



Integración de Elementos para una Aproximación Sostenible en el Diseño Conceptual de Transportadores Continuos de Sólidos a Granel

Tesis de Maestría

Leonardo Augusto Blanco Núñez

Director: Heriberto Maury Ramírez Ph.D

Maestría en Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad del Norte

Barranquilla, Colombia

Junio 2019

Tabla de Contenido

1. Planteamiento del Problema	1
2. Objetivo	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos Específicos	2
3. Alcance	3
4. Metodología de Investigación	4
1. Determinación del Conocimiento y Elementos que deben ser Incorporados para implementar una Aproximación Sostenible en el Diseño Conceptual de Transportadores Continuos a Granel.....	5
2. Desarrollo de los Elementos que deben ser incorporar en el Diseño Conceptual de Transportadores Continuos de Sólidos a Granel para implementar una Aproximación Sostenible	11
6.1. Definición del listado de especificaciones para el diseño desde una perspectiva sostenible.....	11
6.2. Establecimiento del método para generación de las alternativas de solución	16
6.3. Establecimiento de una metodología de priorización de las alternativas con base en los criterios sostenibles.....	25
6.4. Desarrollo de los métodos para determinar el desempeño sostenible de las posibles alternativas	31
6.4.1. Modelos comparativos basados en sub-criterios ambientales	31
6.4.2. Modelo comparativo basado en criterio económico	56
6.4.3. Modelos comparativos basados en sub-criterios social	67
7. Verificación de la funcionalidad y el valor agregado de los elementos incorporados, mediante casos de estudio, para el diseño conceptual de transportadores continuos con un enfoque de sostenibilidad.....	71
7.1. Caso de Estudio 1	71
7.1.1. Definición de las especificaciones.....	72
7.1.2. Generación de alternativas.....	72
7.1.3. Priorización de las alternativas	75
7.2. Caso de Estudio 2	80
7.2.1. Definición de las especificaciones.....	81

7.2.2. Generación de alternativas.....	81
7.1.3. Priorización de las alternativas	84
7.4 Análisis del valor agregado de la estructura de diseño con los elementos incorporados	88
8. Conclusiones.....	89
9. Recomendaciones y Trabajos Futuros	91
10. Referencias	92

Listado de Figuras

Figura 1. Fase del proceso de diseño a incluir en la metodología.	10
Figura 2. Estructura del Proceso Analítico Jerárquico propuesto.....	25
Figura 3. Comparación del consumo de energía	35
Figura 4. Requerimiento de potencia específico para transporte horizontal.....	40
Figura 5. Requerimiento de potencia específico para transporte inclinado.....	41
Figura 6. Requerimiento de potencia específico para transporte vertical.....	41
Figura 7. Requerimiento de potencia localizado.	42
Figura 8. Requerimiento de potencia para transportar 1 tonelada/h de material.	43
Figura 9. Precio de compra para sistemas de transporte en operación horizontal	60
Figura 10. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud de transporte horizontal.....	62
Figura 11. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud para operación horizontal.....	62
Figura 12. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud de transporte.....	63
Figura 13. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud de transporte inclinada.	63
Figura 14. Costo de propiedad de algunos sistemas con capacidad de 200 TPH a distintas longitudes.	65
Figura 15. Tornillo transportador utilizado actualmente y problema analizado en el caso de estudio 1.....	71
Figura 16. Pesos relativos de los criterios obtenidos con método AHP para el caso de estudio 1.	75
Figura 17. Estructura jerárquica y pesos relativos para el caso de estudio 1.....	76
Figura 18. Resultados del proceso de priorización utilizando AHP para el caso de estudio 1.....	80
Figura 19. Transportador Neumático para descarga de cereal en buques y problema.	80
Figura 20. Estructura jerárquica y pesos relativos para el caso de estudio 2.....	84
Figura 21. Resultados del proceso de priorización utilizando AHP para el caso de estudio2.....	87

Listado de Tablas

Tabla 1. Sistemas expertos para selección de equipos de manejo de material	8
Tabla 2. Escalas para definición de especificaciones necesarias (se incluye códigos).....	12
Tabla 3. Indicadores seleccionados a partir del inventario del GRI.	13
Tabla 4. Especificaciones definidas para el caso de transportadores continuos de sólidos a granel.	15
Tabla 5. Tipos y subtipos de transportadores a considerar como posibles alternativas.....	16
Tabla 6. Listado de atributos para proceso de generación de alternativas.....	17
Tabla 7. Atributos operativos de las bandas transportadoras.	18
Tabla 8. Atributos operativos de los transportadores de cadena.....	19
Tabla 9. Atributos operativos de los transportadores de cadena.....	20
Tabla 10. Atributos operativos de los elevadores de cangilones.	21
Tabla 11. Atributos operativos de los transportadores neumáticos.	22
Tabla 12. Atributos operativos de los transportadores hidráulicos.....	23
Tabla 13. Matriz de generación de alternativas basado en cumplimiento de especificaciones.	24
Tabla 14. Escala de importancia relativa de Saaty [31].....	27
Tabla 15. Implementación de la comparación pareada.	27
Tabla 16. Fenómenos causantes del consumo de energía en transportadores continuos de sólidos a granel.	33
Tabla 17. Expresiones para estimación de los componentes de consumo de energía.	36
Tabla 18. Coeficientes Empíricos del modelo de energía.	38
Tabla 19. Coeficiente de fricción en función del tipo de transportador de cadena.....	39
Tabla 20. Altura equivalente en función del tipo de elevador de cangilones.	39
Tabla 21. Comparación pareada en función del consumo energético.	44
Tabla 22. Ejemplo de comparación pareada en función del consumo de energía.	44
Tabla 23. Generación de polvo fugitivo y no fugitivo y niveles de preferencia de transportadores.	46

