los siguientes criterios:

- Equipos por proteger

Los equipos considerados a proteger son: faja transportadora, elevador de cangilones y rejillas de tolvas de descarga aguas abajo para prevenir problemas de atoros y deterioro de estos.

- Ubicación sobre línea de proceso

Es necesario que el separador magnético se encuentre instalado sobre la banda de la faja transportadora para el retiro de los elementos metálicos. Para ello será necesario colocar el equipo separador en un tramo de la faja transportadora encapsulada para impedir que corrientes de aire generen focos de polución de producto de mineral.

- Vías de acceso

El equipo deberá ser instalado en un lugar donde se cuente con los accesos necesarios para que el personal capacitado realice las operaciones y los trabajos de mantenimiento respectivo del equipo.

- Seguridad del personal

Al ser un separador de tipo magnético, se pretende que el lugar donde se encuentre instalado dicho equipo sea una zona de bajo tránsito de personal y debe contar con la señalización adecuada para evitar cualquier incidente por atracción magnética.

- Interferencias

La instalación del nuevo equipo no deberá originar cambios radicales que interfieran en el funcionamiento de otros equipos y/o estructuras presentes en campo.

- Manejo de residuos

Los fragmentos retirados presentes dentro del mineral se dispondrán en un botadero destinado a residuos del tipo metálico.

- Fuentes de energía

De acuerdo con el tipo de separador que se seleccione se deberá tener en cuenta si será necesario el uso energía eléctrica para su funcionamiento.

De acuerdo con los criterios anteriormente mencionados para determinar la ubicación del separador magnético, el equipo estará instalado sobre la faja transportadora tal como se muestra en el diagrama de proceso de Figura 45, donde la parte sombreada de color rojo indica la ubicación del separador, instalado en los primeros 50 metros de la faja transportadora de longitud aproximada de 158 m y 0.8 m de ancho.

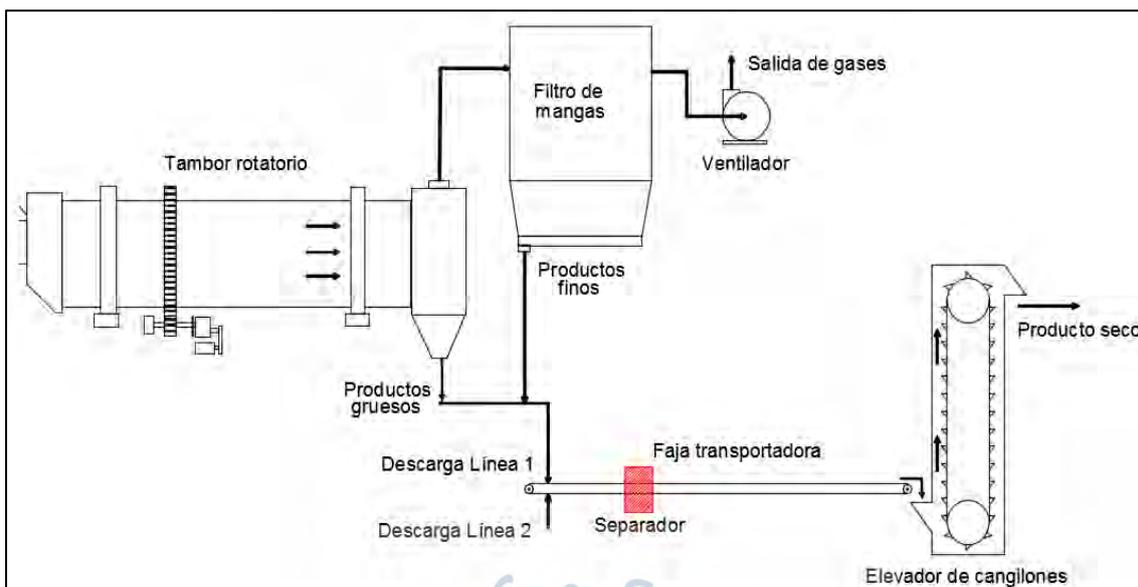


Figura 45. Ubicación del separador en la faja transportadora  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.2 Selección de separador

Para el retiro de los fragmentos metálicos presentes dentro del concentrado de mineral seco se ha seleccionado un separador de tipo magnético, porque permite la extracción de partículas contaminantes de metales ferromagnéticos de la materia prima como arena de fundición, carbón, piedra, fertilizantes, escoria, yeso, minerales y materiales similares, con la finalidad de proteger equipos costosos y vitales en el proceso de aguas abajo.

Dentro de los equipos destinados a este tipo de separación como ya se vio en el capítulo 3 se tienen: los rodillos magnéticos, separador de barras magnéticas, tambor magnético y los separadores suspendidos sobre bandas.

Dado que el separador deberá instalarse dentro de los primeros 50 m de la faja transportadora, el equipo se debe instalar por encima de la banda que transporta el mineral. Dados estos criterios el equipo que se adapta a estos requerimientos es un separador suspendido sobre bandas. Esta clase de separadores suspendidos pueden ser de dos tipos: permanentes o electroimanes.

Los electroimanes desarrollan un campo magnético más intenso que un imán permanente y tienen la facilidad de ser desmagnetados para realizar trabajos de limpieza, se empleará un electroimán suspendido como separador magnético sobre la faja transportadora y tendrá como finalidad retirar los fragmentos metálicos que se encuentren depositados al interior del concentrado de mineral seco.

Los restos metálicos originados en el interior de los tambores secadores debido a problemas de corrosión acelerada y desgaste por abrasión ocurridos en las planchas antidesgaste y en los elevadores fabricados en acero (ASTM A36 y AR400) pasan inicialmente por una rejilla de 100 mm x 100 mm ubicada en la salida de estos equipos, por ello los fragmentos de mayor dimensión que podrían ser transportados serían planchas de aproximadamente 100 mm x 100 mm. Elementos como los soportes de los elevadores también experimentan los mismos problemas de abrasión y corrosión pero no se desprenden debido a que estos elementos permanecen soldados al casco del tambor secador. Otros elementos metálicos encontrados aguas abajo son pernos que sujetan los soportes con los elevadores.

La gran mayoría de estos restos metálicos que son transportados con el mineral seco, tienen forma de planchas que van desde los 5 mm a los 12 mm de espesor con dimensiones no mayores a los 100 mm x 100 mm y también son detectados pernos de 5/8 de pulgada y de 2.5 pulgadas de longitud.

Tabla 18. Acero A36 y AR400

Propiedad	Unidad	ASTM A36	AR400
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	7861	7837

Fuente: Elaboración propia

La pieza de mayor peso a ser retirada del mineral seco por el electroimán suspendido sería de 1 kg aproximadamente, teniendo en cuenta la densidad del acero ASTM A36 mostrada en la Tabla 18, correspondiendo a un residuo metálico en forma de una plancha de dimensiones 100 x 100 x 12 mm. La cantidad de residuos

Para el retiro de estos residuos, se seleccionará un equipo separador electromagnético de la marca Eriez. Los modelos de electroimanes suspendidos de tipo de limpieza manual de este fabricante se listan en la Tabla 19.

Tabla 19. Modelos de electroimanes suspendidos Eriez

Parámetros para aplicación	Modelos de electroimanes			
	SE 7535	SE 7635	SE 7735	SE 7835
Máximo ancho de banda (cm)	137	153	168	183
Profundidad máxima de carga (cm)	38	43	51	61
Altura de suspensión (cm)	43	48	56	69

Fuente: (ERIEZ, 2018)

De acuerdo con los parámetros establecidos en la Tabla 19, se necesita conocer los siguientes datos: ancho de banda y profundidad de carga de mineral de la faja transportadora que transporta en concentrado seco de mineral.

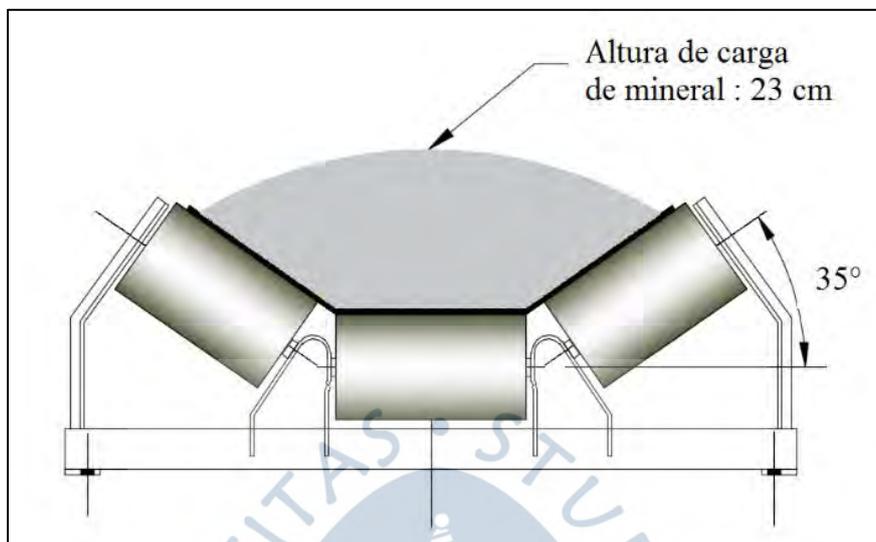


Figura 46. Sección de faja transportadora  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 46 se muestra que la altura de mineral seco respecto de la banda es de 23 cm y tiene un ancho de 80 cm como ya se había mencionado anteriormente.

El electroimán suspendido sobre banda que ha sido seleccionado el siguiente equipo: Separador Magnético Eriez SE 7535, que es un electroimán refrigerado por aceite (ver Figura 47). Esta característica previene el agotamiento de la bobina en el futuro. Factores como el calor y la humedad son los enemigos más grandes de los electroimanes que son efectivamente controlados por el tanque de expansión de aceite.

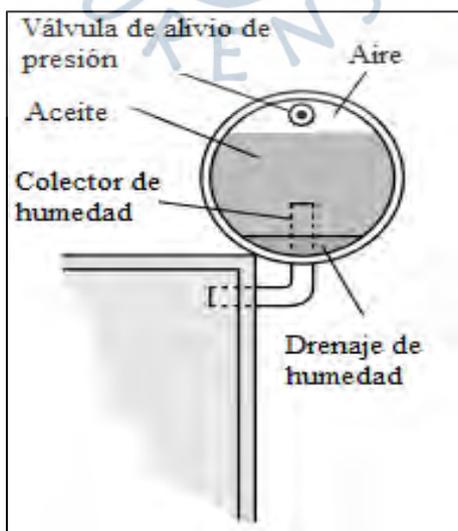


Figura 47. Tanque de expansión de aceite  
Fuente: (ERIEZ, 2012)

Tabla 20. Especificaciones del electroimán separador

Separador Magnético Eriez SE 7535	
Potencia (W)	7868
Voltaje DC (V)	115
Amperaje (A)	68

Fuente: (ERIEZ, 2013)

### 4.3 Diseño de la estructura de soporte

El electroimán seleccionado es una unidad de limpieza manual y suelen suspenderse de un carro de rodadura para desplazarse de la faja transportadora en el momento en que se realizan los trabajos de limpieza.

#### 4.3.1 Equipos y accesorios

- Separador magnético: Electroimán ERIEZ SE 7535

El electroimán seleccionado tiene un peso de 2683 kg y las dimensiones de este equipo se especifican en la Figura 48.

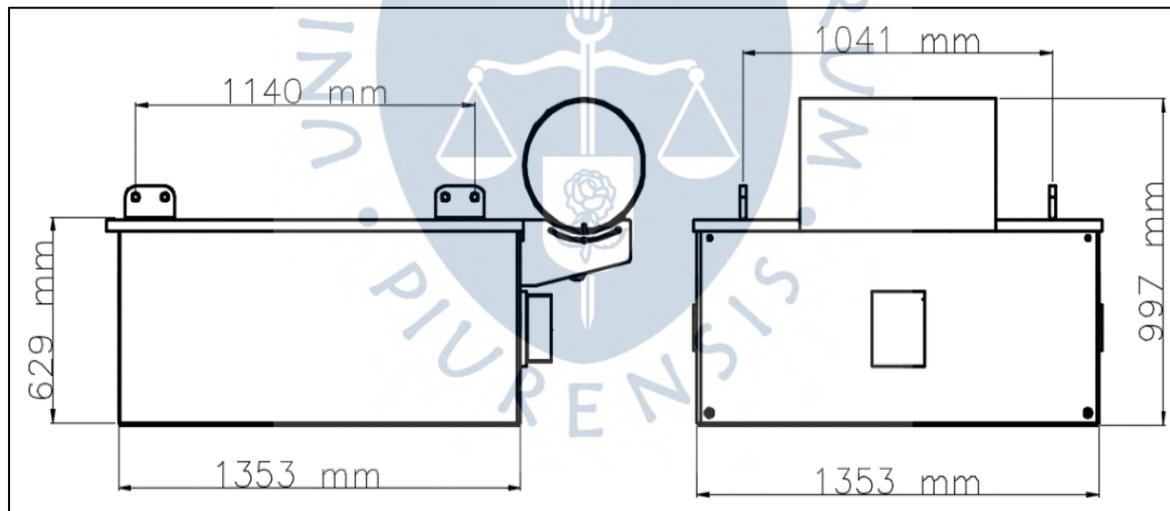


Figura 48. Dimensiones de Electroimán Eriez SE 7535

Fuente: (ERIEZ, 2013)

- Carro de rodadura:

Las características del carro de rodadura, sobre el cual estará suspendido el electroimán se especifican en la Figura 49 y Figura 50.

Specifications										
Rated capacity (tons)	Product Code	Operating Voltage		Phase	Travel Speed		Motor H.P.	Min. beam size	Max. beam size	Shipping weight (lbs)
		50 hertz	60 hertz		50 hertz (F.P.M.)	60 hertz (F.P.M.)				
1/8-2	0300	220/380-415	220-240/440-480	3	65	78	1/3	S6x12.5	S18x54.7	108
1/8-2	0301	n/a	110-120	1	n/a	78	1/3	S6x12.5	S18x54.7	113
3	0302	220/380-415	220-240/440-480	3	65	78	3/4	S8x18.4	S24x79.9	185
3	0303	n/a	110-120	1	n/a	78	3/4	S8x18.4	S24x79.9	190

Figura 49. Especificaciones de trolley de 3 toneladas  
Fuente: (Columbus McKinnon Corporation, 2017)

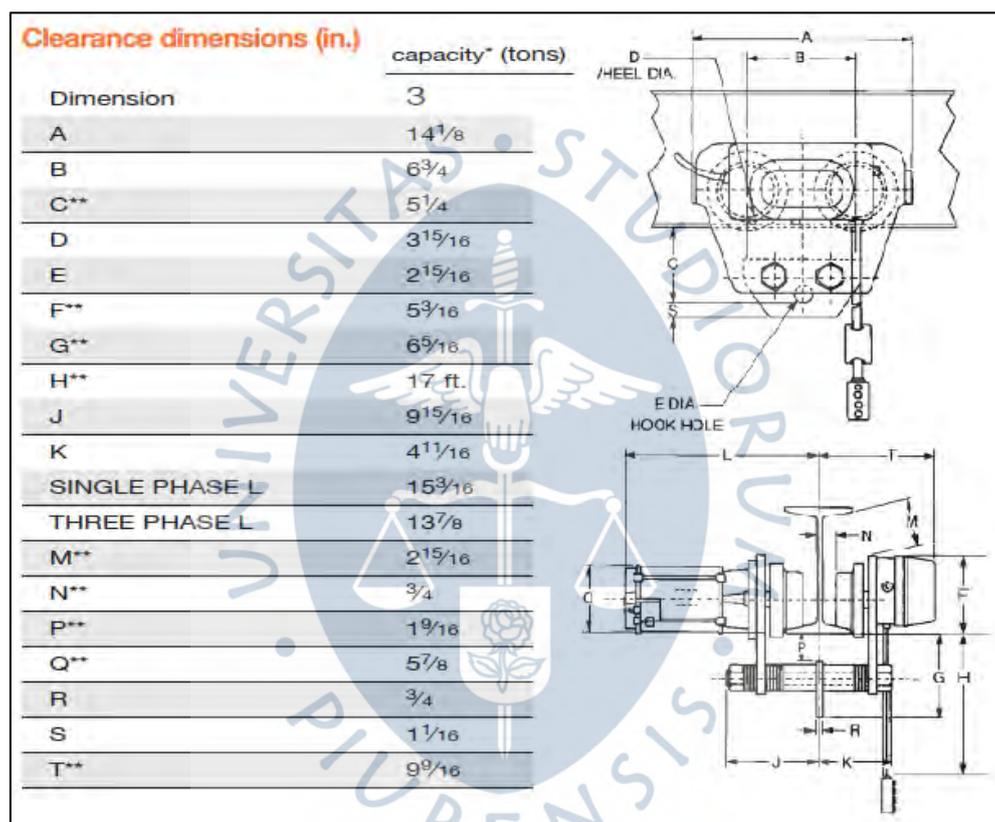


Figura 50. Dimensiones de trolley de 3 toneladas  
Fuente: (Columbus McKinnon Corporation, 2017)

- Aparejos para la suspensión del electroimán

El electroimán separador estará suspendido del carro de rodadura a una determinada distancia y para ello son necesarios accesorios que permitan su posicionamiento sobre la faja transportadora.

Para lograr posicionar correctamente el electroimán es necesario emplear los siguientes accesorios: grilletes, anillas o eslabones maestro, ganchos y eslingas. Estos elementos son los encargados de establecer la conexión entre el carro de rodadura y el electroimán utilizando cuatro ramales de eslingas como se muestra en la Figura 51.

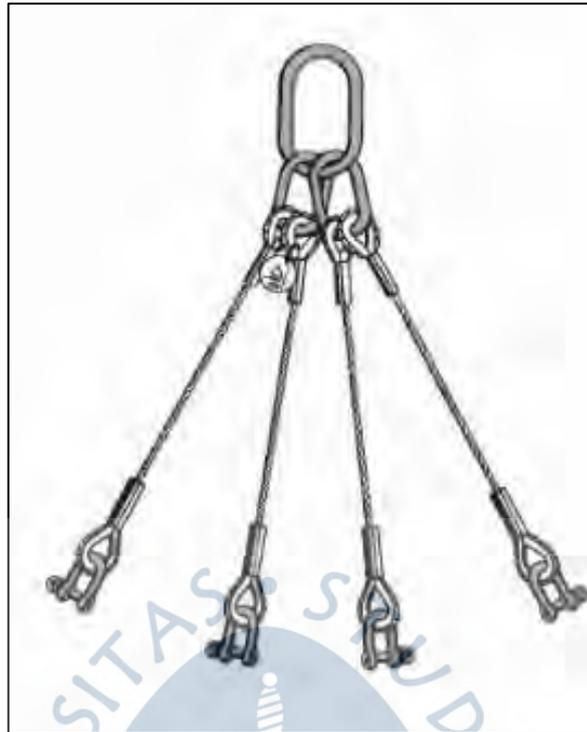


Figura 51. Disposición de eslingas de cuatro ramales  
Fuente: (Direct Industry, 2018)

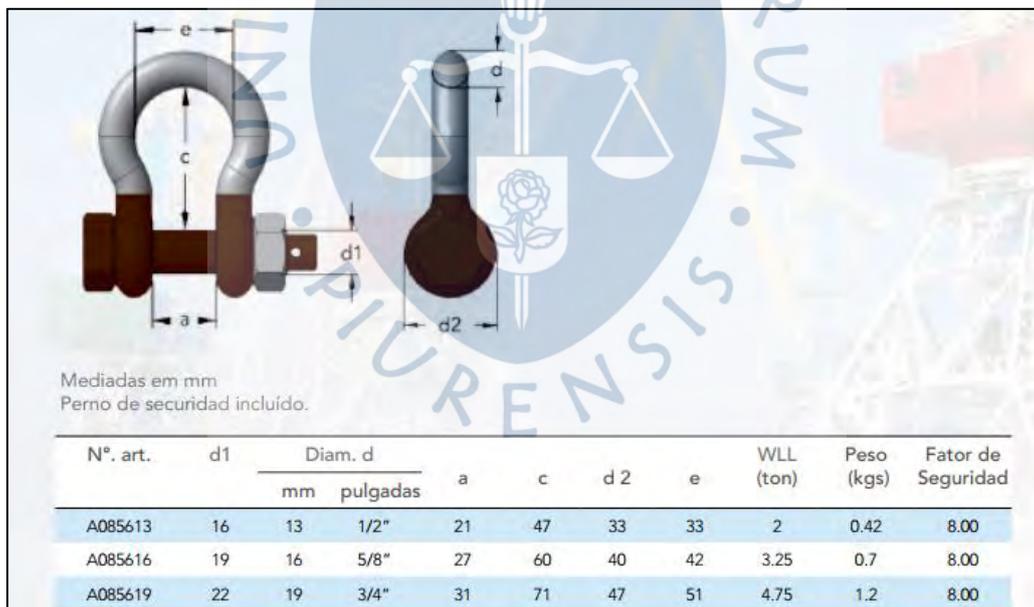


Figura 52. Especificaciones de Grillete  
Fuente: (Gunnebo Industries, 2016)

**Gancho de seguridad con pestillo "Grip" OBK**

N°. art.	Código	WLL ton*	A	L	B	E	F	G	H	Peso kg
Z101048	OBK-6-10	1.5	12	103	26	22	9	15	17	0.4
Z101143	OBK-7/8-10	2.5	14	139	37	28	10	20	22	0.8
Z101145	OBK-10-10	4.0	16	170	47	34	13	22	29	1.3
Z101147	OBK-13-10	6.7	21	206	53	44	15	29	38	2.6
Z101141	OBK-16-10	10.0	26	251	68	56	19	29	45	4.4
Z101240	OBK-18/20-10	16.0	28	293	74	60	22	44	56	7.3

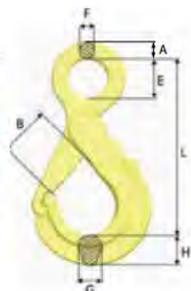


Figura 53. Especificaciones de Gancho  
Fuente: (Gunnebo Industries, 2016)

**Eslabón maestro con subeslabones MT**  
Diseñado para cadena o cable de acero. Para eslingas de 3 y 4 ramales

N°. art.	Código	WLL ton (FS 5:1)		L1	L	E	D	l	e	d	Peso kg
		EN 1677-4	ASTM A-952								
Z100902	MT-6-10	3.5	5.0	270	150	90	19	120	70	14	1.8
Z100903	MT-8-10	5.2	8.0	300	160	95	22	140	80	17	3.0
Z101359	MT-9-10	6.9	9.7	340	190	110	28	150	90	19	4.9
Z100904	MT-10-10	11.5	16.0	360	200	120	30	160	95	22	6.4
Z100905	MT-13-10	17.0	26.0	450	250	150	40	190	110	28	14.2
Z100906	MT-16-10	28.0	35.0	500	300	200	50	200	120	32	23
Z101074	MT-20-10	35.0	50.0	550	300	200	55	250	150	40	31.5
Z101281	MT-22-10	53.0	75.0	610	350	200	60	260	140	45	46
Z101282	MT-26-10	70.0	100.0	730	450	250	70	280	160	50	71
Z101283	MT-32-10	90.0	125.0	750	450	260	80	280	160	55	91

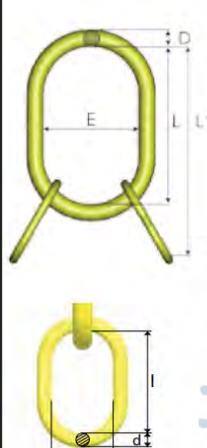


Figura 54. Especificación de Eslabón  
Fuente: (Gunnebo Industries, 2016)

La distribución de eslingas de 4 ramales de cable de acero anteriormente mencionadas tendrá la disposición de acuerdo con la Figura 55 juntamente con el electroimán, es por ello que se debe seleccionar el calibre del cable de acero de acuerdo con lo especificado en los manuales de estos elementos.