Tabla 24. Comparación pareada en función del sub-criterio emisiones.	46
Tabla 25. Ejemplo de comparación pareada en función de las emisiones de particulado.	47
Tabla 26. Fuentes de emisión y las medidas de prevención en la operación de transportadores continuos.	47
Tabla 27. Nivel de preferencia en función del uso del agua.	48
Tabla 28. Comparación pareada en función del sub-criterio uso del agua.	48
Tabla 29. Ejemplo de comparación pareada en función de las emisiones de particulado.	48
Tabla 30. Componentes fuentes de ruido en transportadores de acuerdo a [48].	49
Tabla 31. Nivel de preferencia en función del ruido generado.	50
Tabla 32. Comparación pareada en función del sub-criterio uso del agua.	50
Tabla 33. Ejemplo de comparación pareada en función del ruido generado.	50
Tabla 34. Peso relativo de los principales componentes en transportadores.	52
Tabla 35. Constantes de peso relativo para el modelo comparativo de intensidad de recursos en fabricación.	52
Tabla 36. Intensidad energética de material en transportadores continuos.	53
Tabla 37. Comparación pareada en función del sub-criterio intensidad de recursos.	53
Tabla 38. Índices de reciclabilidad. [60]	54
Tabla 39. índice de potencial de reúso de los componentes de transportadores.	55
Tabla 40. Comparación pareada en función del sub-criterio reciclaje y reúso.	55
Tabla 41. Comparación pareada en función del costo de propiedad.	57
Tabla 42. Valores del factor de costo de módulo de acuerdo a [64].	57
Tabla 43. Parámetros para estimación conceptual de costos de transportadores de acuerdo a [57].	58
Tabla 44. Parámetros para estimación conceptual de costos de transportadores, para el año 2018.	59
Tabla 45. Factor para estimación del costo total de mantenimiento a partir del precio de compra.	64
Tabla 46. Costos, en millones de dólares, de sistemas de 200 TPH y 100 metros de distancia de transporte.	66
Tabla 47. Riesgo de accidentes y recomendaciones para prevenirlos por familia de transportador.	67
Tabla 48. Generación de polvo no fugitivo y niveles de preferencia en función del impacto en seguridad.	68
Tabla 49. Comparación pareada en función del sub-criterio seguridad.	69

Tabla 50. Ejemplo de comparación pareada en función de la seguridad.....	69
Tabla 51. Niveles de preferencia en función del impacto en salud.	69
Tabla 52. Comparación pareada en función del sub-criterio seguridad.	70
Tabla 53. Ejemplo de comparación pareada en función del impacto en la salud.	70
Tabla 54. Definición de especificaciones para el caso de estudio 1.	72
Tabla 55. Implementación de la matriz de generación de alternativas para el caso de estudio 1.....	73
Tabla 56. Alternativas generadas para el caso de estudio 1.	74
Tabla 57. Parámetros para estimación del requerimiento de potencia promedio en caso de estudio 1.	76
Tabla 58. Estimación del costo total de propiedad [\$1000 USD] de las alternativas para el caso de estudio 1.....	77
Tabla 59. Estimación del total de recursos y la preferencia por potencial de reciclaje y reúso para el caso 1.....	77
Tabla 60. Parámetros de comparación entre alternativas para el caso de estudio 1.	78
Tabla 61. Ilustración de comparación pareada: matriz A sub-criterio costo para el caso de estudio 1.	78
Tabla 62. Ilustración de comparación pareada: matriz A y vector C sub-criterio costo para el caso de estudio 1.....	79
Tabla 63. Grado de preferencia por sub-criterio para el caso de estudio 1.....	79
Tabla 64. Definición de especificaciones para el caso de estudio 2.	81
Tabla 65. Implementación de la matriz de generación de alternativas para el caso de estudio 2.....	82
Tabla 66. Alternativas generadas para el caso de estudio 2.	83
Tabla 67. Parámetros para estimación del requerimiento de potencia promedio en caso de estudio 2.	85
Tabla 68. Estimación del costo total de propiedad [\$1000 USD] de las alternativas para el caso de estudio.....	85
Tabla 69. Estimación del total de recursos y la preferencia por potencial de reciclaje y reúso para el caso 2.....	85
Tabla 70. Preferencia de los sistemas en función de las emisiones, el ruido, la seguridad y salud.....	86
Tabla 71. Grado de preferencia por sub-criterio.....	86

Abreviaturas y Símbolos

AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
GRI	<i>Global Reporting Initiative</i>
BS	<i>British Standard</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
CEMA	<i>Conveyor Equipment Manufacturers Association</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
EPA	<i>Environment Protection Agency</i>
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
m	Metros
kg	kilogramo
TPH	Toneladas/hora
C	Celsius
°	Grados
a_{ij}	importante del objeto i frente al objeto j
\dot{m}	Flujo másico de sólido a granel [Ton/h]
H	Altura de elevación [m]
L_c	Distancia de transporte [m]
V	Velocidad del medio de transporte [m/s]
g	Gravedad [m/s^2]
m_c/ m_r	Masa por unidad de longitud de los rodillos en el lado de carga y retorno [kg/m]
m_b	Masa de la banda por unidad de longitud [kg/m]
m_{ca}	Masa del cangilón [kg]
m_m	Masa por unidad de longitud de la banda o cadena del elevador inclinado [kg/m]
λ	Paso del tornillo [m]
θ	Ángulo de elevación [°]
H_0	Altura equivalente [m]
P_1	Presión en la entrada del Sistema motriz [Pa]
ϕ	Razón de carga
D	Diámetro de la tubería [m]
β	Factor para transportadores neumáticos verticales
ρ_w	Densidad del agua
Q_m	Flujo volumétrico de la mezcla [m^3/s]
S_s	Densidad relativa de los sólidos
C_{vd}	Concentración de los sólidos
v'_t	Velocidad de asentamiento [m/s]
f_{s1-b}	Coefficiente de fricción banda-rodillo
f_{s2-b}	Factor de fricción material en banda

f_{s1-s}	Factor material para el tornillo
f_{s2-sd}	Factor diámetro para el tornillo
f_{s2-sb}	Factor rodamiento para el tornillo
f_{s-e}	Factor friction en elevadores inclinador
S	Espaciamiento entre cangilones
RPE	Requerimiento de potencia específico [wh/ton*m]
RPL	Requerimiento de potencia localizado [wh/ton]
m_{acero}	Masa de componentes en acero
C_{aceroL}	Masa relativa de los componentes en acero a lo largo de la longitud del transportador
C_{aceroM}	Masa relativa de los componentes localizado y fabricados en acero
$m_{poli.}$	Masa de componentes polímeros del transportador
$C_{poli.L}$	Masa relativa de los componentes poliméricos a lo largo de la longitud del transportador
E_{acero}	Energía requerida para fabricar componentes de acero
$E_{poli.}$	Energía requerida para fabricar componentes de caucho
CE_{acero}	Intensidad energética en fabricación del acero
$CE_{poli.}$	Intensidad energética en fabricación del caucho
$R_{sistema}$	Potencial de reciclaje del sistema
R_{acero}	Índice de reciclabilidad del acero
C_d	Factor costo módulo
C_m	Factor costo mantenimiento

Introducción

Un transportador continuo de sólidos a granel, es una solución tecnológica empleada para desplazar material a granel, o no envasado, en una trayectoria fija, con flujo relativamente constante, como carbón, cenizas, granos y arena fina, entre otros. Existe gran variedad de estos sistemas de transporte, como el transportador de banda, los tornillos transportadores, transportador y elevador de cangilones, transportador de cadena, transportador neumático y transportador hidráulico, cada uno de ellos con múltiples variantes en función de la configuración del sistema.

El diseño conceptual es la fase dónde se generan las alternativas de solución para un problema de diseño, se evalúan dichas alternativas para seleccionar de la forma más objetiva una de ellas. En consecuencia, realizar este proceso con una aproximación sostenible, será una tarea dispendiosa y compleja, al considerar mayor número de criterios de diseño, más allá de los operacionales.

A pesar de que se han desarrollado metodologías y herramientas que soportan el proceso de diseño conceptual de transportadores continuos; las mismas no abordan el problema de diseño desde una perspectiva sostenible. Dadas las tendencias hacia el enfoque sostenible en las más recientes metodologías y herramientas de diseño, en esta tesis se busca integrar elementos para la aproximación sostenible en el diseño conceptual de transportadores continuos de sólidos a granel.

Se busca presentar una estructura de diseño conceptual para estos sistemas que permita reducir el tiempo requerido del proceso, sistematizarlo y posibilitar su realización exitosa por parte de ingenieros, en especial los de menor experiencia, con la incorporación de elementos que conduzcan a una solución de transporte de sólidos que cumpla tanto con los requerimientos operativos y que además, presente el mejor desempeño sostenible en términos económicos, de interacción con el ambiente y la sociedad, en el de diseño conceptual de estos sistemas.

1. Planteamiento del Problema

El diseño conceptual, fase de generación de las alternativas de solución y selección de un alternativa de manera objetiva, constituye una tarea dispendiosa y compleja al implementarse en transportadores continuos de sólidos a granel, debido a la amplia variedad de tipos de equipos que se pueden implementar para desempeñar la misma operación [1]. Tradicionalmente, el diseño conceptual para la definición del sistema transportador continuo a utilizar, se ha realizado mediante: 1) Uso de manuales (*handbooks*) específicos por tecnología, 2) uso de la experiencia del diseñador, 3) contratación de consultores y 4) consulta a vendedores de equipos. El problema con estas soluciones es que el uso de manuales requiere de tiempo significativo, los diseñadores tienden a seleccionar el equipo con el que están más familiarizados, decisión que puede no ser la más apropiada para la aplicación considerada; los costos y tiempos de los consultores son elevados y la recomendación de los vendedores puede no ser imparcial dado su interés inherente en vender sus productos [2]. .

El proceso de diseño conceptual de transportadores continuos no puede ser realizado superficialmente, ya que la implementación de la tecnología adecuada, conduce al uso de instalaciones de mejor eficiencia, a un mejor desempeño ambiental y costo [3], [4].

Ante la complejidad y consumo de tiempo en el diseño conceptual y la importancia de su realización, los diseñadores de estos equipos han desarrollado herramientas y metodologías para asistir el proceso, que permiten facilitarlo, pero su enfoque ha sido operacional y en algunas se ha considerado elementos económicos de manera superficial.

El enfoque de las estrategias empresariales actuales no es únicamente económico, estas consideran el desarrollo sostenible desde una perspectiva integral, lo que ha promovido el desarrollo de metodologías para el diseño desde un enfoque sostenible. Si bien existen metodologías de diseño sostenible, estas no se han particularizado para los sistemas de transporte a granel, que es precisamente el foco de esta tesis de maestría.

Las metodologías actuales para el diseño conceptual de transportadores de sólidos a granel garantizan la operación adecuada del sistema, pero no consideran su desempeño sostenible desde la economía, el ambiente y la sociedad, lo que es contrario a las tendencias en las metodologías de diseño y las estrategias empresariales actuales.

¿Qué conocimiento y elementos deben ser incorporados para implementar una aproximación sostenible en el diseño conceptual de transportadores continuos a granel?

2. Objetivo

2.1. Objetivo general

Incorporar elementos para una aproximación sostenible en el diseño conceptual de transportadores continuos de sólidos a granel.

2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar el conocimiento y elementos que deben ser incorporados para implementar una aproximación sostenible en el diseño conceptual de transportadores continuos a granel.
2. Desarrollar los elementos que deben ser incorporados en el diseño conceptual de transportadores continuos de sólidos a granel para implementar una aproximación sostenible.
3. Verificar la funcionalidad y el valor agregado de los elementos incorporados, mediante casos de estudio, para el diseño conceptual de transportadores continuos con un enfoque de sostenibilidad.

3. Alcance

Esta tesis propone implementar un proceso de diseño conceptual para transportadores continuos de sólidos a granel integrando elementos para suplir las brechas en las metodologías y herramientas existentes con enfoque principalmente operacional, logrando así una aproximación sostenible en el proceso de diseño.

La tesis aborda únicamente la etapa de diseño conceptual, por tanto, se busca generar las alternativas de solución para un problema de diseño y la selección de una de ellas de manera objetiva. El diseño básico y el diseño detallado, están por fuera del alcance de esta tesis.

En esta tesis, los análisis y evaluaciones se sustentan especialmente en las ventajas y desventajas de los diferentes principios tecnológicos desde una perspectiva sostenible. La estructura del desarrollo sostenible es bastante compleja, compuesta por objetivos enlazados con naturaleza mutuamente reforzada o conflictiva, por lo que se debe delimitar las consideraciones en términos de sostenibilidad. Normalmente, deben ser considerados en la fase conceptual aspectos como eficiencias, consumo de recursos y emisiones, elementos sociales y económicos; mientras que, en fase posteriores del diseño, a no considerar en esta tesis, deberán definirse aspectos propios de la fabricación como materiales, dimensiones y tolerancias que determinan los procesos de su manufactura para una tecnología adecuada desde lo sostenible en todo su ciclo de vida.