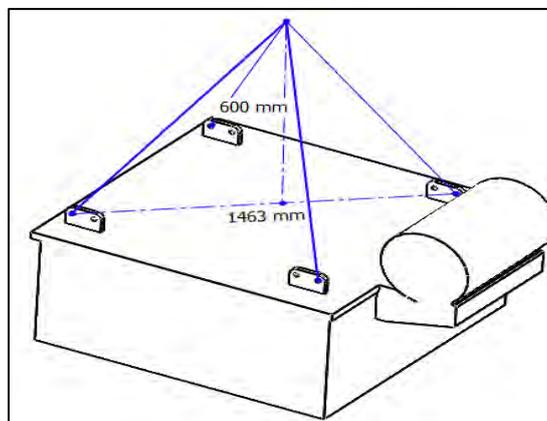


Figura 55. Electroimán suspendido  
Fuente: Elaboración propia

Se determinan los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  que se indican en la Figura 56 para proceder con la selección adecuada teniendo en cuenta que el peso a ser soportado es de 2683 kg.

Los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos a partir de la Figura 55 son los siguientes:

$$\beta = 90^\circ - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{600}{\frac{1463}{2}} \right) = 50.64^\circ$$

$$\alpha = 180^\circ - 2 \times \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{600}{\frac{1463}{2}} \right) = 101.28^\circ$$

Los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  se encuentran dentro de los rangos determinados que se muestran en la Figura 56. El peso para soportar es de 2,7 toneladas aproximadamente, por ello se seleccionan que soporten una carga superior a ésta. Para este caso se utilizarán 4 eslingas de diámetro nominal de 16 mm y de 95 cm de longitud.

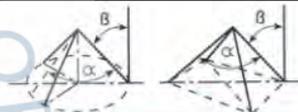
Cargas de multi-ramal					
NÚMERO DE RAMALES, N NO APLICABLE A 3 RAMALES		2 RAMALES		3 Y 4 RAMALES	
Ángulo de inclinación respecto a la vertical, $\beta$		$\beta < 45^\circ$	$45^\circ < \beta < 60^\circ$	$\beta < 45^\circ$	$45^\circ < \beta < 60^\circ$
Ángulo entre ramales opuestos no aplicable a 3 ramales, $\alpha$		$\alpha < 90^\circ$	$90^\circ < \alpha < 120^\circ$	$\alpha < 90^\circ$	$90^\circ < \alpha < 120^\circ$
Dimensión nominal					
[mm]	Eslingas de cadena cargadas de forma equilibrada*				
10	1.250	900	1.900	1.300	
12	1.800	1.300	2.700	1.900	
14	2.500	1.800	3.800	2.700	
16	3.300	2.400	5.000	3.600	

Figura 56. Especificaciones de Eslinga de cable de acero  
Fuente: (Unitex Spain, 2016)

#### 4.3.2 Diseño de la viga de carga

El diseño de la estructura estará de acuerdo de a los siguientes códigos y estándares:

- AISC 360-16 *Specification for Structural Steel Buildings*
- AISC *Manual of Steel Construction*
- LRFD: *Load Resistance Factor Design*
- Reglamento Nacional de Edificaciones

La viga de carga de 3,4 m de longitud será diseñada como una viga para puente grúa, la cual soportará al electroimán suspendido juntamente con el carro de rodadura y los accesorios. El carro de rodadura seleccionado es un *trolley* motorizado diseñado para soportar una carga de 3

toneladas, es por ello el peso del electroimán que es de 2683 kg, para efecto de diseño será asumido de 3000 kg (ver Figura 57).

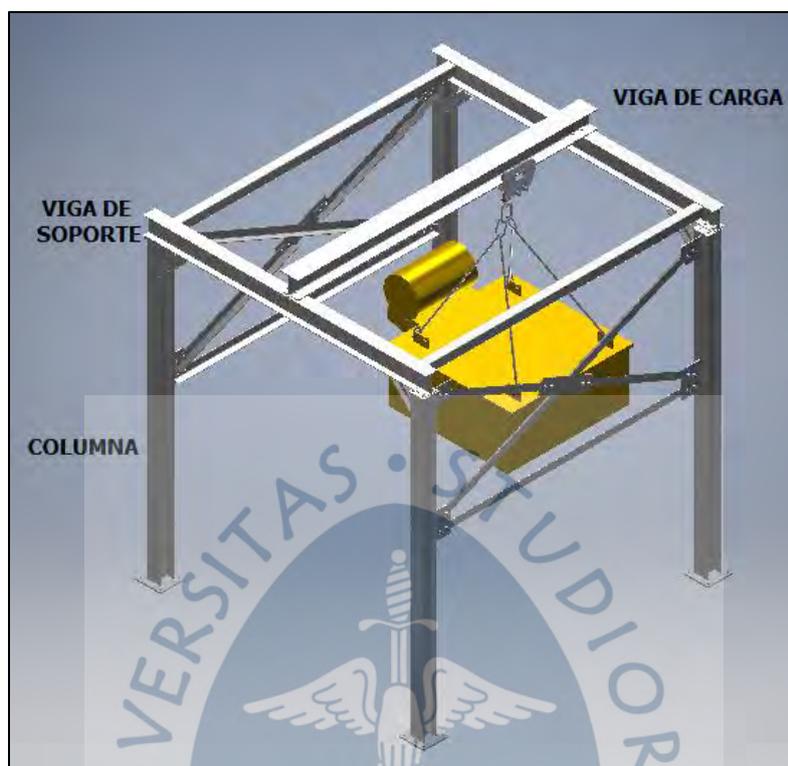


Figura 57. Estructura de soporte de electroimán  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Cargas soportadas por viga de carga

Cargas				
Descripción	Unidad	Cantidad	Peso unitario (kg/und)	Peso (kg)
Trolley para 3 toneladas	und	1	84,09	84,09
Grillete (A085619)	und	5	1,20	6,00
Eslabón maestro (MT-8-10)	und	1	3,00	3,00
Eslinga de cable de 16 mm	m	4	0,94	3,76
Gancho (OBK-13-10)	und	1	1,30	1,30
Carga suspendida	kg	1	3000,00	3000,00
Peso total				3100 kg

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño de vigas se considerarán los siguientes diagramas y fórmulas mostrados en las figuras 58; 59 y 60 extraídos del AISC *Manual of Steel Construction*.

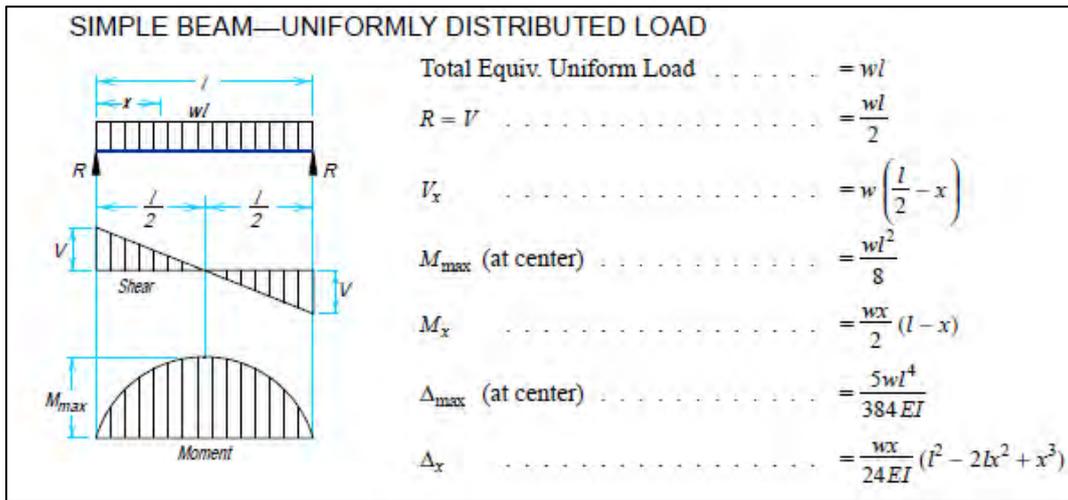


Figura 58. Diagrama para carga distribuida  
Fuente: (AISC, 1994)

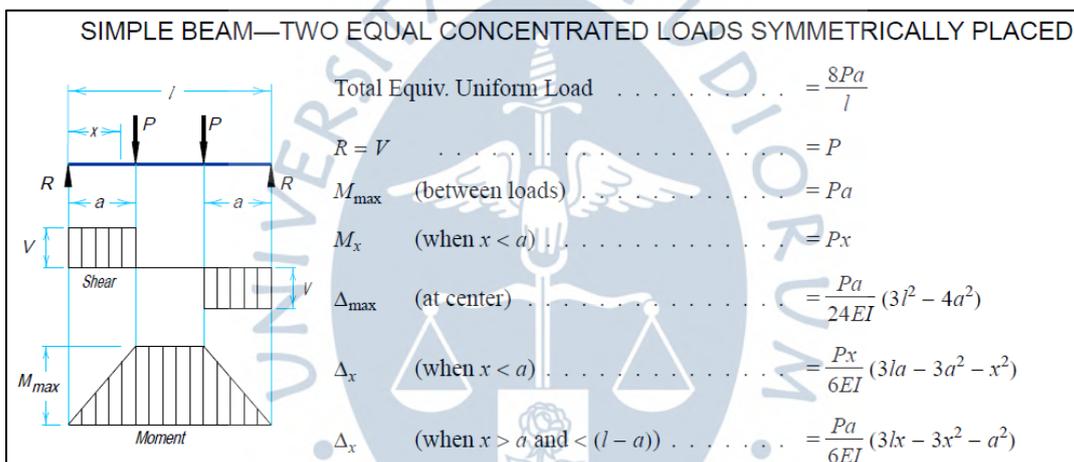


Figura 59. Diagramas para dos cargas puntual  
Fuente: (AISC, 1994)

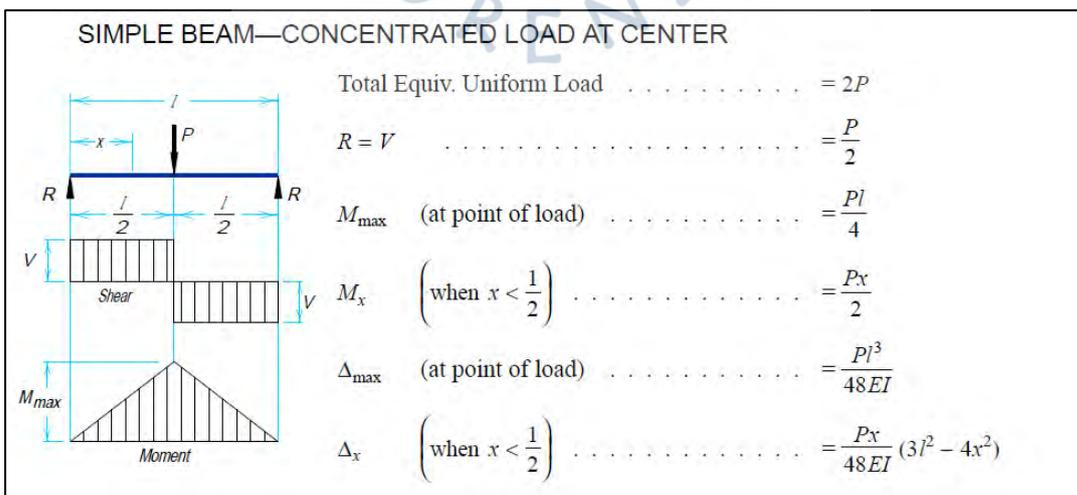


Figura 60. Diagramas para una carga puntual (AISC, 1994)  
Fuente: (AISC, 1994)

La longitud de la viga destinada a soportar el electroimán será de 3,4 m fabricada en acero ASTM A992, cuyas propiedades se detallan en la Tabla 22.

Tabla 22. Propiedades del acero ASTM A992

Propiedades del Acero ASTM A992		
Esfuerzo de fluencia	50 ksi	3515 kgf/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo de rotura	65 ksi	4570 kgf/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	30 000 ksi	21000000 kgf/cm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

Para estructuras que soportan carga viva que produce impacto deberá considerarse un incremento en la carga viva nominal debido a este efecto, que para el caso de vigas de puentes grúas con control colgante y sus conexiones corresponde un valor del 10%. (Ministerio de Vivienda, 2006). Teniendo en cuenta este factor de amplificación para la carga viva, se procede a determinar la ecuación para la combinación de cargas más crítica usando los factores según el método LRFD y se establece lo siguiente:

$$P_u = 1,2 P_D + 1,6 P_L \quad (1)$$

$$P_u = 1,2 * P_D + 1,6 * (1,1 L) \quad (2)$$

Dado que se desconoce el perfil de la viga, se trabajará considerando sólo la influencia de la carga viva (L), para posteriormente realizar una comprobación en la que se incluya el peso propio del perfil. Teniendo en cuenta estas consideraciones se determina la siguiente ecuación:

$$P_u = 1,6 P_L \quad (3)$$

El momento máximo debido a la carga viva se establece de la siguiente forma para el caso donde una carga puntual está situada a lo largo de una viga de 3,4 m que tiene 2 apoyos.

$$L = (3100) \text{kg} = 3100 \text{ kgf}$$

$$P_L = (1,1 L) = (1,1 * 3100 \text{ kg}) = 3410 \text{ kgf}$$

$$P_u = 1,6 * 3410 \text{ kg} = 5456 \text{ kgf}$$

Se determina el valor del momento último de acuerdo con el método del LRFD teniendo en cuenta las ecuaciones para momento máximo mostrados en la Figura 60:

$$M_L = \frac{P_L \cdot l}{4} \quad (4)$$

$$M_u = 1,6 M_L = 1,6 \left( \frac{3410 \text{ KG} \times 340 \text{ CM}}{4} \right) = 463760 \text{ kgf. cm}$$

Para la selección del perfil estructural se determinará el módulo plástico verificado con las siguientes ecuaciones bajo el límite de fluencia (eq. I3-3a) (ANSI/AISC 360, 2016):

$$M_n = M_p = Z_x * F_y \quad (5)$$

$$M_u \leq \phi * M_n \quad (6)$$

$$Z_{x \text{ requerida}} = \frac{M_{uy}}{\phi * F_y} \quad (7)$$

$$Z_{x \text{ requerida}} = \frac{463760 \text{ kg. cm}}{0,9 \times 3515 \text{ kgf/cm}^2} = 146,60 \text{ cm}^3$$

Se establece que la deformación admisible vertical como lateral será 1/600 (Bellei, 1998, pág. 163) para los casos de vigas que tendrán carros rodantes o trolley, teniendo así la siguiente ecuación (8):

$$f_y = 1/600 \quad (8)$$

Se calcula el momento de inercia respectivo partiendo de la deformación admisible (AISC, 1994):

$$I_x = \frac{(1,6 P_L) * l^3}{48 E f_y} \quad (9)$$

$$I_{x \text{ requerido}} = \frac{(1,6 * 3410) \text{ kgf} (340 \text{ cm})^3}{48 \left( 2,10 \times 10^6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \left( \frac{340}{600} \text{ cm} \right)} = 3754,25 \text{ cm}^4$$

Otro factor que se debe tomar en cuenta para la selección del perfil estructural es el ancho del patín, el cual no debe ser mayor a 7 pulgadas o 177,8 cm de acuerdo con lo indicado en las especificaciones del *trolley* seleccionado.

Se selecciona el perfil W10x30 y sus especificaciones se detallan en las Tabla 23 y Tabla 24.

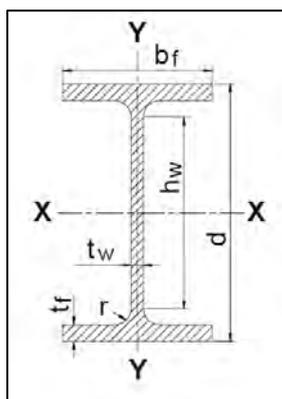


Figura 61. Esquema de perfil W  
Fuente: (Troglia & Troglia, 2005)

Tabla 23. Dimensiones perfil W10x30

Designación	Dimensiones						Relaciones		Ag	Peso	X - X					Y - Y					J	Cw	
	d	bf	tf	hw	tw	r	bf/2tf	hw/tw			Ix	Sx	rx	Qx	Zx	Iy	Sy	ry	Qy	1,5.Sy			Zy
	mm	mm	mm	mm	mm	mm					cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>			cm <sup>3</sup>
W10x30	266	148	13,0	219	7,62	12,7	5,70	28,8	57,03	44,6	7076	531	11,13	300	600	695	94,2	3,48	72,4	141	145	25,8	111174

Fuente: (Troglia & Troglia, 2005)

Tabla 24. Especificaciones de perfil W10x30

LOAD FACTOR DESIGN SELECTION TABLE For shapes used as beams $\phi_b = 0.90$											
$F_y = 36 \text{ ksi}$					$Z_x$	Shape	$F_y = 50 \text{ ksi}$				
BF	$L_r$	$L_p$	$\phi_b M_r$	$\phi_b M_p$			$\phi_b M_p$	$\phi_b M_r$	$L_p$	$L_r$	BF
Kips	Ft	Ft	Kip-ft	Kip-ft	in. <sup>3</sup>		Kip-ft	Kip-ft	Ft	Ft	Kips
2.44	20.3	5.7	63.2	98.8	36.6	W10x30	137	97.2	4.8	14.5	4.13

Fuente: (AISC, 1994)

Es necesario corroborar que la viga seleccionada cumpla con los requerimientos solicitados de diseño.

Se verifica que un perfil estructural seleccionado es compacto cuando cumple con la siguiente condición:  $\lambda < \lambda_p$ . Definiéndose  $\lambda$  como la relación ancho – espesor. En la Tabla 25 se presentan estas relaciones tanto para el alma como para el patín, determinando que el perfil seleccionado es compacto.