El problema de diseño se aborda desde la etapa conceptual, es decir, comparado el desempeño de los sistemas sin incorporar otras variables externas. En consecuencia, se incluyen en los análisis indicadores como el consumo de energía, pero se excluye la huella de carbono, dado que esta dependerá de conocer la fuente de generación de energía lo que se considera una variable externa al sistema a diseñar.

La tesis estructura y sistematiza el proceso de diseño conceptual de transportadores con una aproximación sostenible. A nivel ambiental se considera el consumo de energía en operación, el consumo de energía y materiales durante la fabricación, el potencial de reciclaje y reúso de componentes al final de la vida del sistema, las emisiones, el ruido y el uso de agua. A nivel económico se considera el costo total asociado al sistema en una ventana de tiempo específica, sin incluir el ciclo de vida completo por lo que no se consideran costos de disposición. A nivel de interacción con la sociedad se considera el nivel de seguridad y el impacto sobre la salud por la operación del sistema.

4. Metodología de Investigación

Para alcanzar los objetivos propuestos se busca implementar la siguiente metodología de investigación:

Fase 1. Determinación del conocimiento y elementos que deben ser incorporados para implementar una aproximación sostenible en el diseño conceptual de transportadores continuos a granel.

Se propone realizar la revisión del estado del arte de métodos de diseño extensivamente utilizados para el diseño conceptual de transportadores de sólidos a granel, identificando los componentes del desarrollo sostenible que han sido considerados para el diseño existente para transportadores de sólidos a granel y evaluar si los resultados de los procesos de diseño propuestos por cada herramienta son conformes a los esperados para un proceso de diseño fundamentado en la sostenibilidad. Se busca identificar qué hace falta en las metodologías actuales para que conduzcan a un diseño sostenible.

Fase 2. Desarrollo de los elementos que deben ser incorporados en el diseño conceptual de transportadores continuos de sólidos a granel para implementar una aproximación sostenible.

El objetivo de la investigación es la incorporación de elementos para la aproximación sostenible del diseño conceptual de transportadores continuos de sólidos a granel. Se propone partir de métodos existentes y desarrollar los elementos adecuados de forma que se incluya el enfoque sostenible en el proceso de diseño.

Fase 3. Verificación de la funcionalidad y el valor agregado de los elementos incorporados, mediante casos de estudio, para el diseño conceptual de transportadores continuos con un enfoque de sostenibilidad.

Se propone realizar casos de estudio, diseño conceptual de transportadores continuos implementando la estructura de diseño propuesta, para una aplicación específica buscando ilustrar el funcionamiento y los resultados obtenidos con la metodología. El resultado será comparado con los obtenidos a partir de metodologías tradicionales, buscando observar el valor agregado a nivel de sostenibilidad que esta brinda y verificar los impactos que permite.

1. Determinación del Conocimiento y Elementos que deben ser Incorporados para implementar una Aproximación Sostenible en el Diseño Conceptual de Transportadores Continuos a Granel

El proceso de diseño conceptual de un transportador continuo de sólidos a granel constituye una tarea principal en el diseño de instalaciones de manejo de materiales granulados y su realización es relevante para garantizar el uso adecuado de las instalaciones y la eficiencia del proceso. A continuación, se analizan distintos métodos existentes para el diseño conceptual de transportadores, buscando determinar el conocimiento y elementos que deben ser incorporados para implementar una aproximación sostenible.

El diseño de transportadores de sólidos a granel es extensivamente fundamentado en el uso de normas como las normas CEMA para las bandas transportadoras [5] y tornillos transportadores [6] y la norma británica BS para elevadores de cangilones [7]. Estas normas son específicas para una familia de transportadores con un enfoque hacia el diseño básico y detallado, por lo que se requiere recurrir a otras fuentes para la etapa de diseño conceptual.

En literatura especializada se presentan métodos para el diseño conceptual de sistemas de transporte de sólidos, el libro *Transportadores Mecánicos: Selección y Operación* [8] contiene uno de estos métodos, en este se parte de un listado de transportadores y se eliminan aquellos que no sean adecuados para un problema de diseño de acuerdo a sus características operacionales, teniendo en cuenta el tipo de material, propiedades como fluidez, abrasividad, tamaño de grano, y también considerando el tipo de proceso que puede manejar cada opción en función del tipo de trayecto, distancia de transporte y flujo de material. En cada capítulo del libro se presentan las características de una familia de transportadores mecánicos, con esta información se define si un tipo de sistema es adecuado para un problema de diseño especificado previamente.

Este tipo de métodos incluidos en literatura especializada presentan el inconveniente de un diseño conceptual fundamentado en características del material y del movimiento requerido, es decir, un enfoque puramente operacional sin incluir otros aspectos determinantes en un proceso de diseño como las variables económicas asociadas. Además, la información utilizada no se encuentra condensada lo que provoca que su implementación tome mucho tiempo.

Ante la complejidad del proceso de diseño conceptual y la importancia de su realización, los diseñadores de estos equipos han desarrollado herramientas para asistir esta fase de diseño. Los sistemas expertos han sido ampliamente aplicados a los problemas de diseño conceptual de transportadores y equipos de manejo de materiales en general, con la ventaja de menor tiempo de implementación comparado con los métodos propuestos en literatura especializada. Algunas de las más exitosas implementaciones de sistemas expertos para diseño de equipos de manejo de material, incluyendo transportadores continuos de sólidos a granel, son discutidas a continuación.

Entre 1984 y 1990 fueron desarrollados los primeros sistemas expertos para selección de equipos de manejo de material, siendo estos SEMH [9], MATHES [10] y MATHES II [11]. Estos sistemas utilizaban una base de conocimientos fundamentada en reglas que consideran los parámetros de operación y las características del material para determinar el tipo de equipo apropiado. Estos sistemas no incluyeron transportadores de sólidos a granel.

El primer sistema experto en considerar transportadores de sólidos a granel fue EXCITE [12], desarrollado en 1992. Este sistema experto considera 35 tipos de equipos y 28 materiales y usa una base de conocimientos y razonamiento hacia adelante, el sistema experto realiza preguntas y progresivamente avanza hacia la selección del sistema, buscando descartar aquellos sistemas cuyas características no cumpla con un parámetro operacional requerido o no puedan manejar un material con ciertas características. Las preguntas buscan reducir el espacio de soluciones, pasando de los 35 equipos hasta definir aquellos que cumplen con los requerimientos del problema de diseño en función de las características del material, la ruta de movimiento, la automatización requerida y la exactitud.

En 1996 fue desarrollado ICMESE [1] un sistema experto para selección de equipos de manejo de material, incluyendo transportadores de sólidos a granel, que supera las limitaciones de sus precedentes al considerar mayor número de equipos y atributos. Este sistema experto soporta la selección de una oferta comerciales específica. El sistema experto utiliza 29 atributos que son agrupados en el tipo de movimiento, características del material, requerimientos operacionales y restricciones de espacio. La selección del sistema comercial se realiza al implementar una base de conocimientos y reglas del tipo si-entonces. La base de conocimientos asigna atributos a cada tipo de equipos y por medio de las reglas si-entonces reduce el espacio de búsqueda al descartar los equipos que no cuenten con los atributos requeridos por el usuario; el funcionamiento es similar a un árbol de decisiones.

En 2001 se propone el sistema experto MHESA [3] para la selección de equipos de manejo de material, incluyendo transportadores de sólidos a granel. Este sistema experto hace uso de una base de conocimientos y reglas tipo si-entonces para asistir la selección del equipo evaluando requerimientos de movimiento, material y restricciones de

espacio. Además, complementa el proceso de selección con un proceso de análisis jerárquico (*AHP*) utilizando como criterios de selección el desempeño del equipo, características técnicas y económicas.

En 2005 fue introducido el modelo de selección de equipos de manejo de material usando el proceso de análisis jerárquico (*AHP*) por Chakraborty [13]. Este método permite definir el sistema más adecuado para un ambiente de operación entre transportadores, camiones, grúas y equipos auxiliares. En este la selección multi-criterio utilizando el método *AHP* se fundamenta en las características del material, las características del movimiento requerido, el costo de adquisición del sistema, la capacidad de control de la operación y el espacio disponible.

Un sistema experto basado en conocimiento que selecciona el tipo de transportador de sólidos basado en la puntuación asignada a cada uno de ellos fue introducido en 2004. El sistema utiliza el Método de Evaluación Ponderada para asignar la puntuación de acuerdo a la probabilidad del cumplimiento de atributos por parte de los equipos evaluados y utiliza Criterios de Valor Esperado para la toma de decisión. Este sistema considera únicamente atributos operacionales en cuanto a movimiento, funciones y características del material [2].

El sistema experto FUMAHES [4] fue introducido en 2005, utilizado para la selección de equipos de manejo de material incluyendo transportadores de sólidos a granel. El sistema experto consiste en una base de datos que incluye información detallada sobre las propiedades de los equipos, un sistema basado en reglas para determinar el tipo de equipo más apropiado y realizar la decisión final frente a distintas alternativas del mismo tipo de equipo utilizando principios de diseño axiomático, que incluye un enfoque de axioma de información difusa. Sus atributos también se basan en movimiento, material, características operacionales y restricción de espacio.

La Tabla 1 resume las características de las herramientas utilizadas extensivamente para el diseño conceptual de transportadores continuos de sólidos a granel.

Al analizar la Tabla 1 nos encontramos con que los criterios de diseño implementados en las herramientas estudiadas se enfocan principalmente en características técnicas. Algunas herramientas como MHESA [4] y el Modelo de selección de usando *AHP* [13] tiene en consideración otros criterios relevantes como el económico al considerar el costo inicial y el costo de adquisición del equipo, respectivamente. Aunque en estas herramientas consideran características económicas, estas presentan poca importancia en el proceso de toma de decisiones ya que los criterios operacionales a nivel de las características del material y del movimiento se muestran con mayor relevancia en la toma de decisiones.

Tabla 1. Sistemas expertos para selección de equipos de manejo de material

Herramienta de diseño	Métodos	Criterios de diseño
EXCITE [9]	Base de conocimientos Razonamiento hacia delante	Características del movimiento Características del material Automatización requerida
ICMESE [1]	Base de conocimientos Reglas del tipo si-entonces	Características del movimiento Características del material Desempeño en operación Restricción de espacio.
MHESA [3]	Base de conocimientos Reglas del tipo si-entonces Proceso de Análisis Jerárquico	Características del movimiento Características del material Desempeño operación Restricción de espacio AHP: Desempeño tecno-económico
Modelo de selección de usando <i>AHP</i> [13]	Proceso de Análisis Jerárquico	Características del movimiento Características del material Costo de adquisición Automatización requerida Restricción de espacio
Sistema experto basado en conocimiento [2]	Base de conocimiento Método de Evaluación Ponderada Criterios de Valor Esperado	Características del movimiento Características del material Funciones requeridas
FUMAHES [4]	Base de conocimientos Reglas del tipo si-entonces. Axioma de información difusa.	Características del movimiento Características del material Restricción de espacio

De acuerdo a lo analizado, el diseño conceptual apoyado en los sistemas expertos presentados permite proponer soluciones y definir la más adecuada para un entorno de diseño considerando principalmente requerimientos operacionales.

La sostenibilidad ha comenzado a integrarse en las estrategias empresariales debido a la presión sobre las industrias para ampliar su responsabilidad más allá del desempeño económico debido a fenómenos de alto impacto como el cambio climático [14]. En la última década, distintos sectores industriales han trabajado hacia el balance de los objetivos del desarrollo sostenible [15] lo que ha promovido el desarrollo de metodologías para el diseño desde una perspectiva sostenible como es el caso de la herramienta de evaluación sostenible de sistemas de generación de potencia [16], la herramienta de selección de materiales y sistema experto para el diseño sostenible [17], el sistema de inferencia difusa para selección sostenible de proveedores [18] y el criterio para selección sostenible de equipos de construcción [19].

A pesar de la tendencia hacia el enfoque de sostenibilidad en las más recientes herramientas de diseño, no existe una metodología para transportadores continuos de sólidos a granel que integren el concepto de sostenibilidad en el proceso de diseño conceptual. Las metodologías incluidas en la literatura especializada y los sistemas expertos presentan un enfoque principalmente operativo, con algunos sistemas expertos que consideran criterios económicos. Se requiere de un enfoque sostenible en el diseño de transportadores para que además de implementar equipos que cumplan con los requerimientos operacionales, se diseñen equipos teniendo en cuenta su desempeño a nivel ambiental, social y económico.

Además, se ha encontrado poca información sobre caracterización del impacto sobre el ambiente y la sociedad por parte de sistemas de transporte continuo en operación. Aunque se evidencia la existencia de un marco regulatorio a nivel de seguridad y salud, han sido desarrollados pocos estudios sobre temas relevantes como las emisiones de particulado, el ruido y los desechos derivados de los procesos de transporte de sólidos.