Tabla 25. Razón límite ancho – espesor

Elemento	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Patín	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Alma	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

Fuente:(ANSI/AISC 360, 2016)

Tabla 26. Razón límite ancho – espesor de perfil W10x30

Elemento	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Patín	5,70	9,31	24,50
Alma	28,80	92,10	139,62

Fuente: Elaboración propia

Dado que el perfil seleccionado W10x30 es compacto la resistencia nominal por momento  $M_n$  es igual a la capacidad total por momento plástico  $M_p$ . (ANSI/AISC 360, 2016)

$$M_p = F_y \cdot Z_x = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \times 600 \text{ cm}^3 = 2109000 \text{ kgf. cm}$$

$$\phi_b \cdot M_p = 0,9 \times 2109000 \text{ kg. cm} = 1898100 \text{ kgf. cm}$$

Se procede a verificar la capacidad de momento de la viga W10x30

Distancia entre arriostramientos:  $L_b = 340 \text{ cm}$

El valor de la longitud límite sin arriostramiento lateral ( $L_p$ ) para el estado límite de fluencia puede obtenerse a partir de la ecuación 10 (ANSI/AISC 360, 2016, págs. 16.1-48) o directamente de la Tabla 24 considerando  $F_y = 50 \text{ ksi}$ :

$$L_p = 1,76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (10)$$

De la Tabla 23 se tiene que el valor de  $r_y = 3,48 \text{ mm}$ , por tanto, reemplazando en la ecuación 10:

$$L_p = 1,76 \left( \frac{3,48}{30,48} \text{ ft} \right) \sqrt{\frac{30 \times 10^3 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 4,8 \text{ ft} = 146,30 \text{ cm}$$

De la Tabla 24:

$$L_p = 4,8 \text{ ft} = 4,8 * 30,48 \text{ cm} = 146,30 \text{ cm}$$

El valor de la longitud límite sin arriostamiento lateral ( $L_r$ ) para el estado límite de fluencia se puede obtener a partir de la ecuación 11 y 12 (ANSI/AISC 360, 2016, págs. 16.1-48) o directamente de la Tabla 24 considerando  $F_y = 50 \text{ ksi}$ :

$$L_r = 1,95 r_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{J_x c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J_x c}{S_x h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (11)$$

$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x} \quad (12)$$

$$L_r = 14,5 \text{ ft} = 14,5 * 30,48 \text{ cm} = 441,96 \text{ cm}$$

Se cumple que  $L_p < L_b < L_r$  por tanto el miembro se encuentra en la zona de pandeo inelástico y se debe calcular la capacidad de momento  $\phi_b \cdot M_n$  con la siguiente ecuación (McCormac, 2002, pág. 259):

$$\phi_b \cdot M_n = C_b \cdot [\phi_b M_p - BF(L_b - L_p)] \leq \phi_b M_p \quad (13)$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (14)$$

$$C_b = 1.32$$

$$\phi_b \cdot M_n = 1,32 \times \left[ 137 \text{ kip} \cdot \text{ft} - 4,13 \text{ kip} \times \left( \frac{340}{30,48} - 4,80 \right) \text{ ft} \right] = 146,20 \text{ kpi} \cdot \text{ft}$$

$$\phi_b M_n = 146,20 \text{ kpi} \cdot \text{ft} = 2017057,573 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Se determina que  $\phi_b \cdot M_n > \phi_b M_p$ , por tanto, se usa como valor de capacidad de momento lo siguiente:  $\phi_b M_n = 1898100 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$

Se verifica que el perfil seleccionado cumple con la condición en la cual el momento último es menor a la capacidad de momento (AISC, 1994, págs. 6-53):

$$M_u < \phi_b M_n$$

$$463760 \text{ kgf. cm} < 1898100 \text{ kgf. cm}$$

El perfil seleccionado es W10x30, y se procede a calcular el valor del momento último  $M_{uy}$  considerando el peso de la viga que será máximo justo en el punto medio de la longitud total. El resto de los parámetros permanece igual debido a que el peso de la viga sólo influye en  $M_{uy}$ .

$$M_u = \frac{1,2(44,6 \text{ kg/m}) (3,4\text{m})^2}{8} + 4637,60 \text{ kg. m} = 4714,94 \text{ kg. m}$$

$$M_u = 471494 \text{ kgf. cm}$$

Nuevamente se verifica que el perfil cumple para la condición (AISC, 1994, págs. 6-53):

$$M_u < \phi_b M_n$$

$$471494 \text{ kg. cm} < 1742003,32 \text{ kgf. cm}$$

Se procederá a verificar la resistencia por cortante (AISC, 1994, págs. 6-56):

$$V_u \leq \phi_b V_n$$

Tabla 27. Falla por cortante según relación  $h/t_w$

Ecuaciones para falla por cortante			
$\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_y}}$	$V_n = 0,6 \cdot F_y \cdot A_w$	No hay inestabilidad en el alma	( 15)
$\frac{418}{\sqrt{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq \frac{523}{\sqrt{F_y}}$	$V_n = 0,6 \cdot F_y \cdot \frac{418/\sqrt{F_y}}{h/t_w}$	Puede ocurrir pandeo inelástico en el alma	( 16)
$\frac{523}{\sqrt{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 260$	$V_n = \frac{132000 \cdot A_w}{(h/t_w)^2}$	Pandeo elástico del alma	( 17)

Fuente: (AISC, 1994, págs. 6-56)

De las propiedades del perfil W8x31 el valor de la relación:

$$\frac{h}{t_w} = 11,4 \quad ; \quad \frac{418}{\sqrt{F_y}} = 59$$

Cumple con lo establecido de la relación:  $h/t_w < 418/\sqrt{F_y}$ , por lo tanto, la resistencia nominal por cortante es calculada con la ecuación 15

de la Tabla 27:

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_v$$

$$V_n = 0,6 F_y [(d - 2t_f)t_w] C_v$$

Para almas de miembros laminados de sección H que cumple con la siguiente condición:  $h/t_w \leq 2,24 \sqrt{E/F_y}$ ; se establece que  $C_v = 1$  y  $\phi_b = 1$  (ANSI/AISC 360, 2016, págs. 16.1-71):

$$V_n = 0,6 * 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * [(26,6 - 2 * 1,3)0,76] \text{cm}^2 * 1 = 38468,16 \text{ kgf}$$

$$\phi_v V_n = 1 * 38468,16 \text{ kgf} = 38468,16 \text{ kgf}$$

$$V_u = 1,2 \left( 44,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right) (3,4 \text{ m}) + 1,6 (3100) \text{ kg} = 5637,97 \text{ kgf}$$

$$V_u \leq \phi_b V_n$$

$$5637,97 \text{ kgf} < 38468,16 \text{ kgf}$$

Finalmente se revisa que la deformación en el eje sea menor a la deformación admisible establecida en la ecuación 8 (Bellei, 1998, pág. 163):

$$f_y = \frac{l}{600} = \frac{340}{600} = 0,57 \text{ cm} = 5 \text{ mm}$$

$$f_y = \frac{P_L \cdot l^3}{48 E I_x} = \frac{(1,6 * 3410 \text{ kgf}) (340 \text{ cm})^3}{48 \left( 2,10 \times 10^6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) (7076 \text{ cm}^4)} = 0,30 \text{ cm} = 3 \text{ mm}$$

Se realizó el análisis en el Programa Autodesk Inventor Professional para revisar la deformación del perfil seleccionado, utilizando los siguientes valores para la gravedad y fuerza que para el estudio debe ser expresada en Newtons:

$$P_u = 1,6 * 3410 \text{ kg} = 5456 \text{ kgf} = 53523,36 \text{ N}$$

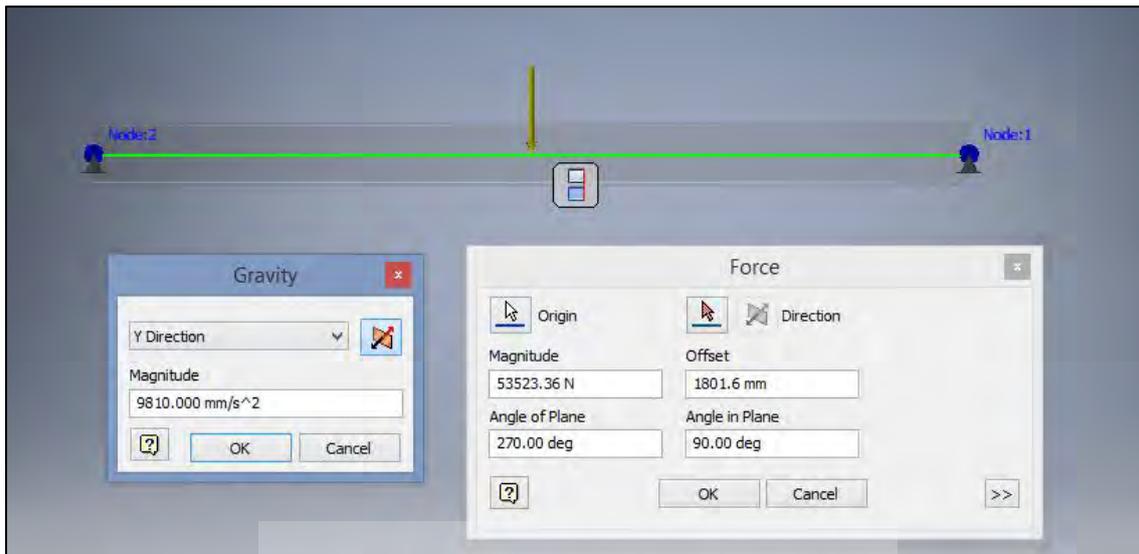


Figura 62. Valores de parámetros para análisis de viga de carga  
Fuente: Elaboración propia

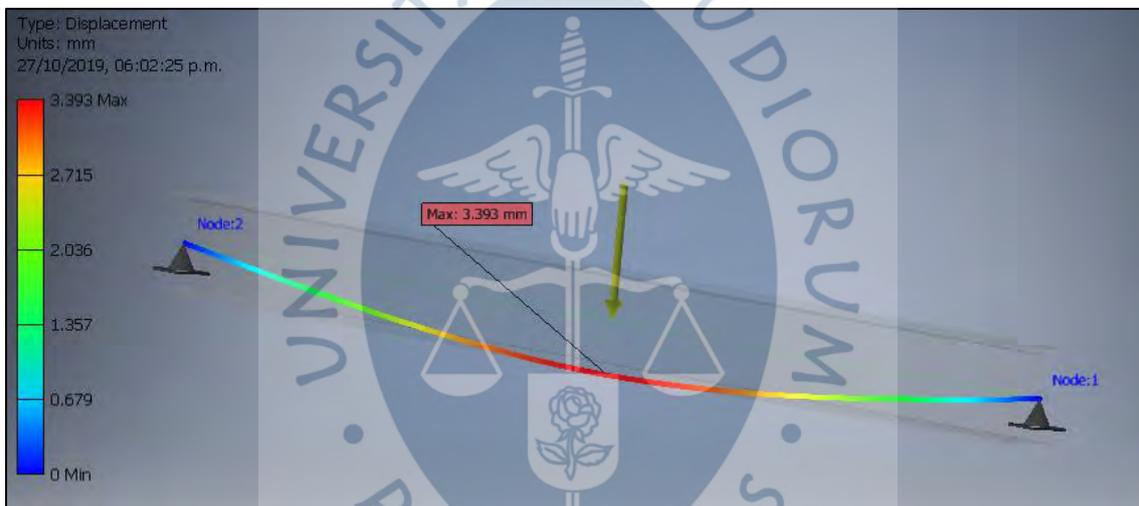


Figura 63. Máxima deformación de viga de carga

Fuente: Elaboración propia

Se verifica que el perfil seleccionado para la viga de soporte W10x30 cumple con los apartados anteriormente establecidos.

#### 4.3.3 Diseño de las vigas de soporte

Estas dos vigas de 3,2 m de longitud y fabricadas en acero ASTM A992, soportarán a la viga de carga juntamente con el electroimán. Para analizar las fuerzas que afectarán a estas vigas de soporte se procederá a evaluar el efecto generado por la viga que soporta al electroimán y el desplazamiento del electroimán a lo largo de esta.

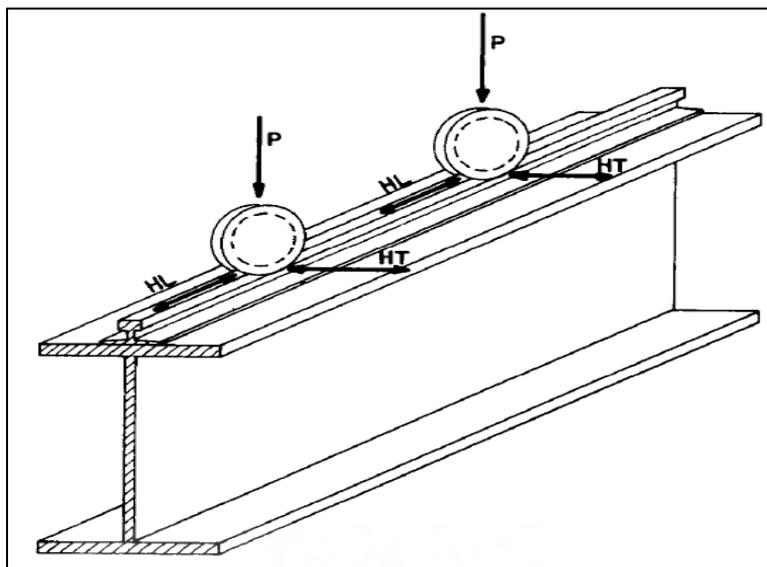


Figura 64. Fuerzas generadas en la viga que soporta el puente grúa  
Fuente: (Bellei, 1998, pág. 162)

La fuerza lateral nominal ( $H_T$ ) (Bellei, 1998, pág. 161) en la vía del puente grúa que se genera por el movimiento del polipasto no debe ser menor al 20% de la suma del peso izado y del peso del polipasto, no debe incluirse el peso de otras partes de la grúa (ver Figura 64). (Ministerio de Vivienda, 2006)

La fuerza longitudinal ( $H_L$ ) (Bellei, 1998, pág. 161) nominal tendrá un valor mínimo de 10% de las máximas cargas de rueda de la grúa aplicada en la parte alta del riel, a menos que se especifique otra cosa (ver Figura 64) (Ministerio de Vivienda, 2006). Para el presente diseño esta fuerza no tiene efecto ya que sobre las vigas de soporte no se generará ningún desplazamiento a lo largo de la misma.

Tabla 28. Cargas soportadas por viga de soporte

Cargas				
Descripción	Unidad	Cantidad	Peso unitario (kg/und)	Peso (kg)
Trolley para 3 toneladas	und	1	84,09	84,09
Grillete (A085619)	und	5	1,20	6,00
Eslabón maestro (MT-8-10)	und	1	3,00	3,00
Eslinga de cable de 16 mm	m	4	0,94	3,76
Gancho (OBK-13-10)	und	1	1,30	1,30
Carga suspendida	kg	1	3000,00	3000,00
Viga de soporte W10x30	m	3.4	44,60	151,64

Fuente: Elaboración propia

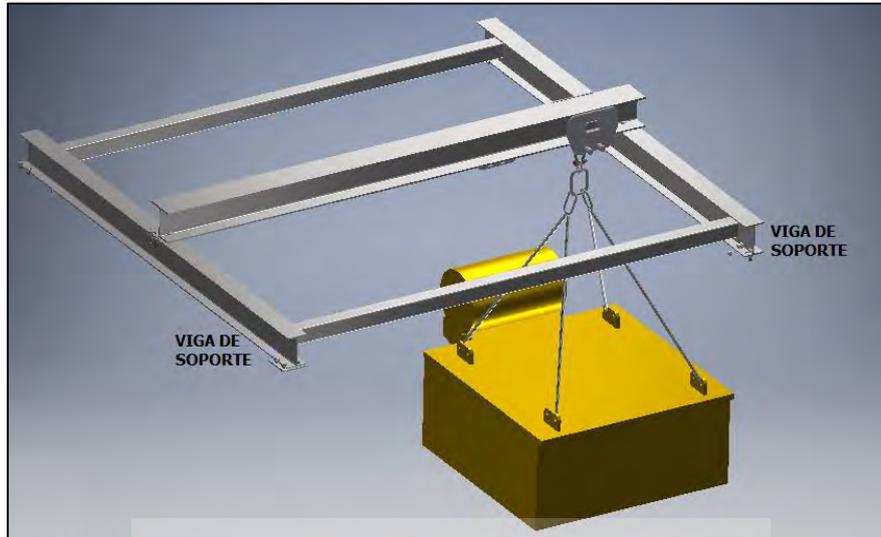


Figura 65. Vigas de soporte  
Fuente: Elaboración propia

El peso de las vigas de soporte inicialmente no será considerado dentro del análisis de la carga muerta hasta seleccionar el perfil adecuado y posteriormente verificarse los requerimientos solicitados de diseño, por lo tanto la carga muerta será la correspondiente al peso de la viga de carga W10x30 que recae sobre las vigas de soporte, estando sometida cada una a la siguiente carga muerta (ver Figura 65):

$$P_D = \frac{(151,64) \text{ kgf}}{2} = 75,82 \text{ kgf}$$

La carga viva está comprendida por el electroimán, accesorios y carro motorizado o también denominado *trolley*. Asimismo, se determina que la situación más crítica se dará cuando el electroimán suspendido se encuentre ubicado en los extremos de la viga de soporte, recayendo toda la carga viva sobre la viga de soporte (ver Figura 65). Teniendo en cuenta este análisis se procede a realizar la combinación de carga de acuerdo con el método LRFD, empleando la ecuación 2:

$$P_L = (1,1 L) = (1,1 * 3100 \text{ kg}) = 3410 \text{ kg}$$

$$P_u = 1,2 P_D + 1,6 P_L = 1,2 * 75,82 \text{ kg} + 1,6 * 3410 = 5547 \text{ kgf}$$

Se calcula el momento producido por la carga muerta y la carga viva respecto al eje y del perfil estructural seleccionado:

$$M_{uy} = \frac{1,2 * 75,82 \text{ kg} * 300 \text{ cm}}{4} + \frac{1,6 * 3100 \text{ kg} * 300 \text{ cm}}{4} = 378823,80 \text{ kgf. cm}$$

Para el análisis se considera la fuerza lateral nominal ( $H_T$ ) (Ministerio de Vivienda, 2006) y el momento producto de esta fuerza son calculados:

$$H_T = 0,2(\text{Peso del electroimán} + \text{carro de rodadura}) \quad (18)$$

$$H_T = 0,2 (3100) \text{ kgf} = 620 \text{ kgf}$$

$$M_H = \frac{H_T \cdot l}{4}$$

$$M_{ux} = 1,6M_H = 1,6 \left( \frac{620 \text{ KG} \times 300\text{CM}}{4} \right) = 74400 \text{ kgf. cm}$$

Se calcula el valor del módulo plástico reemplazando en la ecuación (8) para ambos ejes, para poder realizar una selección preliminar del perfil estructural:

$$Z_x = \frac{M_{uy}}{\phi \cdot F_y} = \frac{378823,80 \text{ kg. cm}}{0,9 \times 3515 \text{ kg/cm}^2} = 119,75 \text{ cm}^3$$

$$Z_y = \frac{M_{ux}}{\phi \cdot F_y} = \frac{74400 \text{ kg. cm}}{0,9 \times 3515 \text{ kg/cm}^2} = 23,52 \text{ cm}^3$$

Se establece que las deformaciones admisibles tanto de forma vertical como lateral serán  $l/600$  (Bellei, 1998, pág. 163) para los casos de vigas que tendrán carros rodantes o trolley, manteniendo así la ecuación (8) para la deformación admisible en el eje y y adicionando una nueva ecuación para el desplazamiento admisible en el eje x:

$$f_x = l/600 \quad (19)$$

Se calcula los momentos de inercia en cada eje respectivos reemplazando en la ecuación (9):

$$I_x = \frac{(1,6P_L) \cdot l^3}{48 E f_y} = \frac{(1,6 * 3410) \text{ kg} \times (300 \text{ cm})^3}{48 \times \left( 2,10 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \times \left( \frac{300}{600} \text{ cm} \right)} = 2922,86 \text{ cm}^4$$

$$I_y = \frac{(1,6H_L)l^3}{48 E f_x} = \frac{(1,6 * 620 \text{ kg}) \times (300 \text{ cm})^3}{48 \times \left( 2,10 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \times \left( \frac{300}{600} \text{ cm} \right)} = 531,43 \text{ cm}^4$$

Tabla 29. Dimensiones perfil W8x31

Designación	Dimensiones						Relaciones		Ag	Peso	X-X					Y-Y					J	Cw	
	d	bf	tf	hw*	tw	r*	bf 2tf	hw tw			lx	Sx	rx	Qx	Zx	ly	Sy	ry	Qy	1.5.Sy			Zy
	mm	mm	mm	mm	mm	mm					cm <sup>2</sup>	Kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm			cm <sup>3</sup>
W8x31	203	203	11,0	156	7,24	14,3	9,19	21,5	58,90	46,1	4579	451	8,81	249	498	1544	152	5,13	116	228	231	22,5	142324

Fuente: (Trogia & Trogia, 2005)

Se ha seleccionado el perfil W8x31 y se procede a verificar su análisis.

Tabla 30. Especificaciones de perfil W8x31

LOAD FACTOR DESIGN SELECTION TABLE For shapes used as beams $\phi_b = 0.90$											
$F_y = 36 \text{ ksi}$					$Z_x$	Shape	$F_y = 50 \text{ ksi}$				
BF	$L_r$	$L_p$	$\phi_b M_r$	$\phi_b M_p$			$\phi_b M_p$	$\phi_b M_r$	$L_p$	$L_r$	BF
Kips	Ft	Ft	Kip-ft	Kip-ft	in. <sup>3</sup>		Kip-ft	Kip-ft	Ft	Ft	Kips
1.21	32.0	8.4	53.6	82.1	30.4	W8x31	114	82.5	7.1	22.3	2.07

Fuente: (AISC, 1994)

Se verifica si el perfil estructural seleccionado es compacto partiendo de la Tabla 25 como referencia para obtener los valores de la Tabla 31:

Tabla 31. Razón límite ancho – espesor de perfil W8x31

Elemento	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Patín	9,19	9,31	24,50
Alma	21,5	92,10	139,62

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, se deduce que el perfil W8x31 seleccionado es una viga compacta. Dada esta condición, la resistencia nominal por momento  $M_n$  es la capacidad total por momento plástico  $M_p$  (ANSI/AISC 360, 2016):

$$M_p = F_y \cdot Z_x = 3515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 498 \text{ cm}^3 = 1750470 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$\phi_b \cdot M_p = 0,9 \times 1750470 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 1575423 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Se procede verificar la capacidad de momento de la viga W8x31

Distancia entre arriostramientos:  $L_b = 300 \text{ cm}$

El valor de la longitud límite sin arriostramiento lateral para el estado límite de fluencia  $L_p$  obtenido a partir de la ecuación (10) o directamente de la Tabla 30 considerando  $F_y = 50$  ksi:

$$L_p = 1,76 \left( \frac{5,13}{30,48} \text{ ft} \right) \sqrt{\frac{30 \times 10^3 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 7,1 \text{ ft} = 216,41 \text{ cm}$$

El valor de la longitud límite sin arriostramiento lateral para el estado límite de fluencia  $L_r$  obtenido a partir de la ecuación (11) o directamente de la Tabla 30 considerando  $F_y = 50$  ksi:

$$L_r = 22,3 \text{ ft} = 22,3 \times 30,48 \text{ cm} = 679,70 \text{ cm}$$

Se cumple que  $L_p < L_b < L_r$  por tanto el miembro se encuentra en la zona de pandeo inelástico y se procede a calcular la capacidad de momento  $\phi_b \cdot M_n$  con la siguiente ecuación (McCormac, 2002, pág. 259):

$$\phi_b \cdot M_{ny} = C_b \cdot [\phi_b M_p - BF(L_b - L_p)] \leq \phi_b M_p$$

$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{\max}}{2,5 \cdot M_{\max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$

$$C_b = 1,67$$

$$\phi_b \cdot M_{ny} = 1,67 \times \left[ 114 \text{ kip} \cdot \text{ft} - 2,07 \text{ kip} \times \left( \frac{300}{30,48} - 7,1 \right) \text{ ft} \right] = 180,90 \text{ kpi} \cdot \text{ft}$$

$$\phi_b M_{ny} = 180,9 \text{ kpi} \cdot \text{ft} = 2495923,538 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Se determina que  $\phi_b \cdot M_{ny} > \phi_b M_p$  ; por ello se usará una resistencia nominal de  $\phi_b M_{ny} = 1575423 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$

Se calcula la resistencia nominal  $\phi_b \cdot M_{nx}$  alrededor del eje débil que de acuerdo con la ecuación del momento nominal recomendada para este eje se expresa de la siguiente forma (AISC, 1994):

$$\phi_b \cdot M_{nx} = \phi_b \cdot F_y \cdot \frac{Z_y}{2} \quad (20)$$

$$\phi_b \cdot M_{nx} = \phi_b \cdot F_y \cdot \frac{Z_y}{2} = 0,9 * 3515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \frac{231 \text{ cm}^3}{2} = 365384,25 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$\phi_b \cdot M_{nx} = 365384,25 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Se debe verificar la condición para flexión asimétrica (McCormac, 2002, pág. 297)

$$\frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \leq 1 \quad (21)$$

$$\frac{378823,80 \text{ kgf. cm}}{1575423 \text{ kgf. cm}} + \frac{74400 \text{ kgf. cm}}{365384,25 \text{ kgf. cm}} = 0,44$$

El perfil W8x31 cumple con los requisitos para flexión asimétrica.