A continuación, detallamos las brechas para el diseño sostenible de transportadores continuos utilizando las metodologías y herramientas existentes:

1. Las metodologías y herramientas existentes para el diseño de transportadores continuos abordan el problema de diseño desde un punto de vista principalmente operacional sin considerar el enfoque sostenible.
2. La mayoría de las metodologías y herramientas existentes que incorporan un enfoque económico consideran principalmente en el precio de compra del sistema y algunos componentes del costo operacional, sin considerar otros rubros relevantes como el costo de mantenimiento, el costo de instalación y el costo de equipos auxiliares.
3. Existe reducida información sobre la caracterización del impacto sobre el ambiente y la sociedad por parte de sistemas de transporte continuo en operación.

Identificadas las brechas de las herramientas y metodologías existentes para el diseño sostenible de transportadores continuos, se propone determinar los elementos que deben incorporarse en cada fase del diseño conceptual para alcanzar una aproximación sostenible de este proceso. Para ello se inicia analizando las fases del diseño conceptual:

Definición del problema de diseño

- Definición del diseño mediante la especificación del sistema.

Diseño conceptual

- Definición de las alternativas de solución.
- Estimación del desempeño de las alternativas en relación con los criterios de decisión.
- Priorización de las alternativas con base en los criterios de decisión establecidos.

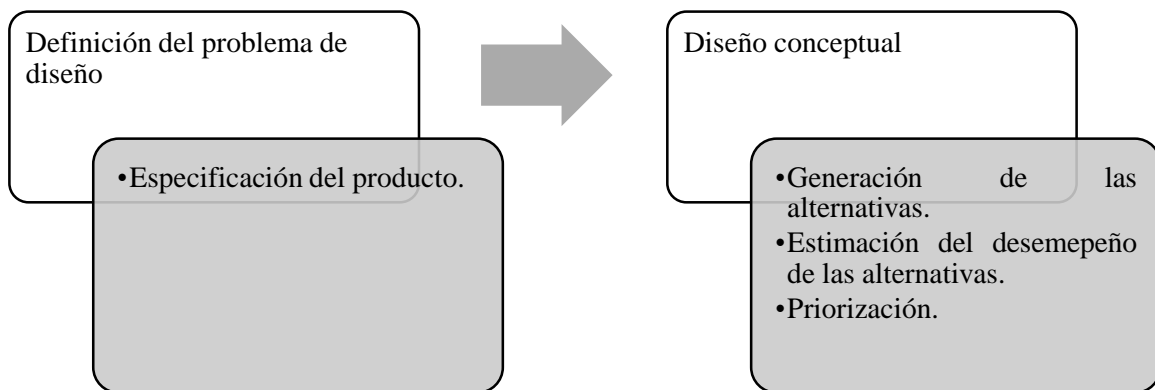


Figura 1. Fase del proceso de diseño a incluir en la metodología.

Partiendo de las fases de diseño identificadas y las actividades asociadas a cada una, se proponen incorporar los siguientes elementos para soportar una aproximación sostenible en el diseño conceptual de transportadores continuos.

1. Un método que permita la generación de alternativas desde un enfoque operacional. Con esto se separa el problema, permitiendo considerar los requerimientos operacionales al generar las alternativas y realizar la priorización con un enfoque puramente sostenible.
2. Un listado de especificaciones para el diseño desde una perspectiva sostenible: Este paso implica definir las características o prestaciones que debe cumplir el sistema obtenido para considerar que el diseño fue exitoso, por tanto, las especificaciones deben incluir un enfoque sostenible adicional al operativo tradicionalmente abordado.
3. Una metodología priorización con base en los criterios sostenibles: En este paso se debe establecer una metodología para priorizar las alternativas en función de su desempeño sostenible.
4. Modelos para estimar el desempeño sostenible de las alternativas: Para realizar la selección es necesario establecer el nivel de desempeño sostenible de las alternativas permitiendo la comparación entre ellas.

2. Desarrollo de los Elementos que deben ser incorporar en el Diseño Conceptual de Transportadores Continuos de Sólidos a Granel para implementar una Aproximación Sostenible

A continuación, se desarrollan cada uno de los elementos identificados en la fase anterior para soportar el diseño conceptual de transportadores con una aproximación sostenible.

6.1. Definición del listado de especificaciones para el diseño desde una perspectiva sostenible

La especificación del sistema es la manifestación explícita del conjunto de características o prestaciones que deben guiar su diseño y su desarrollo [20]. Para el diseño sostenible de transportadores continuos de sólidos a granel, las especificaciones deben incorporar conceptos de sostenibilidad de manera que guíen el diseño para obtener un sistema que su desempeño sea adecuado desde una perspectiva sostenible, considerando la economía, el ambiente y la sociedad.

Se requiere un listado de especificaciones de modo que previamente estén definidas las características o prestaciones a estipular para guiar el proceso hacia un diseño que cumpla con los requerimientos operativos y de sostenibilidad.

Las especificaciones del sistema pueden ser de dos tipos, especificaciones necesarias o especificaciones convenientes. Las especificaciones necesarias deben ser cumplidas, de lo contrario el sistema no cumple con su objetivo mientras que las especificaciones convenientes son todas aquellas que, sin ser estrictamente necesaria para el objetivo del sistema, mejoraría determinados aspectos de él y no es obligatorio su cumplimiento [20].

Se propone que las especificaciones necesarias sean de tipo operativo para garantizar que el diseño tenga la capacidad de transportar el tipo y flujo de material requerido a través de la trayectoria necesaria. Las especificaciones convenientes se enfocan en concepto de sostenibilidad de tipo económico, ambiental y social dado que puede haber conflicto entre ellas y especificaciones en función de la sostenibilidad demasiado ambiciosas pueden repercutir en un aumento excesivo en el coste del sistema, en un aumento de la dificultad de fabricación o en la reducción de la robustez de su funcionamiento, por lo que es beneficioso que sean catalogados como especificaciones convenientes.

El diseñador que haga uso de esta herramienta de diseño debe definir cada especificación necesaria utilizando valores metas y decidir que especificaciones convenientes incluirá en su proceso de diseño.

Para la definición de las especificaciones necesarias se ha consultado literatura especializada para identificar el tipo de características operativas sugeridas para definir diseño de distintos tipos de transportadores. En general se considera el flujo de material, la distancia de transporte, las características del trayecto a recorrer, el número de entradas y salidas y las características del material que influyen sobre la operación del equipo y su idoneidad para la implementación.

La Tabla 2 muestra las especificaciones necesarias a considerar y el tipo de definición de la especificación para facilitar su implementación.

Tabla 2. Escalas para definición de especificaciones necesarias (se incluye códigos).

Especificación Necesarias	Definición de especificación
Flujo de material	Numérica [TPH]
Distancia de transporte	Numérica [m]
Ángulo de elevación	Numérica [°]
Temperatura del material	Numérica [°C]
Puntos de entrega	Binaria [Único (U.)/Múltiples (Mu.)]
Puntos de entrada	Binaria [Único (U.)/Múltiples (Mu.)]
Tipo de Sistema	Cualitativo [Fijo/Móvil]
Tipo de trayecto	Binaria [Horizontal (H.)/Vertical (V.)/Inclinado (I.) /No-lineal (N.L)]
Funciones adicionales	Cualitativa [Ninguna (N.)/ Auto-alimentación (Au.) /Mezcla (Me.) /Calentamiento (C.)-Enfriamiento (E.)/Compactación (Co./Reducción (Re.)]
Densidad	Numérica [kg/m ³]
Alta resistencia química	Binaria [Sí/No]
Material frágil	Binaria [Sí/No]
Material polvoroso	Binaria [Sí/No]
Material abrasivo	Cualitativo [No-abrasivo(N.A.)/Media(M.)/Moderada (Mo.)/Extrema (E.)]
Tamaño material	Cualitativo [Muy fino(M.F.)/Fino(F.)/Granular(G.)/aterronado(At.)]
Material corrosivo	Cualitativo [No corrosivo (N.C.)/ Media (M.)/ Alta (A.)]
Fluidez del material	Cualitativo [Alta(A.)/Buena(B.)/Media(M.)/Baja(B.)]
Material Húmedo	Binario [Sí/No]
Otras Características	Cualitativo [Explosivo/Aceites/Higroscópico/Genera estática]

El reto queda en establecer las especificaciones convenientes enfocadas conceptos de sostenibilidad. Para su definición se propone considerar los indicadores de desarrollo sostenible, que constituyen estadísticos que permiten medir la capacidad de satisfacer las necesidades económicas, sociales y ambientales actuales sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades futuras. Estos permiten evaluar el nivel de sostenibilidad de diferentes sectores de la sociedad como los gobiernos locales y nacionales, comunidades e industrias para definir la dirección de cambio hacia el desarrollo sostenible.

Los indicadores de sostenibilidad a utilizar deben ser adecuados para medir el desempeño sostenible en el ciclo de vida de transportadores continuos de sólidos a granel. No hay evidencia del desarrollo de indicadores para evaluar específicamente este tipo de sistemas. Para establecer los indicadores de sostenibilidad requeridos se propone realizar la revisión de *Sustainable Reporting Guideline* [21] publicado por *Global Reporting Initiative* (GRI) que contiene un inventario de indicadores que se considera un referente y ha sido extensivamente usado en la industria. El GRI reconoce que cada sector de la industria debe desarrollar indicadores adicionales, específicos para el sector que reflejen las características individuales de las diferentes actividades de la industria usando su reporte como referente.

Se propone desarrollar un inventario de indicadores basados en las categorías de indicadores propuestas por el GRI, adaptando u omitiendo los que se consideren inadecuados para el caso. Se adicionan los indicadores necesarios para obtener un inventario propio complemente definido para el diseño de transportadores continuos de sólidos a granel. Se usan como referentes inventarios específicos para industrias en las cuales son usados estos transportadores.

La Tabla 3 muestra las distintas categorías de indicadores propuestos por el GRI, señalando los que serán implementados en el inventario para el caso de diseño de transportadores continuos de sólidos a granel y mostrando los indicadores a incluir en cada categoría seleccionada con adaptaciones en algunos de ellos de acuerdo al caso estudiado.

Tabla 3. Indicadores seleccionados a partir del inventario del GRI.

Indicadores económicos	Indicadores Ambientales	Indicadores Sociales
<ul style="list-style-type: none"> • Cientes • Proveedores <ul style="list-style-type: none"> ▪ Costo capital • Empleados <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inversión en capacitación ▪ Inversores • Sector público <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inversión en control de la contaminación 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cantidad total de material utilizado para fabricación ▪ Nivel de reciclabilidad de los materiales • Energía <ul style="list-style-type: none"> ▪ Consumo de energía total • Agua <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cantidad total de agua utilizada y reciclada ▪ Biodiversidad • Emisiones <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gases y particulado ▪ Efluentes • Desechos <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cantidad total de desechos ▪ Proveedores ▪ Transporte 	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajo digno <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nivel de seguridad ▪ Impacto en la salud de los empleados ▪ Derechos humanos ▪ Sociedad ▪ Responsabilidad del producto

Se considera que con los indicadores de la tabla 3 el proceso de diseño de transportadores continuos no está completamente definido por lo que se usan otros inventarios para proponer indicadores adicionales. Se revisa el marco general para los indicadores del desarrollo sostenible en la industria propuesto por Azapagic [15], los indicadores para la industria minera y de minerales desarrollado por Azapagic [22] dado el amplio uso de transportadores continuos en este sector y los indicadores para producción verde: una guía para el desarrollo sostenible desarrollada por una dependencia de las Naciones Unidas [23]. Por medio de esta revisión se definen los indicadores faltantes para la completa definición de las especificaciones convenientes.

Para establecer las especificaciones necesarias enfocadas en los requerimientos operativos se usan las entradas establecidas por Apple [24], Fayed & Skocir [8], McGlinchey [25] y Fruchtbaum [26] para la completa definición de la información necesaria para el diseño de transportadores de sólidos a granel.

La tabla 4 muestra las especificaciones necesarias y las especificaciones convenientes. Se considera que las especificaciones están completamente definidas para que el diseño de un transportador continuo de sólidos a granel cumpla con los requerimientos operacionales y los conceptos de sostenibilidad apropiados para estos sistemas. Las especificaciones convenientes buscan dirigir el proceso de diseño para que la solución obtenida sea satisfactoria en términos económicos minimizando el costo capital y operativo; en términos ambientales reduciendo los impactos negativos sobre el ambiente a nivel de consumo de energía, intensidad en materia prima, uso del agua, emisiones de particulado y polvo y el ruido producido, y en términos sociales al garantizar la seguridad y salud del personal que interactúen con los equipos procurando el bienestar y la salud pública.