Conociendo que la viga a ser utilizada será la W8x31, se calcula el valor del momento último  $M_{uy}$  considerando el peso de la viga que será máximo justo en el punto medio de la longitud total. El resto de los parámetros permanece igual debido a que el peso de la viga sólo influye en  $M_{uy}$ .

$$M_{uy} = \frac{1,2 \times 26,8 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \times (3\text{m})^2}{8} + 3788,24 \text{ kgf. m} = 3850,48 \text{ kgf. m}$$

$$M_{uy} = 3850,48 \text{ kgf. m} = 385048 \text{ kgf. cm}$$

Se verifica nuevamente que el perfil cumple para la condición de flexión asimétrica considerando el peso propio de la viga (McCormac, 2002, pág. 297):

$$\frac{385048 \text{ kgf. cm}}{1575423 \text{ kgf. cm}} + \frac{74400 \text{ kgf. cm}}{365384,25 \text{ kgf. cm}} = 0,45$$

Se procederá a verificar la resistencia por cortante del perfil seleccionado (AISC, 1994, págs. 6-56)

$$V_u \leq \phi_b V_n$$

De acuerdo con lo indicado en la Tabla 27, se verifica que para el perfil W8x31 cumple con la siguiente relación:

$$\frac{h}{t_w} = 21,5 < \frac{418}{\sqrt{F_y}}$$

Por ello se procederá a calcular de la resistencia nominal por cortante según la ecuación (15) de mostrada en la misma Tabla 27:

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_v$$

$$V_n = 0,6 F_y [(d - 2t_f)t_w] C_v$$

Para almas de miembros laminados de sección H que cumple con la siguiente condición:  $h/t_w \leq 2,24 \sqrt{E/F_y}$ , se establece que  $C_v = 1$  y  $\phi_b = 1$  (ANSI/AISC 360, 2016, págs. 16.1-71) y se procede a emplear en la ecuación (14):

$$V_n = 0,6 * 3515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} [(20,3 - 2 * 1,1)0,724] \text{ cm}^2 * 1 = 27637,18 \text{ kgf}$$

$$\phi_b V_n = 1 * 27637,18 \text{ kgf} = 27637,18 \text{ kgf}$$

$$V_u = 1,2 [(46,1 \text{ kgf/m})(3 \text{ m}) + 78,4] + 1,6 (3100) \text{ kgf} = 5220,04 \text{ kgf}$$

$$V_u \leq \phi_b V_n$$

$$5220,04 \text{ kgf} < 27637,18 \text{ kgf}$$

La viga seleccionada W8x18 debe revisarse ante el pandeo lateral del alma (AISC, 1994, págs. 6-94), para ello es necesario determinar si se cumple la siguiente relación  $(h/t_w)/(L_b/b_f) \leq 1,7$  y verificar la ecuación:

$$R_n = \frac{C_r t_w^3 t_f}{h_w^2} \left[ 0,4 \left( \frac{h/t_w}{L_b/b_f} \right)^3 \right] \quad (22)$$

Se determina el valor de la relación

$$\frac{h/t_w}{L_b/b_f} = \frac{21,5}{3000/203} = 1,45$$

Dado que el valor de la relación es menor que 1,7 ; por tanto, debe revisarse la ecuación (22) ante el pandeo lateral del alma:

$$M_y = F_y \cdot Z_x$$

$$M_y = 3515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 498 \text{ cm}^3 = 1750470 \text{ kgf. cm}$$

$$M_{uy} < M_y$$

$$385048 \text{ kgf. cm} < 1750470 \text{ kgf. cm}$$

Dado que se cumple que  $M_{uy} < M_y$ , el valor de  $C_r$  es  $67,2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  (AISC, 1994, págs. 6-94) :

$$R_n = \frac{(67,2 \times 10^6) 0,724^3 \times 1,1}{15,6^2} [0,4(1,45)^3] = 140569,94 \text{ kgf}$$

Se procede a verificar la resistencia a estado límite del alma  $\phi_b \cdot R_n$  debe ser mayor a la resistencia requerida, o en todo caso esta deberá ser arriostrada (Bermei, 2015), se determina la siguiente condición:

$$R \leq \phi_b \cdot R_n$$

$$R = 1,2 \times [(46,1 \text{ kg/m})(3 \text{ m}) + 78,4] + 1,6 \times (3410) \text{ kg} = 5716,76 \text{ kgf}$$

$$R \leq \phi_b \cdot R_n$$

$$5716,76 \text{ kgf} < 140569,94 \text{ kgf}$$

La viga W8x31 no estará sometido a pandeo lateral del alma y la viga W8x31 cumple con todos los requerimientos.

Se realizó el análisis en el Programa Autodesk Inventor Professional para revisar la deformación del perfil seleccionado, utilizando los siguientes valores para la gravedad y fuerza que para el estudio debe ser expresada en Newtons:

$$P_u = 5547 \text{ kgf} = 54416,07 \text{ N}$$

$$H_T = 620 \text{ kgf} = 6082,2 \text{ N}$$

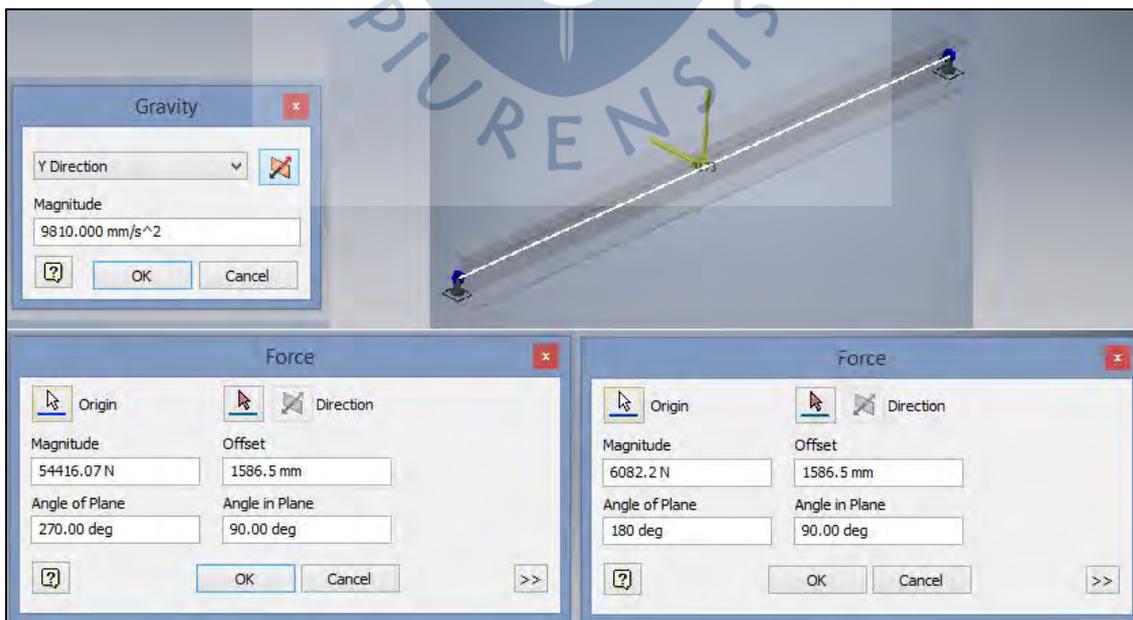


Figura 66. Valores de parámetros para análisis de viga de soporte  
Fuente: Elaboración propia



Figura 67. Máxima deformación de viga de soporte  
 Fuente: Elaboración propia

El valor de deformación máxima 3.9 mm sigue siendo inferior a los 5 mm por tanto se verifica que el perfil seleccionado cumple con las premisas planteadas anteriormente.

En el proceso de construcción colocarán dos perfiles tubulares cuadrado de 4"x 3/16" (100 mmx 4.76 mm) transversalmente a las vigas laterales a manera de arriostre para brindar una mayor estabilidad a la estructura (ver

Tabla 32).

Tabla 32. Dimensiones perfil W10x30

**B** = Ancho exterior  
**t** = Espesor de pared  
**R** = Radio de esquina exterior = 2,00 t  
**p** = Área exterior por metro lineal  
**A** = Sección bruta  
**g** = Peso por metro lineal  
**I** = Momento de Inercia  
**S** = Módulo elástico resistente  
**r** = Radio de giro  
**Z** = Módulo plástico  
**J** = Módulo de Torsión  
**C** = Constante torsional

B	t	p	Ag	g	Ix=Iy	Sx=Sy	rx=ry	Zx=Zy	J	C
[mm]	[mm]	[m <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> ]	[Kg/m]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]
100	3.20	0.39	12.13	9.52	187.17	37.43	3.93	43.70	289.03	59.84
	4.00	0.39	14.95	11.73	226.20	45.24	3.89	53.31	351.52	73.48
	4.76	0.38	17.55	13.78	260.58	52.12	3.85	61.98	407.25	85.94

Fuente: (Troglia & Troglia, 2005)

#### 4.3.4 Diseño de las columnas

Cuatro columnas serán las encargadas de soportar de todo el peso de la estructura juntamente con el resto de los elementos.

Para determinar la longitud que tendrán las columnas es necesario tener en cuenta la altura a la cual deberá estar suspendido el electroimán respecto de la faja transportadora. Para realizar la instalación se debe determinar el punto más alto de la trayectoria del material en la faja transportadora para establecer una separación de aproximadamente 50 mm de la cara del electroimán (ver Figura 68).

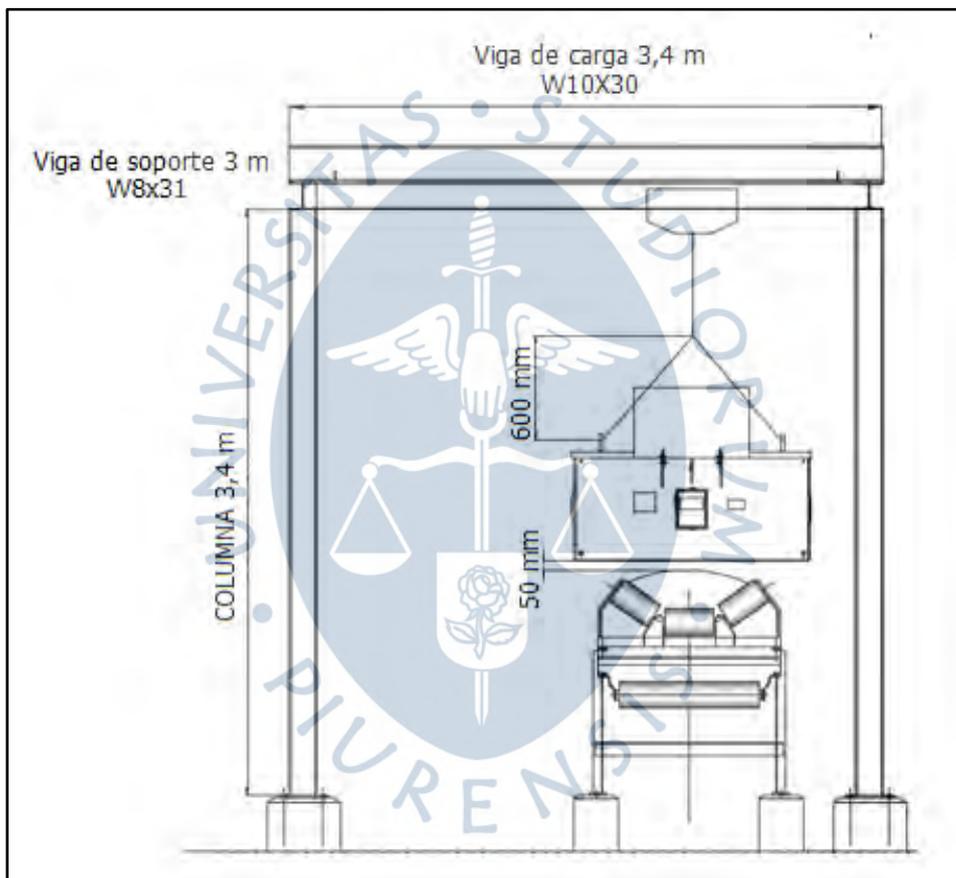


Figura 68. Diseño de estructura de soporte de electroimán  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Cargas soportadas por las columnas

Cargas				
Descripción	Unidad	Cantidad	Peso unitario (kg/und)	Peso (kg)
Trolley para 3 toneladas	und	1	84,09	84,09
Grillete (A085619)	und	5	1,20	6,00
Eslabón maestro (MT-8-10)	und	1	3,00	3,00
Eslinga de cable de 16 mm	m	4	0,94	3,76
Gancho (OBK-13-10)	und	1	1,30	1,30
Carga suspendida	kg	1	3000,00	3000,00
Viga de carga W10x30	m	3.4	44,60	151,64
Vigas de soporte W8x31	m	6	41,60	249,60
Perfil cuadrado 4"x 3/16"	m	6.4	13.78	90,60

Fuente: Elaboración propia

Se procede a realizar el cálculo de la combinación de carga de acuerdo con el método del LRFD:

$$P_u = 1,2 P_D + 1,6 P_L$$

$$P_u = 1,2 (151,64 + 249,60 + 90,6) \text{ kgf} + 1,6 \times [1,1 \times (3100)] \text{ kgf}$$

$$P_u = 6193,76 \text{ kgf}$$

Cada columna soportará una carga  $P_u/4 = 1548.44 \text{ kg}$  cuando la carga se encuentre centrada respecto a toda la estructura (ver Figura 69), pero en el caso más crítico la carga se encontrará en el extremo de la viga de carga (ver Figura 70 Figura 69), siendo la carga máxima a soportar:

$$\frac{P_u}{2} = 3096,88 \text{ kgf}$$

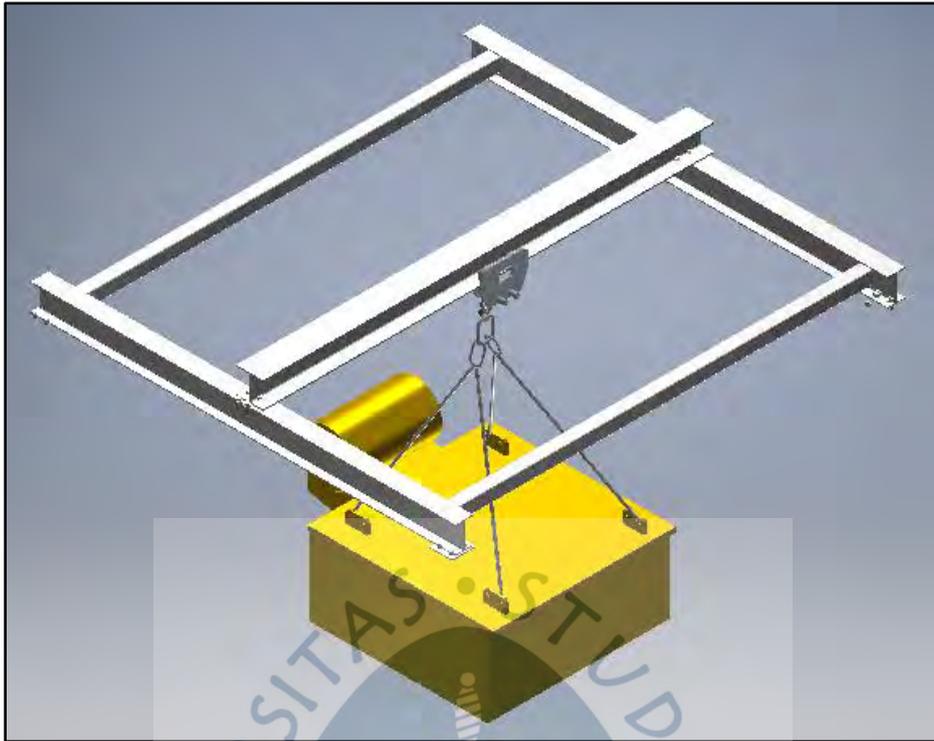


Figura 69. Electroimán ubicado en el centro de la viga de carga  
Fuente: Elaboración propia

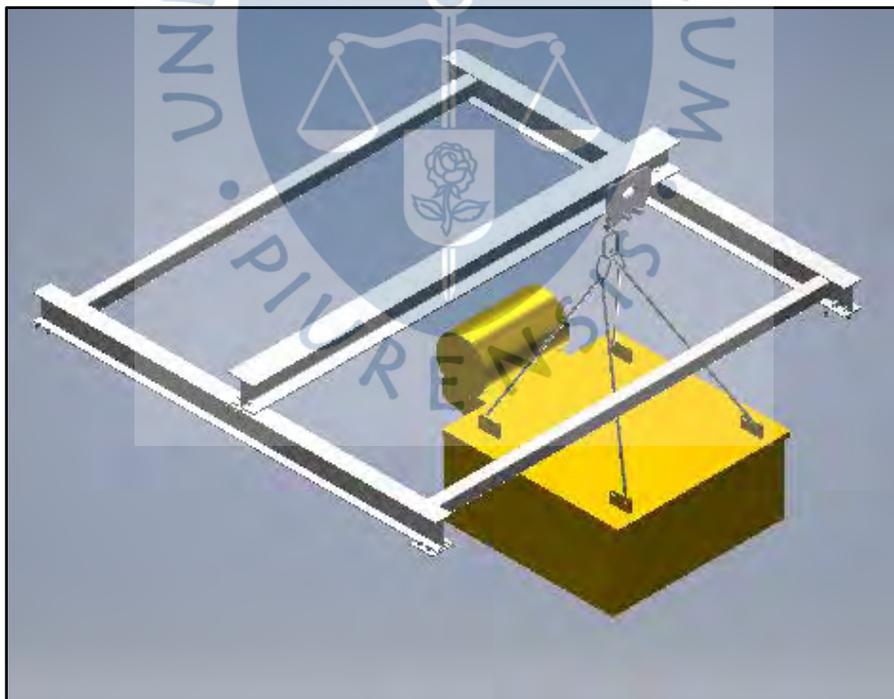


Figura 70. Electroimán ubicado en el extremo de la viga de carga  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Longitudes efectivas de columnas

Las líneas interrumpidas muestran la forma pandeada de la columna	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Valor K teórico	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valores recomendados de diseño cuando las condiciones reales son parecidas a las ideales	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Símbolos para las condiciones de extremo		Rotación y traslación impedidos				
		Rotación libre y traslación impedida				
		Rotación impedida y traslación libre				
		Rotación y traslación libres				

Fuente: (McCormac, 2002)

Se selecciona el perfil estructural W8x10 preliminarmente para ser evaluado como columnas y la resistencia de diseño del elemento puede determinarse (AISC, 1994):

$$P_u = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_g \tag{23}$$

Tabla 35. Dimensiones perfil W6x9

Designación	Dimensiones						Relaciones		Ag	Peso	X - X					Y - Y					J	
	d	bf	tf	hw*	tw	r*	bf/2tf	hw/tw			ix	Sx	rx	Qx	Zx	ly	Sy	ry	Qy	1.5.Sy		Zy
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			cm <sup>2</sup>	Kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	
W8x10	200	100	5,21	168	4,32	11,1	9,61	39,0	19,10	14,9	1282	128	8,18	72,7	145	87	17,4	2,14	13,6	26,1	27,2	1,66

Fuente: (Troglia & Troglia, 2005)

Se procede a realizar el cálculo de la relación de esbeltez (AISC, 1994, págs. 6-48) :

$$\frac{KL}{r_y}$$

$$KL = 1,2 \times 340 \text{ cm} = 408 \text{ cm}$$

$$r_y = 2,30 \text{ cm}$$

$$\frac{KL}{r_y} = \frac{408}{2,14} = 190,65$$

Tabla 36. Valores  $\phi_c F_{cr}$  respecto a relación de esbeltez

50 ksi Specified Yield Stress Steel, $\phi_c = 0.85^{[a]}$									
$\frac{Kl}{r}$	$\phi_c F_{cr}$ ksi	$\frac{Kl}{r}$	$\phi_c F_{cr}$ ksi	$\frac{Kl}{r}$	$\phi_c F_{cr}$ ksi	$\frac{Kl}{r}$	$\phi_c F_{cr}$ ksi	$\frac{Kl}{r}$	$\phi_c F_{cr}$ ksi
26	40.45	66	30.91	106	18.69	146	10.01	186	6.17
27	40.29	67	30.61	107	18.40	147	9.87	187	6.10
28	40.13	68	30.31	108	18.12	148	9.74	188	6.04
29	39.97	69	30.01	109	17.83	149	9.61	189	5.97
30	39.79	70	29.70	110	17.55	150	9.48	190	5.91
31	39.62	71	29.40	111	17.27	151	9.36	191	5.85
32	39.43	72	20.09	112	16.99	152	9.23	192	5.79
33	39.25	73	28.79	113	16.71	153	9.11	193	5.73
34	39.06	74	28.48	114	16.42	154	9.00	194	5.67
35	38.86	75	28.17	115	16.13	155	8.88	195	5.61

Fuente: (AISC, 1994, págs. 6-148)

De acuerdo con la Tabla 36 corresponde un valor para la resistencia de diseño  $\phi_c \cdot F_{cr}$  de 5,81 ksi equivalente a 0,41 t/cm<sup>2</sup>.

Se verifica que la resistencia de diseño sea mayor respecto de la carga a la que se encuentra sometida la columna (AISC, 1994, págs. 6-47):

$$P_u = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_g$$

$$P_u = 0,41 \frac{\text{t}}{\text{cm}^2} \times 19,10 \text{ cm}^2 = 7,83 \text{ t}$$

$$3,10 \text{ t} < 7,83 \text{ t}$$

El perfil W8x10 para ser empleado como columnas cumple con los requerimientos ante pandeo.

Se realizó el análisis en el Programa Autodesk Inventor Professional para revisar la deformación del perfil seleccionado y el factor de seguridad del elemento de estudio utilizando los siguientes valores para la gravedad y carga aplicada expresada en Newtons:

$$\frac{P_u}{2} = 3096,88 \text{ kgf} = 30380.4 \text{ N}$$

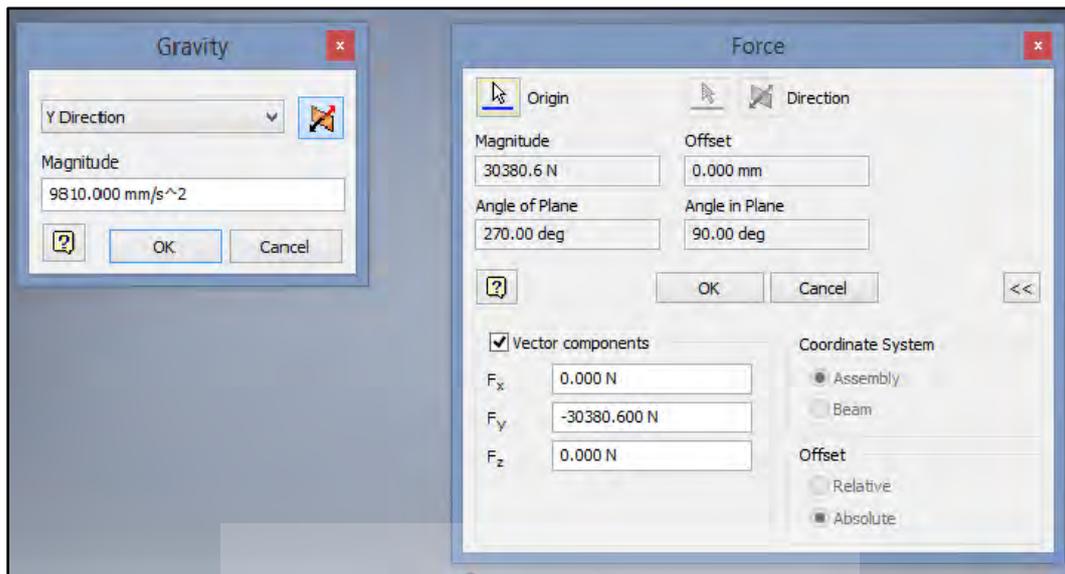


Figura 71. Valores de parámetros para análisis de columna  
Fuente: Elaboración propia

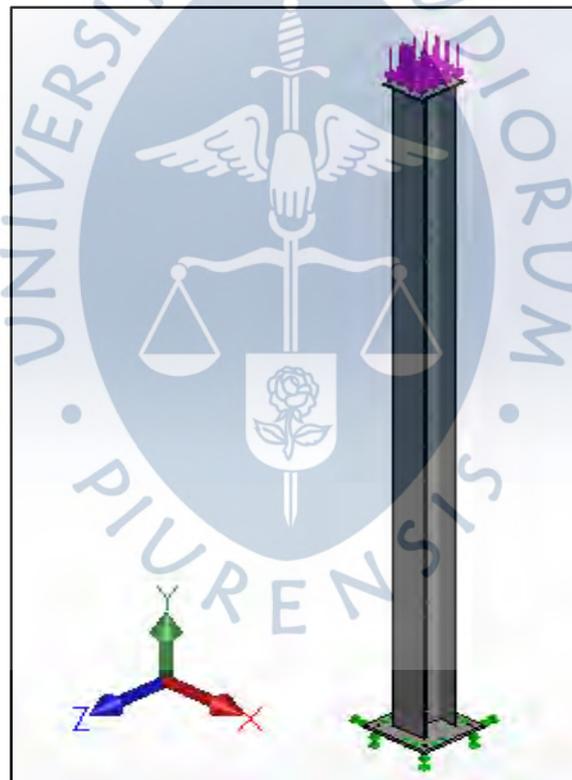


Figura 72. Evaluación de columna  
Fuente: Elaboración propia

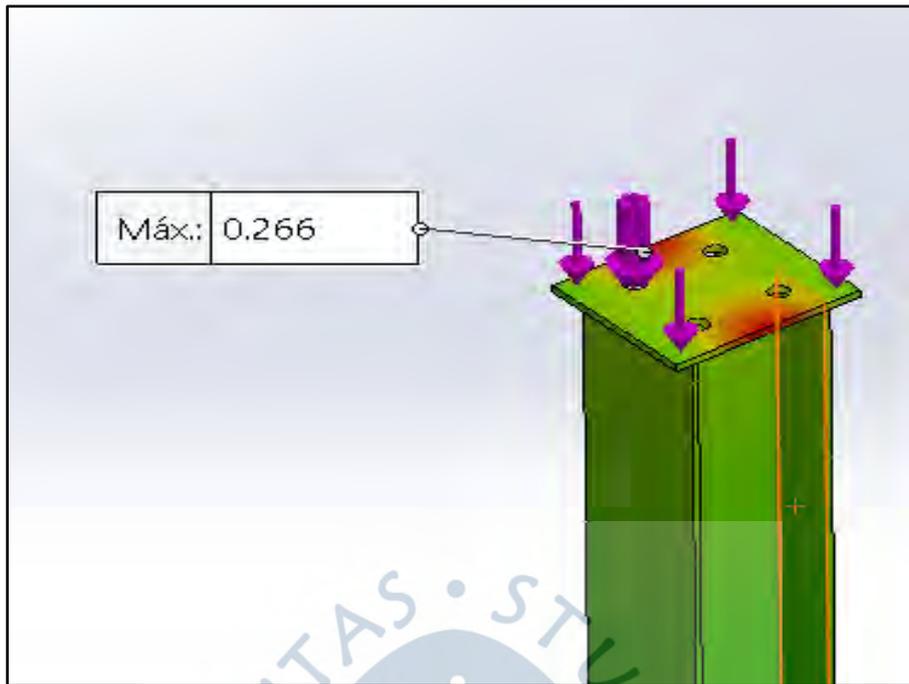


Figura 73. Máxima deformación (mm) presente en la placa de unión entre columna y viga  
Fuente: Elaboración propia

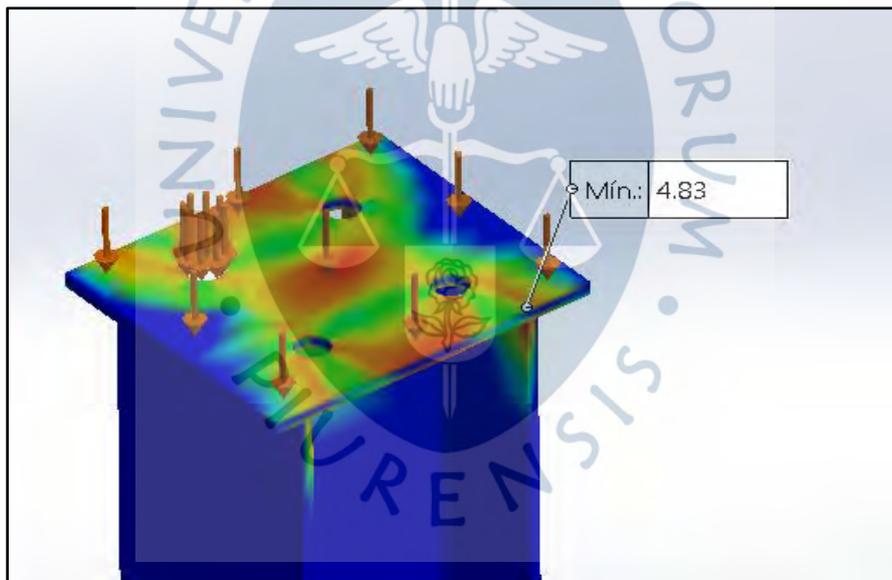


Figura 74. Mínimo factor de seguridad presente en la placa de unión entre columna y viga  
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en el software Autodesk Inventor Professional bajo las condiciones de carga en la columna muestran que la máxima deformación y el mínimo factor de seguridad se presentan en la placa de unión entre la columna y las vigas, siendo los valores respectivos 0.3 mm y 4.8 aproximadamente tal como se muestra en la Figura 73 y Figura 74.

#### 4.3.5 Diseño de uniones

En el diseño propuesto para la estructura de soporte del electroimán se presenta la unión entre la viga de carga soportada por las dos vigas de soporte correspondiendo a la unión 1 tal como se muestra en la Figura 75 y la unión entre las vigas de soporte con las columnas, correspondiendo a la unión 2

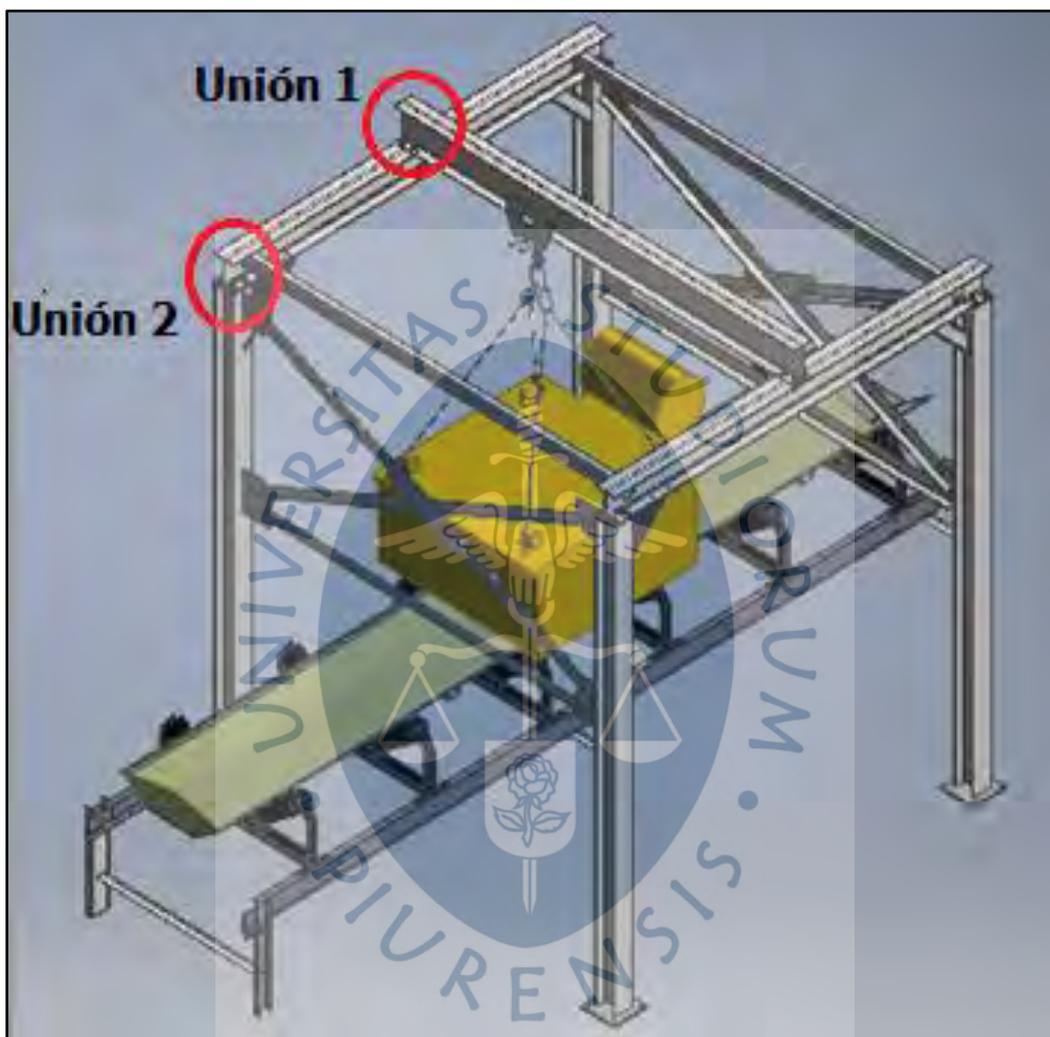


Figura 75. Estructura de soporte de electroimán  
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo propuesto en el diseño de la estructura, tanto para la unión 1 como 2 la conexión es tipo aplastamiento, empleando pernos ASTM A325 de alta resistencia con tuerca y arandela.

Tabla 37. Especificaciones de unión roscada

Datos de conexión	Especificaciones
Tipo de perno	ASTM A325 (Hilo incluido en plano de corte)
Tipo de unión	Tipo aplastamiento
Diámetro	5/8 "

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la combinación de cargas especificada en el método del LRFD teniendo en cuenta las cargas a ser consideradas de la Tabla 33:

$$P_u = 1,2 \cdot D + 1,6 \cdot L$$

$$P_u = 1,2 \times \left( \frac{151,64}{2} + \frac{249,60}{2} + \frac{90,6}{2} \right) \text{ kg} + 1,6 \times [1,1 \times (3100)] \text{ kg} = 5751,104 \text{ kg}$$

Calculando mínimo número de pernos:

Tabla 38. Resistencia de diseño de sujetadores

Design Strength of Fasteners				
Description of Fasteners	Tensile Strength		Shear Strength in Bearing-type Connections	
	Resistance Factor $\phi$	Nominal Strength, ksi	Resistance Factor $\phi$	Nominal Strength, ksi
A307 bolts		45 [a]		24 [b,e]
A325 bolts, when threads are not excluded from shear planes	0.75	90 [d]		48 [e]
A325 bolts, when threads are excluded from shear planes		90 [d]		60 [e]

Fuente: (AISC, 1994, págs. 6-81)

De acuerdo con la Tabla 38 se indican las siguientes consideraciones:

Factor de resistencia (AISC, 1994, págs. 6-83):  $\phi = 0.75$

La resistencia nominal a tracción:  $F_n = 90 \text{ ksi} = 6327,9 \text{ kg/cm}^2$

Área del perno:  $A_b = \pi \times (d/4)^2 = 1,98 \text{ cm}^2$

Calculando la resistencia nominal del perno (AISC, 1994, págs. 6-83) :

$$\phi R_n = \phi \times A_b \times F_n = 9381,98 \text{ kg}$$

De acuerdo con el diseño se ha considerado 4 pernos ser verifica que:

$$\phi R_t = 4 \times 9381,98 \text{ kg} = 37527,92 \text{ kg}$$

Para cuatro pernos considerados en el diseño, se cumple con los requerimientos ante la carga solicitada.

$$5751,104 \text{ kg} < 37527,92 \text{ kgf}$$

Para las conexiones se emplearán 4 pernos de 5/8" ASTM A325 en la conexión entre de las uniones 1 y 2.





## Capítulo 5

### Implementación del sistema de retiro de residuos metálicos

El sistema de retiro de residuos metálicos es un proyecto que busca mejorar la condición en la que el mineral seco es transportado a medida que va pasando por los diferentes puntos de transferencia, desde la salida de los secadores hasta el embarque final.

Este sistema propuesto es una solución ante una problemática que se vienen presentando en la planta de secado con respecto a la generación acelerada de residuos metálicos que es depositada en el concentrado de mineral seco y se busca que el impacto se vea reflejado en la operación, mantenimiento y seguridad y medio ambiente.

#### 5.1 Operación

En el proceso de la operación en la planta de secado el impacto se verá evidenciado principalmente sobre la disminución en el número de paradas ocasionadas por atoros de piezas metálicas en los puntos de transferencia principalmente que actualmente conllevan a realizar trabajos correctivos por el área de mantenimiento.

El flujo de mineral que circula sobre la faja transportadora es aproximadamente 500 t/h y juntamente con este flujo se presentan piezas metálicas provenientes de la corrosión acelerada originada al interior de los secadores que contaminan el concentrado seco que ocasionan problemas en equipos y en los puntos de transferencia. Durante el traslado del mineral seco a la salida de los secadores rotatorios se busca eliminar cualquier interrupción ocasionado por acumulación de restos metálicos en la parte inferior del elevador de cangilones favoreciendo el llenado de los dos silos de almacenamiento.

Una operación de llenado con mineral fosfato seco continua en los silos y una mayor disponibilidad de la faja transportadora y elevador de cangilones asegura que durante el funcionamiento de los tambores secadores se mantenga un ingreso constante de material

húmedo permitiendo que el calor producido al interior de estos, por el proceso de combustión, no sea desperdiciado por paradas imprevistas logrando un sistema más eficiente y económico.

El producto final seco de mineral estará libre de la presencia de residuos metálicos dado que el electroimán estará en funcionamiento durante el transporte del concentrado sobre la faja transportadora, reduciendo el derrame de material en los puntos de transferencia por acumulación de mineral.

La implementación de la separación magnética ubicada en la salida de los tambores secadores también favorecerá a que el producto final descargado dentro de las bodegas de los barcos de carga presente un mínimo de partículas de metálicas reduciendo los elementos contaminantes presentes en el concentrado seco.

## **5.2 Mantenimiento**

De acuerdo al plan de mantenimiento de la planta de secado, están establecidas dos paradas totales programados para realizar el mantenimiento preventivo y correctivo de todos los elementos y equipos como fajas transportadoras, chutes de transferencia, filtros de mangas, elevador de cangilones y sobre todo los tambores secadores, que es justamente donde se llevan a cabo trabajos para realizar el retiro y reposición de los elevadores, limpieza de la rejilla del tambor rotatorio y el reemplazar las chapas metálicas del casco del tambor que se encuentran desgastadas.

A pesar de estas dos paradas programadas durante el año se presentan paradas de emergencia por causa de acumulación de residuos metálicos tales como el atoro en la parte inferior en el elevador de cangilones que impide que el material puede ser trasladado a la parte superior para su posterior almacenamiento de los silos. Esta situación provoca que se detenga el ingreso de mineral húmedo a los tambores secadores y tenga que detenerse la faja transportadora que transporta el mineral seco. También se han detectado casos de daños en la faja transportadora que ocasionan la detención de la operación y por lo tanto se tenga que efectuar una parada no programada perdiendo miles de dólares por hora.

La implementación del sistema propuesto reducirá la cantidad de piezas metálicas que puedan llegar hasta esta zona del elevador evitando atascamientos, eliminando paradas imprevistas y asegurando la continuidad del proceso. Esto favorecerá a establecer un correcto mantenimiento preventivo ya que se minimiza el peligro de cortes repentinos en las fibras de la faja que conducen a acciones correctivas no contempladas en la planificación elevando el costo de las reparaciones. Esto no indica que después de ser implementado el sistema de retiro

propuesto que no se deba de prestar atención a este activo ya que es importante establecer un control permanente sobre el estado de la faja y verificarse en alguna parada de mantenimiento.

Estos restos metálicos provenientes del interior de los tambores secadores también constituyen un foco de estudio dado que son muestras que deben ser analizadas en un laboratorio para entender el desgaste prematuro de los elevadores por ello se deben seleccionar piezas para realizarle ensayos mecánicos, físicos y químicos.

### **5.3 Seguridad y Medio ambiente**

La extracción de los residuos metálicos realizada por el sistema propuesto permite focalizar la recolección de estos elementos en un determinado lugar a lo largo de la faja transportadora facilitando las labores de limpieza y mantenimiento. Esto permitirá que el riesgo disminuya en la ejecución de los trabajos relacionados a atoros producidos en equipos involucrados en el proceso, que actualmente se encuentran afectados por la acumulación de piezas metálicas.

Estos residuos metálicos extraídos por el electroimán suspendido son del tipo no peligrosos los cuales son residuos generados en instalaciones o por procesos industriales que no presentan características de peligrosidad, conforme a la normatividad ambiental vigente (Norma Técnica Peruana NTP 900.058, 2005).

La limpieza del electroimán suspendido del sistema de retiro de residuos metálicos ha sido contemplada para que el operador pueda realizar esta actividad mediante la activación del carro de rodadura motorizado y desenergizando el electroimán suspendido sobre un contenedor ya determinado.

Los residuos metálicos que son transportados juntamente con el mineral seco estarán dispuestos en un contenedor de dimensiones 1 m x 1 m x 0.8 m sobre un palé para que el retiro de este contenedor sea mediante el uso de un montacarga, y que de acuerdo con el código de colores para residuos sólidos (Norma Técnica Peruana NTP 900.058, 2005) será de color amarillo.

Una vez acumulados los residuos metálicos provenientes del extractor de metales se procederá a trasladar este cargamento en un área determinada dentro de la zona de acopio de chatarra respetando así el plan de gestión de residuos. Además, esto permitirá dar un panorama más claro de la situación en la que los componentes internos del tambor secador se encuentran teniendo en cuenta la cantidad y el estado en se encuentran las piezas y tomar acciones por las áreas de ingeniería y mantenimiento.

El plan de gestión integral de residuos sólidos de la empresa se establece a disponer una zona de acopio de materiales en las condiciones correctas de higiene y seguridad de los materiales sólo extraídos de los tambores secadores para clasificar, cuantificar y valorizar las pérdidas materiales establecidos en un periodo determinado para llevar un control y registro ordenado dentro del actual acopio de residuos existente en planta.

Desde el punto de vista ambiental los puntos de transferencia a lo largo del transporte del mineral experimentarán una reducción significativa en la cantidad de atoros por causa de los residuos metálicos. El sistema de extracción de residuos metálicos mitigará de forma indirecta los atoros disminuyendo la cantidad mineral derramado sobre el suelo, esto favorecerá a eliminar la polución originada por el derrame de fosfato seco.

Los residuos metálicos retirados por el electroimán serán extraídos sobre un punto definido a lo largo de la faja transportadora permitiendo realizar un mejor acopio preliminar de restos metálicos, convirtiéndose esta zona como el inicio de un manejo ordenado y seguro de residuos.

#### **5.4 Costos de implementación**

La implementación de un sistema de retiro de residuos metálicos implica poder destinar recursos económicos para llevar a cabo esta solución ante la problemática anteriormente detallada. En la Tabla 39 se detallan los costos que tendrán que ser asumidos por parte de la empresa para adquirir los elementos y equipos, propios del sistema de retiro de residuos metálicos, y en la Tabla 40 se indica el costo de la mano de obras y equipos necesarios que se emplearán en las etapas de fabricación e instalación.

Tabla 39. Recursos para elementos del sistema

Costo de materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Peso unitario (kg/und)	Peso (kg)	Precio (\$)
Trolley para 3 toneladas	und	1	84,09	84,09	1000
Grillete	und	5	1,20	6,00	25
Eslabón	und	2	1,80	3,60	15
Eslinga de cable de acero 16 mm	m	4	0,94	3,76	15
Gancho	und	1	1,30	1,30	25
Electroimán	und	1	2683,00	2683,00	8000
Viga de carga W10x30	m	3.4	44,60	151,64	100
Vigas de soporte W8x31	m	6	41,60	249,60	170
Perfil cuadrado 4"x 3/16"	m	6.4	13,78	90,60	60
Soldadura y pernería	und	1			800
Obras civiles	und	1			2000
Trabajos eléctricos	und	1			1000
TOTAL (USD)					13210

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Recursos para fabricación e instalación

Costo de montaje e instalación					
Personal					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario(\$/días)	Días de trabajo	Precio (\$)
Capataz	H	1	50	4	200
Soldadores	H	1	80	4	320
Operarios	H	2	30	4	240
Total, en personal (USD)					760

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Recursos para instalación

Costo de montaje e instalación					
Equipos y herramientas					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario(\$/días)	Días de trabajo	Precio (\$)
Camión Hiab de 10 toneladas	und	1	300	1	300
Montacarga	und	1	150	1	150
Herramientas manuales y de poder	und	1	30	1	50
Total, en equipos (USD)					500
Total (USD)					1250

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en las tablas 39; 40 y 41 el activo que implica un costo mayor es el electroimán el cual es el equipo principal teniendo un costo elevado respecto al resto de elementos. Si bien el costo de instalación de este sistema implica una inversión aproximadamente de 15 mil dólares, se debe realizar una comparación con los costos ocasionados por paradas no contempladas que impactan sobre la producción, equipos, seguridad y medio ambiente.

El sistema debe ser entendido tanto como una solución frente a los materiales contaminantes presente el concentrado seco y como un sistema que favorezca la planificación de trabajos enfocados hacia un mantenimiento preventivo que logre una mayor confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de los equipos que actualmente se ven afectados.

La inversión de implementar un sistema que ayude a reducir intervenciones no planificadas es relativamente muy baja respecto a tener una parada de una hora de ocasionada por algún daño en los sistemas de transporte de mineral dentro la planta de secado representando un valor aproximado de 250000 dólares.

## Conclusiones

A nivel mundial la industria de los fosfatos está basada en la explotación de algunos depósitos de rocas fosfóricas obtenidos principalmente de sedimentos marinos y se estima que los recursos mundiales de fosfato de roca son más de 300 mil millones de toneladas (Jasinski, Phosphate Rock , 2018), siendo esta actividad extractiva una de las 3 primeras actividades extractiva de minerales industriales a nivel nacional.

Como se ha precisado, los yacimientos de roca fosfórica ubicados en el departamento de Piura, al norte de Perú, son considerados como uno de los grandes complejos mineros de minerales no metálicos a nivel mundial, en donde se realiza la extracción y el procesamiento para obtener el concentrado de mineral.

Para la obtención del concentrado seco de mineral es necesario realizar un proceso de secado que es llevado a cabo en los tambores secadores, los cuales operan con el mineral concentrado de fosfato, el cual es un mineral altamente abrasivo que juntamente con las condiciones al interior de este equipo se genera corrosión acelerada de los materiales de los que están fabricados los elevadores y chaquetas metálicas que refuerzan al interior del tambor rotatorio que ocasionado gran desprendimiento de retazos de metálicos que son depositados en la línea de proceso que transporta el material seco para la descarga de mineral.

El sistema de retiro de residuos metálicos tiene como finalidad extraer las piezas metálicas que logran pasar la rejilla metálica ubicada en la salida de los tambores secadores y que son transportados aguas abajo. Esto con la finalidad de reducir los daños en equipos o sistemas como fajas transportadoras, elevador de cangilones y chutes de descarga.

El mantener el concentrado de mineral seco libre de residuos metálicos después del proceso de secado es una condición para asegurar que el resto de posteriores procesos funcionen

correctamente, es por ello por lo que al implementar esta solución se pretende asegurar la operatividad del resto de etapas.

Si bien la causa raíz del problema de la generación de los residuos metálicos está relacionado con la ingeniería por parte del fabricante de los tambores secadores, es fundamental aplicar soluciones que permitan el correcto funcionamiento del proceso para asegurar las cantidades de toneladas de mineral para el almacenamiento y exportación.

La relación costo beneficio de la solución propuesta ante la problemática es muy favorable lo cual hace viable su puesta en marcha. Estos separadores magnéticos son comúnmente empleados en productos a granel o en concentrados seco de mineral, asegurando la calidad del producto final.

La operación del sistema de retiro de residuos sólidos estará integrada al funcionamiento de la planta de secado juntamente con el funcionamiento de la faja transportadora sobre la cual será instalada y deberá estar monitoreada para seguir extrayendo datos fundamentales que servirán para el estudio de los tambores secadores como los ratios de generación de residuos.

El impacto se verá evidenciado significativamente en la eliminación de las paradas de emergencia que se venían originando en el elevador de cangilones debido a la acumulación de piezas metálicas que se depositaban en la parte inferior de este equipo, en la que se impedía que el material sea llevado y depositado en los dos silos de almacenamiento de mineral.

La ubicación de cualquier nueva instalación e implementación de un sistema dentro de una planta deberá estar planteada y definida por áreas de Ingeniería, Mantenimiento y Seguridad para identificar posibles interferencias con otros equipos e instalaciones, funcionamiento, espacio y facilidad para operación y funcionamiento.

El diseño del sistema de retiro de residuos metálicos propuesto permite que la limpieza del separador magnético no impacte con la operación de otro equipo. Ha sido diseñado para que sea operado de forma que el electroimán pueda desplazarse a lo largo de una viga de 3.4 m de longitud hasta depositar las piezas metálicas en un contenedor establecido para residuos metálicos mediante el movimiento de un carro de rodadura motorizado. Esto asegura que el encargado de realizar la limpieza esté distanciado de la faja transportadora en movimiento al menos 3.4 m y evitar asimismo cualquier riesgo de atrapamiento.

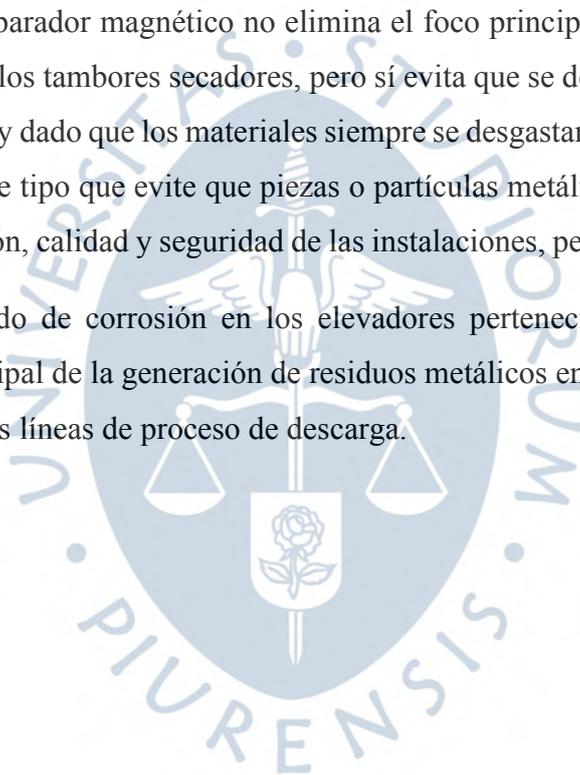
Las cargas para el diseño de la estructura metálica han sido evaluadas con los factores de carga establecidos en el LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) y respetando lo establecido en

Reglamento Nacional de Edificaciones, permitiendo seguir una metodología que asegure un correcto diseño, así como el uso fórmulas y tablas de propiedades de los perfiles estructurales comerciales.

Existen diferentes tipos de separados magnéticos que, de acuerdo con la aplicación requerida, condiciones de trabajo y al tipo de manejo de material son seleccionados e insertados en líneas de transporte para lograr un producto libre partículas o residuos metálicos. Los electroimanes suspendidos cumplen con estas funciones y son usualmente empleados en plantas de mineras no metálicas e industrias de alimentos a granel para extraer cualquier pieza metálica que se encuentre presente en dentro del flujo del producto.

La instalación de un separador magnético no elimina el foco principal de la problemática que se origina al interior de los tambores secadores, pero sí evita que se den problemas aguas abajo en las líneas de proceso y dado que los materiales siempre se desgastan es imprescindible contar con un separador de este tipo que evite que piezas o partículas metálicas ocasionen problemas que afecten la producción, calidad y seguridad de las instalaciones, personas y medio ambiente.

El problema evidenciado de corrosión en los elevadores pertenecientes al tambor secador constituye el foco principal de la generación de residuos metálicos en producto de mineral y el causante de atoros en las líneas de proceso de descarga.





### **Recomendaciones**

1. Elaborar un procedimiento de trabajo donde se establezcan los lineamientos, directivas y recomendaciones que aseguren y garanticen que los equipos, herramientas y materiales cumplan con los estándares, mantenimiento y medidas de seguridad en el que se regulen los trabajos a realizarse y sea estandarizado para que se eliminen los actos y condiciones subestándar e inseguras que puedan ocasionar daños a los equipos, personas, instalaciones y medio ambiente, el cual debe ser difundido a las partes correspondientes e interesadas.
2. Capacitar al personal que estará a cargo de trabajos de supervisión, operación y mantenimiento de los equipos que conforman el sistema de retiro de residuos metálicos por parte del fabricante del separador magnético.
3. Llevar a cabo de manera organizada la inspección de los trabajos juntamente con las áreas de Mantenimiento, Seguridad y Calidad, así como asegurar la correcta y oportuna elaboración y firma de los protocolos vigentes establecidos por la empresa.
4. Realizar un monitoreo de la cantidad de residuos que son extraídos del producto seco para llevar un control mensual e identificar una tendencia que permita realizar la reposición de los elevadores en los tambores secadores y así ejecutar un plan de acción en el mantenimiento de los secadores.
5. Realizar un estudio integral de ingeniería a los tambores secadores, debido a que el proceso de corrosión acelerada en los elevadores, que se encuentran al interior de estos, reduce la vida útil de estos componentes considerablemente y con ello se genera una mayor cantidad de residuos metálicos.



### Referencias Bibliográficas

- Aguirre Cruz, A. (2012). Diseño de un Elevador de Cangilones para un Sistema de Recirculación de Arena de Moldeo con Capacidad de 50ton/Día. (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- AISC. (1994). Load & Resistance Factor Design (Second Edition ed.). United State: American Institute of Steel Construction, Inc.
- Alcalde San Miguel, P. (2011). Electrotecnia (Primera Edición ed.). Madrid, España: Paraninfo, SA.
- AMP. (2017). Advanced Mineral Processing, S.L. Obtenido de <http://www.ampmineral.com/equipos/hidrociclones.php>
- ANSI/AISC 360. (2016). Specification for Structural Steel Buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- Bellei, I. H. (1998). Edifícios Industriais Projeto e cálculo em Aço. Brasil: Pini Ltda.
- Bermei, J. S. (2015). Diseño de un Puente Grúa con Vigas Laminadas para un Galpón de una Planta Metalmeccánica en Operación. (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Bilurbina Alter, L., Liesa Mestres, F., & Iribarren Laco, J. (2003). Corrosión y protección. Barcelona, España: Edicions UPC.
- Boylestad, R. L. (2004). Introducción al análisis de los circuitos (Décima Edición ed.). Mexico: Pearson.
- Bustamante, J. Z. (2016). Cálculo de pérdidas en el diseño del núcleo de un transformador de distribución aplicando el método de los elementos finitos. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

- Bustamante, O., Gaviria, A., & Restrepo, O. (2008). Concentración de Minerales. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de minerales CIMEX, Medellín.
- C.Rolle, K. (2006). Termodinámica (Sexta edición ed.). (V. González, Trad.) Mexico: Pearson Education.
- Cabrera, D. I. (2013). Efectos del flujo turbulento en la corrosión de soldaduras de aceros de alta resistencia. (Tesis de maestría). Universidad Veracruzana, Veracruz, Mexico.
- Calamit España. (2012). Imanes permanentes e imanes. Obtenido de Barras magnéticas: <http://www.calamit.es/separacion-magnetica/barras/barras-magneticas.php>
- Canet Miguel, C., & Campubí i Cano, A. (2006). Los yamientos minerales: Los tesoros de la tierra (Primera Edición ed.). México: Fondo de cultura economía.
- Carolina Material Technologies. (s.f.). Bulk material handling solutions. Obtenido de Suspended Overhead Magnets: <https://www.cmtnc.com/COMPONENTS/Industrial-and-Heavy-Duty-Magn/Permanent-and-Electromagnet-Su/permanent-and-electromagnet-suspended-magnets.html>
- Castaño, F., Rubio, F., & Ortega, M. (2009). Modelado de Secaderos Rotarorios en Isocorriente. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 17(2), 32-43.
- Columbus McKinnon Corporation. (2017). Specifications for Hoists and Trolleys. Obtenido de <https://www.cmworks.com>
- Comisión Europea. (2000). Ejemplos de buenas prácticas de compostaje y recogida selectiva de residuos. Belgium, Belgium: Comunidades Europeas.
- Díaz , A., Arbulu, R., & Arbulu, J. (2000). Separadores mecanico de partículas en gases. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Ingeniería Abiental, Lambayeque.
- Dings. (2014). Separadores Magnéticos. Obtenido de [http://www.dingsmagnets.com/magnet-literature/magnets-catalog-heavy\\_ES.pdf](http://www.dingsmagnets.com/magnet-literature/magnets-catalog-heavy_ES.pdf)
- Dings. (06 de Julio de 2016). Manual de instalación y mantenimiento de Electroiman suspendido autolimpiante para uso intensivo Dings. 21. Dings magnetic group. Obtenido de <http://www.dingsmagnets.com/magnet-literature/Electro-Overhead-Self-Cleaning-CR-SPANISH.pdf>

- Direct Industry. (2018). Eslinga de cable. Obtenido de <http://www.directindustry.es>
- Direct Industry. (s.f.). Vecoplan. Obtenido de Criba de tambor: <http://www.directindustry.es/prod/vecoplan/product-60249-923805.html>
- Eral-Chile. (s.f.). Hidrociclones. Obtenido de <http://eralchile.com/equipos/hidrociclones.php>
- ERIEZ. (2007). Suspended electromagnets SE series 7000. USA: Eriez Magnetics.
- ERIEZ. (2012). SE Series 7000 Suspended Electromagnets. Obtenido de <https://eriez.mx/wp-content/uploads/2015/02/electroimanes-suspendidos-autolimpieza.pdf>
- ERIEZ. (2013). ERIEZ Suspended Electromagnets. Obtenido de <https://www.eriez.com/Global.htm>
- Eriez. (2013). Installation, Operation and Maintenance. 16. USA: ERIEZ MAGNETICS. Obtenido de <https://www.eriez.com/Documents/Literature/IOMs/Magnetic-Separation/SM-323-Eriez-Suspend-Electromagnet-IOM.pdf>
- Eriez. (2014). Suspended Electromagnets. United Kingdom: Eriez Euope. Obtenido de <https://www.kouvo.fi/sites/default/files/SB%20320%20UK6%20SE%20Magnet%20ENGLISH.pdf>
- Eriez. (2016). Direct Industry. Obtenido de Separador Electro-Magnético: <http://www.directindustry.es/prod/eriez/product-19120-1076885.html>
- ERIEZ. (s.f.). Suspended Permanent Magnets. United Kingdom. Obtenido de <https://pdf.directindustry.com/pdf/eriez-magnetics-europe-limited/suspended-permanent-magnets/7282-185881.html>
- ERIEZ. (2018). Eriz Suspended Electromagnets. Obtenido de [https://www.eriez.com/NA/EN/Products/Magnetic-Separation/Electromagnets/Suspended-Electromagnets.htm?utm\\_source=ssc&utm\\_medium=press%20release&utm\\_campaign=heavy](https://www.eriez.com/NA/EN/Products/Magnetic-Separation/Electromagnets/Suspended-Electromagnets.htm?utm_source=ssc&utm_medium=press%20release&utm_campaign=heavy)
- FAO. (2007). Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Organización de las Naciones Unidas, Roma.
- FEECO Internacional. (2017). FEECO Internacional. Obtenido de The rotary dryers handbook: [www.feeco.com](http://www.feeco.com)

- FMAGNET XINFENG. (5 de Junio de 2013). Imanes de neodimio. Obtenido de <http://www.imanes-de-neodimio.com/news/Im-n-Recto-41.html>
- G. Nonhebel, & A.A.H Moss. (1979). El secado de los sólidos en la industria química. (M. Terrizzano, Trad.) Barcelomna, España: Reverté S.A.
- GEA Process Engineering. (s.f.). Rotary Dryers Coolers and Calciners. GEA Barrosin. Denmark: GEA Group AG. Obtenido de [www.gea.com](http://www.gea.com)
- Gonzáles Días, M., & Gonzalo, L. G. (2018). Estudio y diseño de cinta transportadora. ( Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Gunnebo Industries. (2016). Catálogo General de Productos. Obtenido de <https://www.gunneboindustries.com/Global/Lifting/Catalogues/Spanish/1%20-%20Empresa%20Informac%C3%AD%C3%B3n%20y%20servicios%20-%20Catalogo%20Gunnebo%20Industries%202016.pdf>
- Haberer, H. (Mayo de 2009). Guía demanejo ambiental para minería nometálica. Obtenido de Sistema de información Ambiental Regional Apurimac: <http://apusiar.regionapurimac.gob.pe/index.php?accion=verElemento&idElementoInformacion=547&verPor=fuente&idTipoElemento=2&idTipoFuente=&idfuelleinformacion=184>
- Haver & Boeker. (2010). Tecnología en clasificación de materiales. México. Obtenido de [http://haver.es/images/hbi/docs/tyler/Tec\\_Clasificacion\\_Materiales.pdf](http://haver.es/images/hbi/docs/tyler/Tec_Clasificacion_Materiales.pdf)
- Herrera Herbert, J., & Castilla Gómez, J. (2012). La actividad minera actual y sus vectores de desarrollo. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas, Madrid.
- Honeyville Metal Inc. (2012). Honeyville. Obtenido de [http://www.honeyvillemetal.com/media/uploads/0/821\\_Bucket-Elevators-Flyer.pdf](http://www.honeyvillemetal.com/media/uploads/0/821_Bucket-Elevators-Flyer.pdf)
- IDEMAG. (2013). Separación magnética. Barcelona, España. Obtenido de <http://idemag.com/wp-content/uploads/2013/04/Overband-electromagnetico.pdf>
- Industrial Soutions. (05 de Julio de 2017). Overband Electromagnéticos. Obtenido de <http://rccindustrial.com/overband-electromagneticos/>

- International Surface Technologies. (14 de Enero de 2016). International Surface Technologies. Obtenido de <https://istsurface.com/istblast/abrasive-blast-room/bucket-elevator-recovery-system/#prettyPhoto>
- J.Fowler, R. (1994). Electricidad Principios y Aplicaciones. Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- J.Ney, & G.Louis. (1977). Lecciones de electricidad (Quinta edición ed.). (L. I. Moirá, Trad.) Barcelona, España: Marcombo.
- Jasinski, S. M. (January de 2003). U.S. Geological Survey. Obtenido de <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/phosphate-rock/540303.pdf>
- Jasinski, S. M. (January de 2018). U.S. Geological Survey. Obtenido de <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/phosphate-rock/mcs-2018-phosp.pdf>
- Jorvex. (2018). ANIXTER JORVEX. Obtenido de JORVEX: <http://jorvex.com/wp-content/uploads/2014/08/Cat%C3%A1logo-Fajas-Transportadoras.pdf>
- Lira, A. D., & Molinelli Aristond, F. (2007). Panorama de la Minería en el Perú. Osinergmin, Lima.
- Macroconsult. (Junio de 2012). Impacto Económico de la Minería en el Perú. Sociedad Nacional Minería Petroleo y Energía, Lima. Obtenido de [www.snmpe.org.pe](http://www.snmpe.org.pe)
- Manga Rodríguez, C. A. (2014). Determinación de causas de falla en el elevador de cangilones del transportador Clínter de Argos. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia.
- Matamoras, M. J., & Polit, V. M. (Junio de 2011). Utilizacion de modelos autorregresivos para determinar la importancia de las exportaciones mineras sobre las exportaciones totales del Ecuador. (Tesis de licenciatura). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- McCormac. (2002). Diseño de Estructuras de Acero. Mexico: Alfaomega Grupo Editor S.A.
- Metso Minerals Industries, Inc. (2010). Metso Air Classifiers. 4. Pittsburg, United States of America: Metso Minerals Industries, Inc. Obtenido de

<https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/air-classifiers-brochure-en-lr.pdf>

- MIMEN. (2019). Boletín estadístico minero. Ministerio de Energía y Minas, Lima, Perú.
- Mincetur. (2004). Plan extratético regional de exportaciones. Ministerio de Comercio Exterior y Comercio, Piura, Perú.
- MINEM. (Julio de 2016). Mapa de Proyectos Mineros 2016. Ministerio de Energía y Minas, Lima, Perú.
- MINEM. (2017). Perú anuario minero 2016. Ministerio de Energía y Minas, Lima, Perú.
- MINEM. (2018). Anuario Minero 2017. Ministerio de Energía y Minas, Lima, Perú.
- MINEM. (2019). Anuario Minero 2018. Ministerio de Energía y Minas, Lima, Perú.
- MINEN. (29 de marzo de 2019). Ministerio de Energía y Mina. Obtenido de [https://www.minem.gob.pe/\\_detallenoticia.php?idSector=9&idTitular=9021](https://www.minem.gob.pe/_detallenoticia.php?idSector=9&idTitular=9021)
- Ministerio de Vivienda. (2006). Reglamento Nacional de Edificaciones. Perú: El Peruano.
- Mujumdar, A. (2006). Handbook of industrial drying (Fourth Edition ed.). New York: Taylor & Francis.
- Norrgran , D., & Kohmuench, J. (2007). Separation magnetism. 7. USA: WORLD COAL. Obtenido de <https://www.eriez.com/Images/Product-Images/WorldCoalApril.pdf>
- Olukayode, A. (2011). Multiscale modelling of industrial flighted rotary dryers. (Doctoral Thesis). James Cook University, Australia.
- Oruna, J. C. (2015). Explotación de los yacimientos de fosfatos Bayovar. Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Osinergmin. (diciembre de 2016). Reporte de Análisis Económico Sectorial. Obtenido de Osinergmin: <http://www.osinergmin.gob.pe>
- Petrovskaya, N. (2007). Fundamentos de la teoría de la flotación. (G. Petrovskiy, Trad.) Ekaterimburgo, Rusia: Ajur.
- PricewaterhouseCoopers. (2013). Industria Minera. PWC, Lima.
- Pulido, M. Á. (2010). Electroimanes. Alicante, España: Editorial Club Universitario.

- Rodriguez Santillán, M., & León Yungaicela, M. (2016). Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.
- ROTRANS. (s.f.). Cintas transportadoras, esquema. Obtenido de <https://rotranssa.com/cintas-transportadoras>
- Ruiz, O. C. (2014). Tipos de secado en alimentos. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila, México.
- Siegenthaler, J. (2017). Heating with Renewable Energy. Stamford, USA: Cengage Learnig.
- Smartcrush. (s.f.). Mining Quarries & Recycling Instalallations. Obtenido de Clasificación neumática: <http://www.smartcrush.es/clasificacion-neumatica/>
- SOLLALU. (2015). Imanes y separadores magnéticos. Obtenido de Separadores magnéticos con limpieza automática MSS-AC: <https://www.sollau.com/katalog/es-i8-separador-magnetico-con-limpieza-automatica-mss-ac.html>
- SOLLAU. (2017). Imanes y separadores magnéticos. Obtenido de Tambor magnético MB: <https://www.sollau.com/katalog/es-i9-tambor-magnetico-mb.html>
- SSAB. (01 de Abril de 2012). SSAB. Obtenido de <https://www.ssab.es/>
- Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A., & Zurita, V. (2017). La industria de la minería en el Perú: 20 años de contribución al crecimiento y desarrollo económico del país. Osinergmin, Lima, Peru.
- TEMMISA. (s.f.). Rejillas. Obtenido de <http://www.temmisa.com.mx/167285331>
- Tipler, P. A. (2005). Física para la ciencia y la tecnología (Quinta edición ed., Vol. Volumen 2A). Bogotá: Reverté, S.A.
- Tramco, Inc. (Noviembre de 2011). Elevador de cangilones y mantenimiento. Obtenido de [http://www.tramcoinc.com/site/assets/files/5309/bucket\\_elevator\\_assembly\\_operation\\_maintenance\\_-\\_international\\_spanish.pdf](http://www.tramcoinc.com/site/assets/files/5309/bucket_elevator_assembly_operation_maintenance_-_international_spanish.pdf)
- Troglia, G., & Troglia, D. (2005). Tablas Perfiles Laminados y Tubos Estructurales. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina. Obtenido de [file:///C:/Users/carlos.morales/Downloads/tablas%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/carlos.morales/Downloads/tablas%20(2).pdf)

TYMSA. (2012). Trituración y Molienda. Obtenido de Cribas:  
<http://www.trituracionymolienda.com/Cribas.html>

Unitex Spain. (2016). Catálogo General. Obtenido de  
<http://unitexspain.es/images/productos/catalogo13.pdf>

Universidad de Buenos Aires. (2015). Separación de sólidos de sólidos. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. Obtenido de  
[http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/07\\_Apunte%20Separaciones.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/07_Apunte%20Separaciones.pdf)

Vale. (2011). Mina Fosfatos Bayóvar. Vale, Piura.

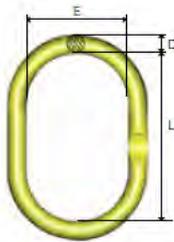
Vázquez Vaamonde, A., & De Damborenea Gonzáles, J. (2000). Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. Madrid, España: CSIC.



**Anexos**



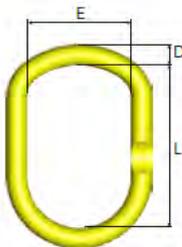
## Anexo A. Ficha técnica de eslabones



### Eslabón maestro MF

Para eslingas de 1-, 2-, 3- y 4-ramales. Eslingas de 3- y 4 ramales de cadenas requieren CLD / CGD

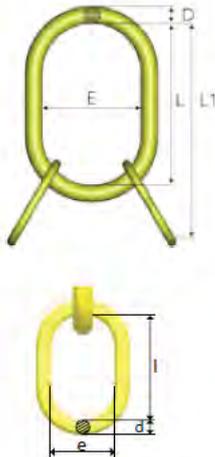
Nº. art.	Código	WLL ton (FS 5:1)		Para cadenas de tamaño, mm			L	E	D	Peso kg
		EN 1677-4	ASTM A-952	1-ramal	2-ramales	3-4-ramales				
B14487	MF-6-10	1.5	1.5	6			100	60	11	0.2
B14481	MF-86-10	2.5	3.2	6, 8	6	-	125	70	14	0.4
B14482	MF-108-10	4.0	5.2	10	8	6	140	80	17	0.8
B14483	MF-1310-10	7.5	8.0	13	10	8	160	95	22	1.5
B14484	MF-1613-10	10.0	13.6	16	13	10	190	110	28	2.8
B14485	MF-2016-10	17.0	20.6	20	16	13	240	140	34	5.2
B14486	MF-2220-10	25.0	30.9	22	20	16	250	150	40	7.3



### Eslabón maestro MFH

Diseñado para ganchos de grúa, DIN 15401/ 15402. Las eslingas de cadena de 3 y 4 ramales requieren componentes CLD y CGD

Nº. art.	Código	WLL ton (FS 5:1)		Para cadenas de tamaño, mm			L	E	D	DIN 15401	DIN 15402	Peso kg
		EN 1677-4	ASTM A-952	1-ramal	2-ramales	3-4 ramales						
Z101262	MFH-1310-10	7.5	8.0	13	10	8	230	125	22	≤ 12	≤ 16	1.9
Z101263	MFH-1613-10	10	13.6	16	13	10	250	135	28	≤ 12	≤ 16	3.2
Z101264	MFH-2016-10	17	20.6	20	16	13	280	135	32	≤ 16	≤ 20	4.6
Z101265	MFH-2220-10	28	30.9	22	20	16	320	175	40	≤ 25	≤ 32	8.6
Z101266	MFHW-2220-10	25	30.9	22	20	16	355	225	40	≤ 50	≤ 63	9.9



### Eslabón maestro con subeslabones MT

Diseñado para cadena o cable de acero. Para eslingas de 3 y 4 ramales

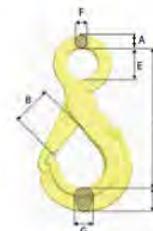
Nº. art.	Código	WLL ton (FS 5:1)		L1	L	E	D	l	e	d	Peso kg
		EN 1677-4	ASTM A-952								
Z100902	MT-6-10	3.5	5.0	270	150	90	19	120	70	14	1.8
Z100903	MT-8-10	5.2	8.0	300	160	95	22	140	80	17	3.0
Z101359	MT-9-10	6.9	9.7	340	190	110	28	150	90	19	4.9
Z100904	MT-10-10	11.5	16.0	360	200	120	30	160	95	22	6.4
Z100905	MT-13-10	17.0	26.0	450	250	150	40	190	110	28	14.2
Z100906	MT-16-10	28.0	35.0	500	300	200	50	200	120	32	23
Z101074	MT-20-10	35.0	50.0	550	300	200	55	250	150	40	31.5
Z101281	MT-22-10	53.0	75.0	610	350	200	60	260	140	45	46
Z101282	MT-26-10	70.0	100.0	730	450	250	70	280	160	50	71
Z101283	MT-32-10	90.0	125.0	750	450	260	80	280	160	55	91

## Anexo B. Ficha técnica de gancho

Grablo

## Gancho de seguridad con pestillo "Grip" OBK

Nº. art.	Código	WLL ton*	A	L	B	E	F	G	H	Peso kg
Z101048	OBK-6-10	1.5	12	103	26	22	9	15	17	0.4
Z101143	OBK-7/8-10	2.5	14	139	37	28	10	20	22	0.8
Z101145	OBK-10-10	4.0	16	170	47	34	13	22	29	1.3
Z101147	OBK-13-10	6.7	21	206	53	44	15	29	38	2.6
Z101141	OBK-16-10	10.0	26	251	68	56	19	29	45	4.4
Z101240	OBK-18/20-10	16.0	28	293	74	60	22	44	56	7.3



## Gancho de seguridad BK

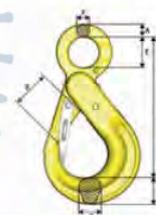
Nº. art.	Código	WLL ton*	A	L	B	E	F	G	H	Peso kg
Z101108	BK-6-10	1.5	12	109	29	22	10	15	21	0.5
Z101097	BK-7/8-10	2.5	14	138	37	28	11	17	26	0.9
Z101024	BK-10-10	4.0	16	168	45	34	13	21	31	1.5
Z101032	BK-13-10	6.7	20	207	55	44	16	30	40	3.0
Z101040	BK-16-10	10.0	26	254	62	56	20	37	50	5.5
Z101089	BK-18/20-10	16.0	30	289	68	60	22	44	62	9.0
Z101325	BK-22-10	20.0	32	320	80	70	24	50	62	11.3
Z101326	BK-26-10	27.0	35	342	100	80	25	54	68	16.5

Para tamaños más grandes, véase la línea Classic Grado 8



## Gancho de seguridad BKD El gancho BK de doble traba con gatillo embutido

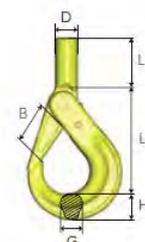
Nº. art.	Código	WLL ton*	A	L	B	E	F	G	H	Peso kg
Z101154	BKD-13-10	6.7	20	207	44	44	16	30	40	3.2
Z101155	BKD-16-10	10.0	26	254	48	56	20	37	50	5.8
Z101156	BKD-18/20-10	16.0	30	289	57	60	22	44	62	9.1
Z101373	BKD-26-10 OS	27.0	35	342	72	80	25	50	69	14.5



## Gancho vástago de seguridad BKT

Nº. art.	Código	WLL ton*	L	B	L1	D	d min	G	H	Peso kg
Z101120	BKT-6-10	1.5	90	29	36	20	11	15	21	0.5
Z1011020	BKT-7/8-10	2.5	111	37	47	24	13	17	26	0.9
Z1010690	BKT-10-10	4.0	133	45	51	29	16	21	31	1.6

d min = el menor tamaño de vástago permitido después de maquinarse.  
¡Importante! Después de maquinarse el vástago, se lo debe testear con la carga de prueba.



## Anexo C. Ficha técnica de grillete

### Grillete Arctic N°. 856

#### Grillete ancla con perno de seguridad

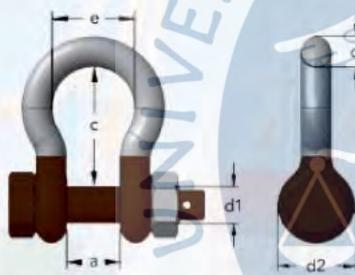
##### Beneficios exclusivos con el grillete Arctic

El clima adverso y las duras condiciones del mar, en combinación con las temperaturas extremadamente bajas, como se encuentran a menudo en el Mar del Norte, por ejemplo, generan altas exigencias para los productos que se usan. Gunnebo Industries tiene una gama de grilletes especialmente diseñados para estas condiciones: el grillete Arctic. Éste posee la aprobación de tipo DNV 2.7-1 para contenedores en offshore y cumple con los requisitos de impacto de 42 J a  $-40^{\circ}\text{C}$ .

El grillete Arctic es un grillete de grado 8 con todas las partes galvanizadas por inmersión en caliente, incluso el perno de seguridad, y con la característica marca marrón.



Norma:	DNV 2.7-1, u.S. Fed. Spec. RR.C-271 y EN-13889
Material:	Acero aleado especial, templada y revenida, grado 8
Terminación:	Todas las partes galvanizadas por inmersión en caliente + marca marrón
Factor de seguridad:	Especificado en la tabla a continuación.
Documentación:	Certificado de prueba y materia prima trazable / certificado de inspección según EN-10204 - 3.1. Los tamaños para 2 a 25 toneladas se entregan con certificación de aprobación de tipo DNV 2.7-1.
Temperatura:	$-40^{\circ}\text{C}$ to $200^{\circ}\text{C}$



Mediadas en mm  
Perno de seguridad incluido.

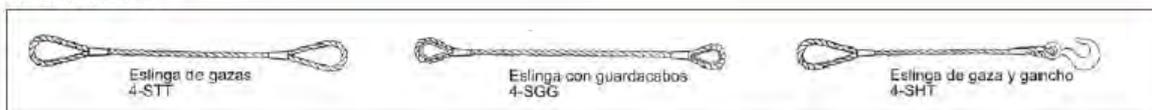
N°. art.	d1	Diam. d		a	c	d 2	e	WLL (ton)	Peso (kgs)	Factor de Seguridad
		mm	pulgadas							
A085613	16	13	1/2"	21	47	33	33	2	0.42	8.00
A085616	19	16	5/8"	27	60	40	42	3.25	0.7	8.00
A085619	22	19	3/4"	31	71	47	51	4.75	1.2	8.00
A085622	25	22	7/8"	37	84	52	58	6.5	1.7	7.85
A085625	28	25	1"	43	95	58	68	8.5	2.5	7.25
A085628	32	28	1 1/8"	46	108	64	74	9.5	3.4	6.94
A085632	35	32	1 1/4"	52	119	72	83	12	4.8	6.40
A085635	38	35	1 3/8"	57	132	74	89	13.5	7	6.10
A085638	42	38	1 1/2"	60	146	84	98	17	9	6.00
A085645	50	45	1 3/4"	74	178	105	127	25	15	6.00
A085652	57	50	2"	83	197	119	138	35	21	6.00
A085664	70	65	2 1/2"	105	255	145	185	55	39	6.00
A085676	83	75	3"	127	330	165	190	85	62	6.00

Anexo D. Ficha técnica de cable de acero

# Eslingas de Cable Cargas de trabajo

NORMA ISO 7531 - C.S. 5:1

COMPOSICION 6 X 37 + 1



Cargas de ramal simple	CARGA MÁXIMA DE UTILIZACIÓN - CMU [kg]			
	Eslingas de cable de acero cargadas de forma equilibrada.			
Dimensión nominal [mm]	900	720	1.800	1.260
10	1.300	1.040	2.600	1.820
12	1.800	1.440	3.600	2.520
14	2.400	1.920	4.800	3.360
16	3.000	2.400	6.000	4.200
18	3.700	2.960	7.400	5.180
20	4.500	3.600	9.000	6.300
22	5.400	4.320	10.800	7.560
24	6.300	5.040	12.600	8.820
26	7.300	5.840	14.600	10.220
28	8.400	6.720	16.800	11.760
30	9.600	7.680	19.200	13.440
32	12.100	9.680	24.200	16.940
36	15.000	12.000	30.000	21.000
40				

Cargas de multi-ramal	Eslingas de cadena cargadas de forma equilibrada*				
	1 RAMAL	2 RAMALES		3 Y 4 RAMALES	
NÚMERO DE RAMALES, N NO APLICABLE A 3 RAMALES	-	-	-	-	-
Ángulo de inclinación respecto a la vertical, $\beta$	-	$\beta < 45^\circ$	$45^\circ < \beta < 60^\circ$	$\beta < 45^\circ$	$45^\circ < \beta < 60^\circ$
Ángulo entre ramales opuestos no aplicable a 3 ramales, $\alpha$	-	$\alpha < 90^\circ$	$90^\circ < \alpha < 120^\circ$	$\alpha < 90^\circ$	$90^\circ < \alpha < 120^\circ$
Dimensión nominal [mm]	900	1.250	900	1.900	1.300
10	1.300	1.800	1.300	2.700	1.900
12	1.800	2.500	1.800	3.800	2.700
14	2.400	3.300	2.400	5.000	3.600
16	3.000	4.200	3.000	6.300	4.500
18	3.700	5.200	3.700	7.800	5.500
20	4.500	6.300	4.500	9.400	6.700
22	5.400	7.500	5.400	11.300	8.100
24	6.300	8.800	6.300	13.200	9.400
26	7.300	10.200	7.300	15.300	10.900
28	8.400	11.700	8.400	17.600	12.600
30	9.600	13.400	9.600	20.100	14.400
32	12.100	16.900	12.100	25.400	18.100
36	15.000	21.000	15.000	31.500	22.500
40					

Carga según Norma ISO 7531, C.S. 5:1

Anexo E. Ficha técnica de trolley

## RailStar motor driven trolley

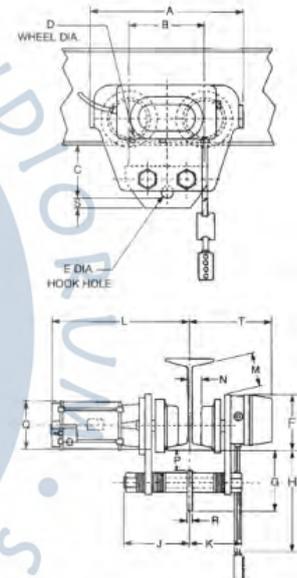
- Fits wide range of beam sizes for maximum versatility
- Universal use with any hook suspended single speed hoists that are equipped with reversing contactor
- Steel spur gearing for optimum strength and smooth operation
- Durable hardened cast iron trackwheels that operate on standard S-beams or flat flanged beams
- Lifetime lubricated double row ball bearings for high efficiency, low maintenance
- Cast iron control enclosure
- Four-button control station included for operating single speed hoist. Drop proportioned to 20' lift
- Steel plate side frames
- 115 volt control circuit on 1 phase units  
48 volt control circuit on 3 phase units
- Trolley guards standard
- One-year warranty
- Metric rated
- Imported



Clearance dimensions (in.)

Dimension	Rated capacity* (tons)	
	1/8 - 2	3
A	12 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	14 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>
B	6 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	6 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>
C**	4 <sup>13</sup> / <sub>16</sub>	5 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>
D	3 <sup>9</sup> / <sub>16</sub>	3 <sup>13</sup> / <sub>16</sub>
E	2 <sup>9</sup> / <sub>16</sub>	2 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>
F**	4 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	5 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>
G**	6	6 <sup>9</sup> / <sub>16</sub>
H**	17 ft.	17 ft.
J	7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	9 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>
K	4 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	4 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>
SINGLE PHASE L	12 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	15 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>
THREE PHASE L	11 <sup>7</sup> / <sub>16</sub>	13 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>
M**	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>
N**	3 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	3 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>
P**	1 <sup>7</sup> / <sub>16</sub>	1 <sup>9</sup> / <sub>16</sub>
Q**	5 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	5 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>
R	1/2	3/4
S	1 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>
T**	8 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	9 <sup>9</sup> / <sub>16</sub>

\*\*Dimensions given are for minimum S-beam and will vary with larger beams.



Specifications

Rated capacity (tons)	Product Code	Operating Voltage		Phase	Travel Speed		Motor H.P.	Min. beam size	Max. beam size	Shipping weight (lbs)
		50 hertz	60 hertz		50 hertz (F.P.M.)	60 hertz (F.P.M.)				
1/8-2	0300	220/380-415	220-240/440-480	3	65	78	1/3	S6x12.5	S18x54.7	108
1/8-2	0301	n/a	110-120	1	n/a	78	1/3	S6x12.5	S18x54.7	113
3	0302	220/380-415	220-240/440-480	3	65	78	3/4	S8x18.4	S24x79.9	185
3	0303	n/a	110-120	1	n/a	78	3/4	S8x18.4	S24x79.9	190

Note: Three phase units are reconnectable for high and low range voltage

**\*WARNING**

**Overloading and improper use can result in injury.**

**To avoid injury:**

- Do not exceed working load limit, load rating capacity
- Do not use to lift people or loads over people.
- use only alloy chain for overhead lifting.
- Read and follow all instructions.

## Anexo E. Ficha técnica de electroimán



### FEATURES AND ADVANTAGES

The Eriez Hi-Gradient Circuit, scientifically balanced to make full use of the magnet's high permeability steel members for most efficient magnetic field distribution, produces maximum-force density at a selected working distance from the magnet face. The magnet is fabricated from heavy-steel plate with a thick, manganese, steel bottom plate. The Series 7000 magnet is structurally rugged and built to last.

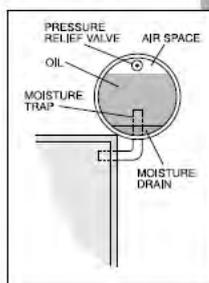
Other design features include:

- Class H insulated aluminum coils.
- Space-wound coils with non-deteriorating fiberglass spacer and insulating material. No wood products are used in Eriez Series 7000 Magnets.
- An efficient four-pulley self-cleaning arrangement, plus a two-pulley design for smaller models

#### EXCLUSIVE EXTERNAL OIL EXPANSION TANK

This unique feature has helped prevent coil burnout on thousands of Eriez oil-cooled electromagnets.

Heat and moisture, the greatest enemies of electromagnets, are effectively controlled by the expansion tank which assures that the coils are always completely covered with cooling oil. Competitive units provide air space within the magnet housing where damaging condensation forms when moist air seeps in through the pressure relief valve as the magnet cools. Eriez' expansion tank traps this moisture and keeps it out of the magnet.



#### STYLES AND MODELS

##### MC Models (Manual Cleaning)

All MC models are cleaned of accumulated tramp iron by turning off magnet power periodically. They are recommended for use where only occasional pieces or small amounts of iron may contaminate the material flow.

- Standard mounting hardware consists of adjustable suspension sling.
- MC models can be easily converted to SC styles giving great flexibility for changing conditions.

##### SC Models (Self Cleaning)

SC Models provide completely automatic iron removal and can be installed in an "in line" position (SC-1) or in a "cross belt" position (SC-2). Each of the two self-cleaning configurations is designed to suit specific conditions and requirements. Space and clearance, conveyor belt speed, burden depth, tramp iron size, etc., are factors that dictate choice of style.

Both SC Models incorporate a short-belt conveyor built around the magnet to effect automatic removal of tramp iron from the magnet face. This system features a rubber conveyor belt, bearings, rugged but simple continuous channel frame, adjustable take-ups and shaft-mounted reducer with V-belt coupling to a TEFC motor.

- Optional mounting hardware consists of turnbuckles.
- All style SC units are easily demountable from SC conveyor and can be used independently as MC units.

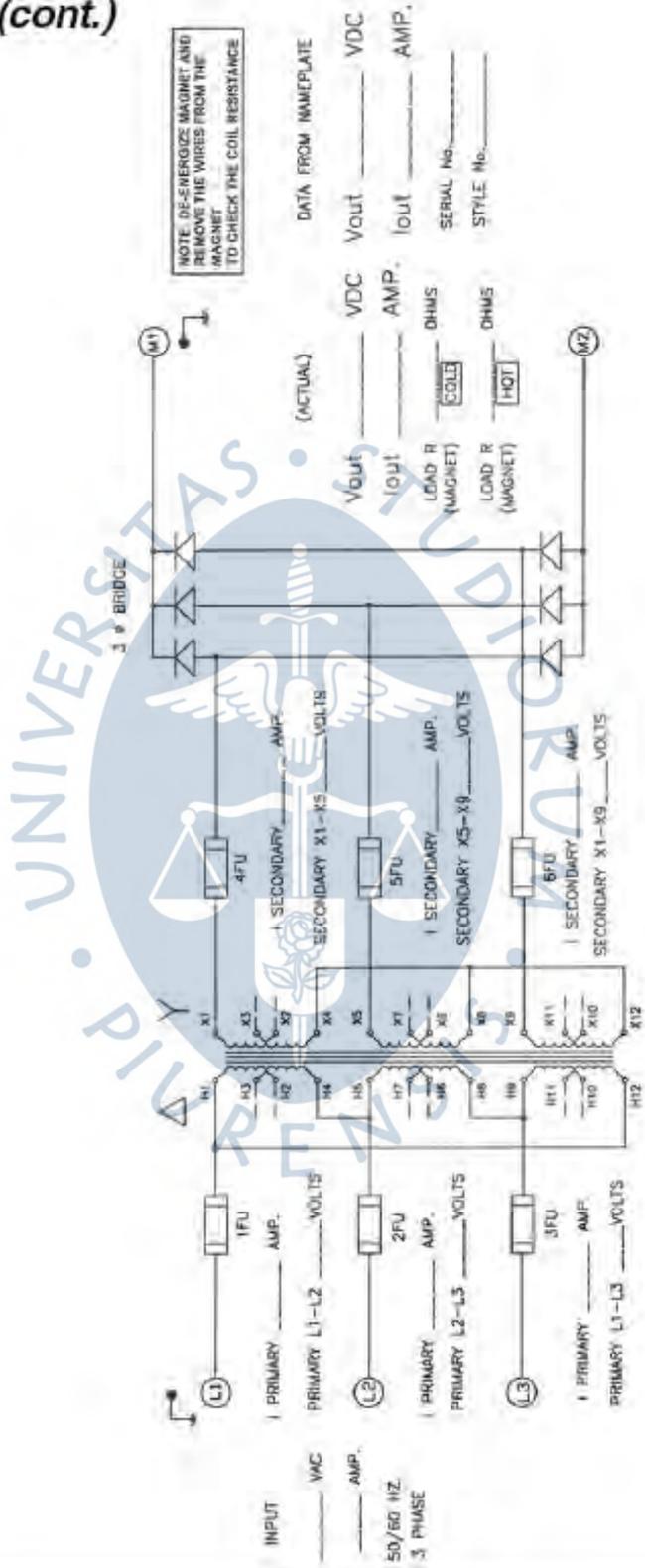
##### Options

A wide choice of options is available to assure peak performance in unique or difficult applications. Some of these are:

- Steel dust enclosures for magnet installation in dusty locations
- Explosion-proof motors
- Static-conducting belts
- Special belts for abrasive, hot or difficult applications
- Conveyor speed switches
- Magnet load monitor

Anexo F. Ficha técnica de electroimán circuito eléctrico interno

Maintenance (cont.)



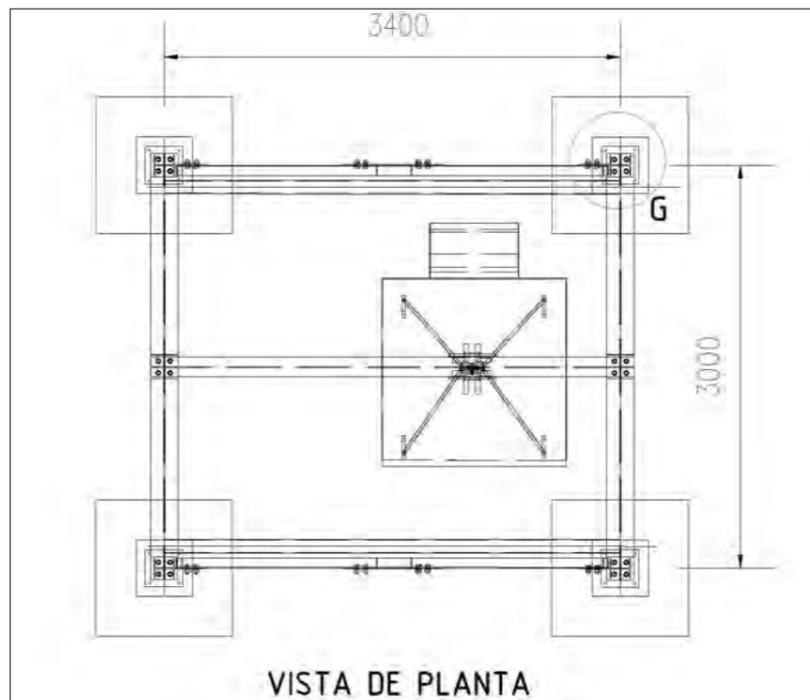
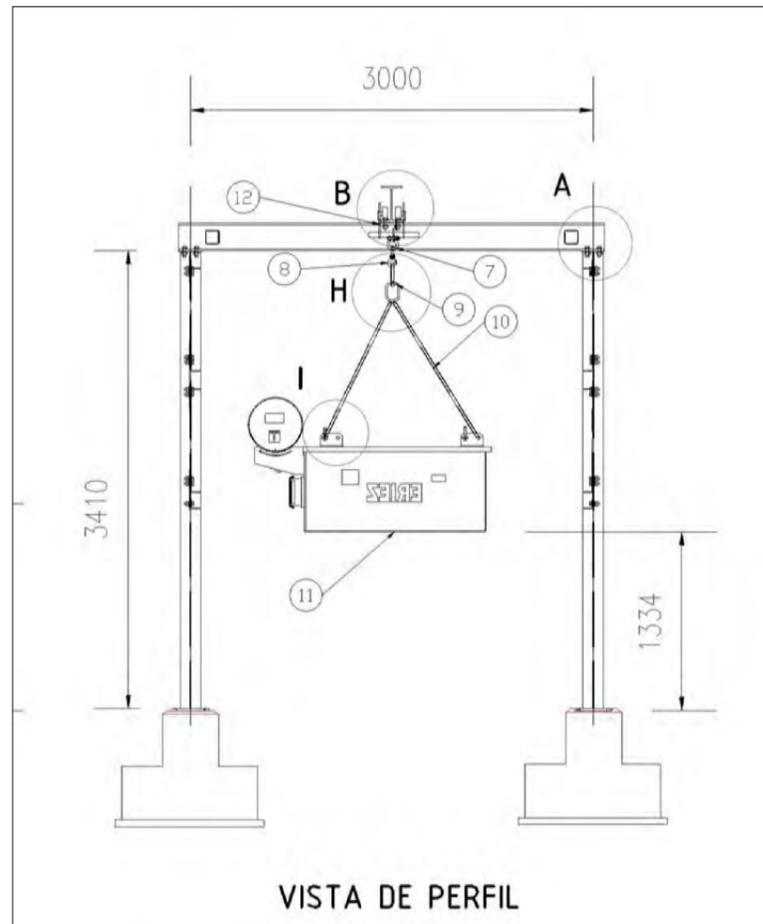
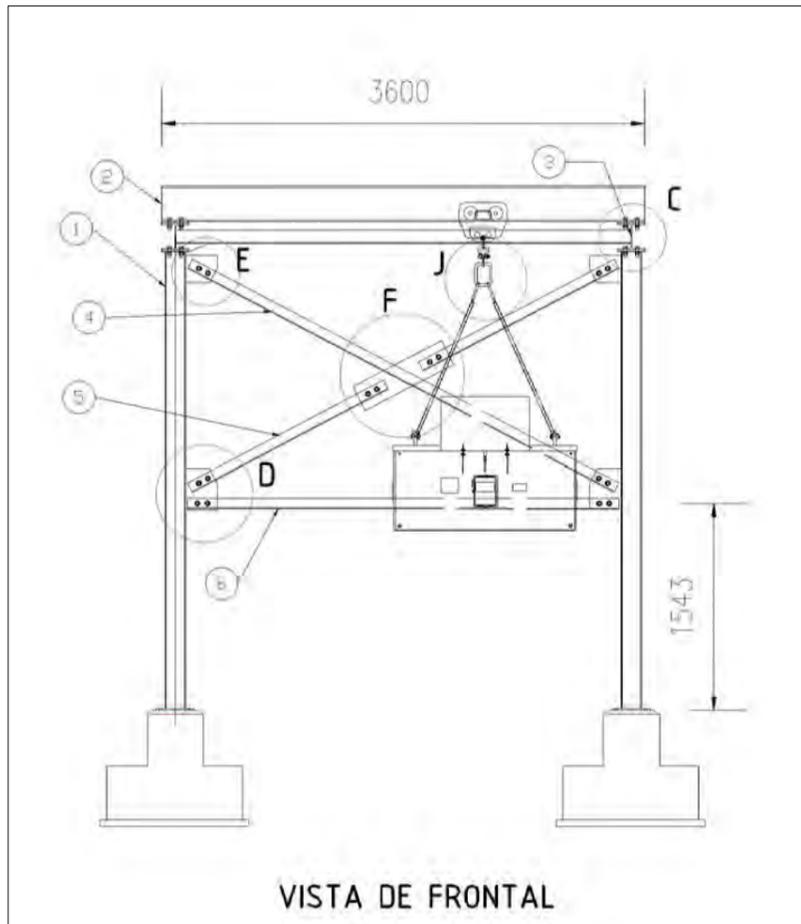
RATING: EXAMPLE 10K42  
 10000 WATTS (DC) OUTPUT  
 4 = 480 VAC INPUT  
 2 = 230 VDC OUTPUT



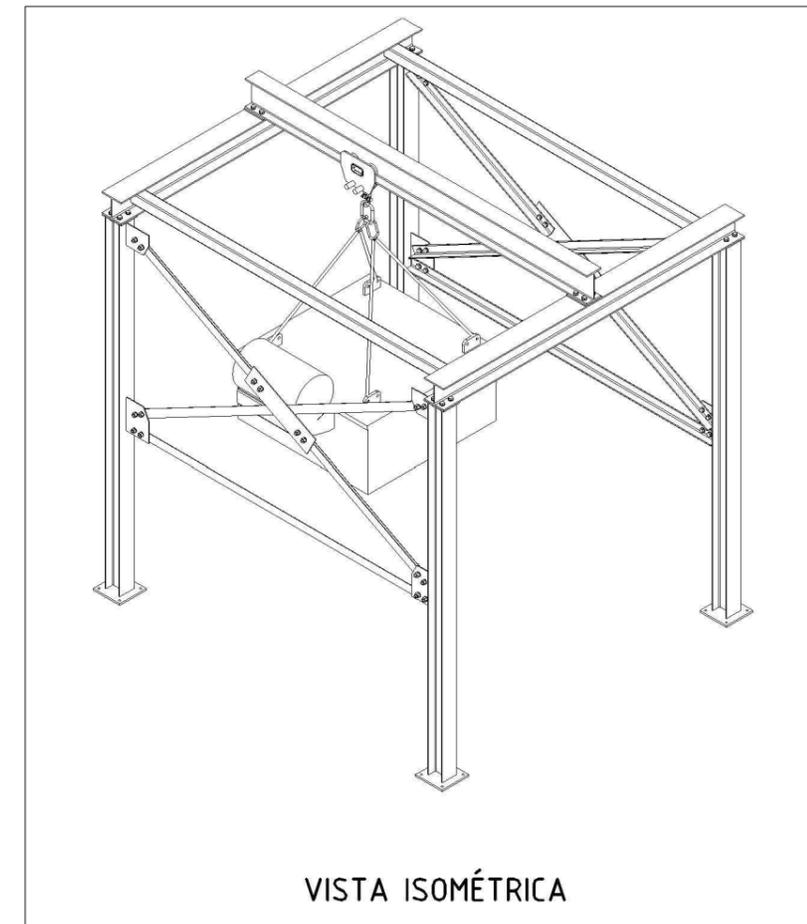
**Planos**





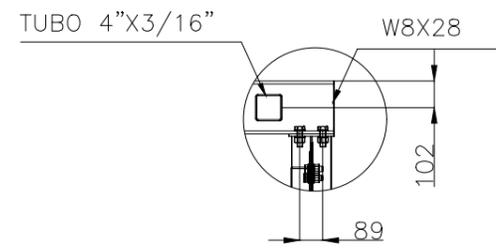


LISTA DE PARTES			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPCION
1	4	COLUMNAS	W8x10-ASTM A36
2	1	VIGA DE CARGA	W10x30-ASTM A36
3	2	VIGA DE SOPORTE	W8x31-ASTM A36
4	1	ANGULO DE 3600 mm	L3"x3"x1/4"-ASTM A36
5	1	ANGULO DE 1700 mm	L3"x3"x1/4"-ASTM A36
6	1	ANGULO DE 3300	L3"x3"x1/4"-ASTM A36
7	5	GRILLETE	A085619
8	1	GANCHO	OBK-16-10
9	1	ESLABÓN	MT-8-10 ASTM A952
10	1	CABLE DE ACERO	CABLE DE Ø 16 mm
11	1	ELECTROIMAN	ERIEZ SE 7535
12	1	TROLLEY	TROLLEY DE 3 TONELADAS
13	2	VIGAS DE REFUERZO	TUBO 4"x4"x3/16" - ASTM A36

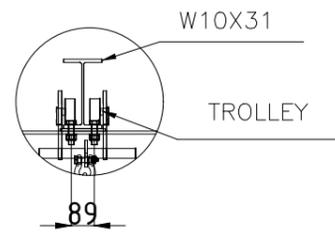


- NOTAS:
1. DIMENSIONES EN MILÍMETROS Y ELEVACIONES EN METROS.
  2. PERNOS ASTM-A325 (E.A) - GALVANIZADOS EN CALIENTE CONFORME NORMA ASTM A153-C, ED. 98
  3. TODOS LOS ELEMENTOS SERÁN PINTADOS
  4. SOLDADURAS CONFORME NORMA "AWS"
  5. PARA DETALLES VER PLANO 2

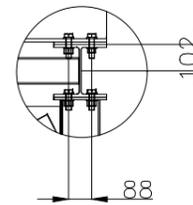
FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERIA		
DIBUJADO	10/11/19			C.MORALES
REVISADO	10/11/19			J.MACHACUAY
SISTEMA DE RETIRO DE RESIDUOS METALICOS		ESTRUCTURA DE ACERO	ESCALA 1 : 50	
CARLOS RAUL MORALES PEÑA			PLANO N 1/2	



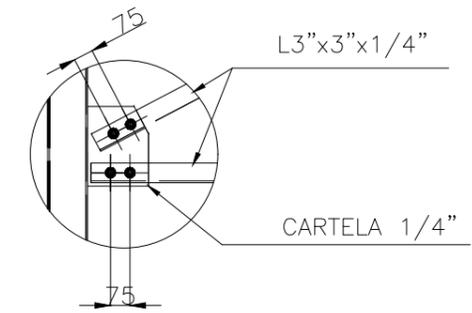
DET.A



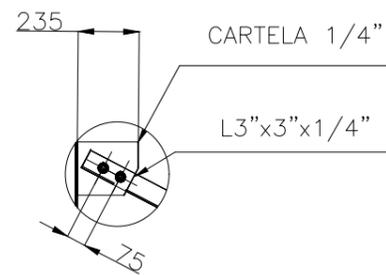
DET.B



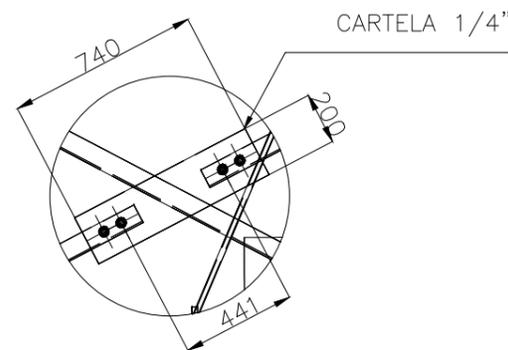
DET.C



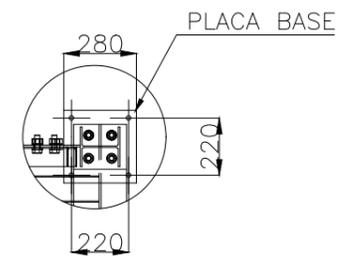
DET.D



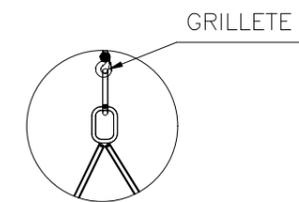
DET.E



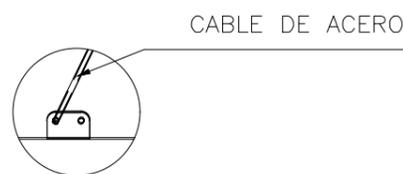
DET.F



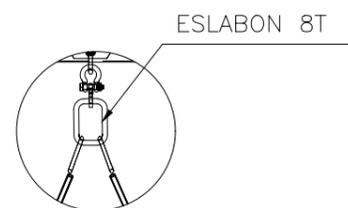
DET.G



DET.H



DET.I



DET.J

- NOTAS:
1. DIMENSIONES EN MILÍMETROS Y ELEVACIONES EN METROS.
  2. PERNOS ASTM-A325 (E.A) – GALVANIZADOS EN CALIENTE CONFORME NORMA ASTM A153-C, ED. 98
  3. TODOS LOS ELEMENTOS SERÁN PINTADOS
  4. SOLDADURAS CONFORME NORMA "AWS"
  5. PARA DETALLES VER PLANO 2

	FECHA	NOMBRE
DIBUJADO	10/11/19	C.MORALES
REVISADO	10/11/19	J.MACHACUAY

UNIVERSIDAD DE PIURA  
FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMA DE RETIRO DE RESIDUOS METALICOS

CARLOS RAUL MORALES PEÑA

ESTRUCTURA DE ACERO

ESCALA  
1 : 50

PLANO  
N 2/2