Tabla 4. Especificaciones definidas para el caso de transportadores continuos de sólidos a granel.

Especificaciones desde el enfoque operativo		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo de material ▪ Distancia de transporte ▪ Ángulo de elevación ▪ Puntos de entrada ▪ Puntos de entrega ▪ Sistema fijo o móvil ▪ Tipo de trayectoria ▪ Funciones adicionales ▪ Resistencia química ▪ Capacidad de transportar materiales de acuerdo a: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Densidad ▪ Fragilidad ▪ Abrasividad ▪ Polvorosidad ▪ Tamaño del material ▪ Corrosividad ▪ Fluidez ▪ Humedad ▪ Temperatura ▪ Otras características 		
Especificaciones desde el enfoque de sostenibilidad		
Económicos	Ambientales	Sociales
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costo de propiedad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consumo de energía total ▪ Cantidad recursos en fabricación ▪ Potencial de reciclaje y reúso ▪ Cantidad total de agua utilizada y reusada ▪ Emisión de particulado-polvo ▪ Ruido 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nivel de seguridad ▪ Impacto en la salud del personal

6.2. Establecimiento del método para generación de las alternativas de solución

Dado que se trabaja con especificaciones necesarias y convenientes, consideramos adecuado proponer una metodología que permita generar un campo de alternativas que incluya todos los sistemas capaces de realizar las operaciones requeridas, para luego priorizar estas alternativas en función de su desempeño desde una perspectiva sostenible. Para el método de generación de alternativas se propone realizar una base de conocimientos que contenga todas las posibles soluciones a diseñar con los atributos de desempeño operacional de estas y luego desarrollar una estrategia de selección basada en el cumplimiento de las especificaciones mediante sus atributos.

Primeramente, se debe definir todos los sistemas a considerar en el proceso de diseño, es decir, las posibles alternativas. Se ha utilizado literatura especializada para identificar los transportadores continuos de sólidos a granel comúnmente empleados con los cuales se puedan abordar las distintas condiciones de operación a considerar. La Tabla 5 muestra el listado de todas las posibles soluciones, clasificando los transportadores por familias y tipos. Este listado está basado en la clasificación de equipos propuesta por Apple [24] y Woodcock [27].

Tabla 5. Tipos y subtipos de transportadores a considerar como posibles alternativas.

Familia de Transportadores	Posibles Alternativa N°	Tipos de transportador
Banda Transportadora	1	Banda grado 1
	2	Banda grado 2
	3	Banda con resistencia a aceites
	4	Banda con resistencia media a aceites
	5	Banda EPDM
	6	Banda <i>flexowell</i>
Transportador de cadenas	7	Transportador de placas
	8	Transportador de arrastre
	9	Transportador rascador
Tornillo Transportador	10	Transportador tipo En-Masse
	11	Tornillo
Elevador de Cangilones	12	Tornillo vertical
	13	Descarga centrífuga
	14	Descarga continua
	15	Cangilones de súper capacidad con descarga continua
	16	Descarga positiva
Transportador Neumático	17	Fase diluida en sistema de presión positiva con ventilador
	18	Fase diluta en sistema de presión negativa con ventilador
	19	Fase diluta en sistema de presión positiva con <i>blower</i>
	20	Fase diluta en sistema de presión negativa con <i>blower</i>
Transportador Hidráulico	21	Fase densa con un compresor y un tanque de soplado
	22	Homogéneo
	23	Heterogéneo

El método de generación de alternativas contempla el uso de una base de conocimiento que requiere de un listado de las posibles alternativas, caracterizadas mediante sus atributos operacionales. Estos atributos deben estar definidos en función de las especificaciones necesarias dado que la definición de las alternativas se realiza al comparar las prestaciones de los sistemas considerados con las especificaciones necesarias, los sistemas cuyas prestaciones cumplan con las especificaciones se consideran una alternativa.

Se deben definir los atributos de forma conveniente para el proceso de generación de alternativas, es decir, que los atributos estén definidos de forma tal que se facilite descartar aquellos sistemas que no cumplan con las especificaciones necesarias. Además, los atributos han sido definidos de forma tal que faciliten definir el tipo de transportador más conveniente dentro de cada familia de forma que solo un tipo de transportador perteneciente a una misma familia sea considerado una alternativa.

Tabla 6. Listado de atributos para proceso de generación de alternativas.

N°	Atributos
1	Capacidad recomendada [Ton/h]
2	Máxima distancia de transporte [m]
3	Máximo ángulo de elevación [°]
4	Máxima temperatura [°C]
5	Número máximo de puntos de entrada
6	Máximos puntos de entrega
7	Tipo de trayecto
8	Funciones adicionales
9	Alta resistencia química
10	Manejo de material frágil
11	Manejo material polvoroso
12	Máxima abrasividad admisible
13	Tamaño admisible
14	Máxima corrosividad
15	Fluidez recomendada
16	Manejo de material húmedo

Las características del material y las denominaciones utilizadas para el tamaño de grano, fluidez, abrasividad, corrosividad, son basadas en la información suministrada por *Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA)*.

Se procede a definir los atributos para las posibles alternativas.

Las bandas transportadoras presentan la capacidad más amplia dentro de los sistemas de transporte continuo en cuanto a tipo de material a transportar, flujo de material y distancias de transporte. El principal cambio en la configuración de estos sistemas que se refleja en una variación en sus atributos operacionales es el cambio del tipo de banda. El tipo de banda no afecta la capacidad y longitud de transporte, pero incide sobre el tipo de material a transportar y la temperatura de este, por ejemplo, se usará bandas grado 2 solo si se requiere resistencia extrema a la abrasión y bandas EPDM si se trabaja con materiales a temperaturas superiores a 70 °C. Los atributos para los tipos de bandas transportadoras se encuentran en la Tabla 7 y están basados en la información de la Norma CEMA [5].

Tabla 7. Atributos operativos de las bandas transportadoras.

	Banda grado 1	Banda grado 2	Banda con resistencia a aceites	Banda con resistencia media a aceites	Banda EPDM	Banda flexowell
Capacidad recomendada [Ton/h]	Hasta 20000					
Máxima distancia de transporte [m]	35000					
Máximo ángulo de elevación [°]	20				30	
Máxima temperatura [°C]	70				200	70/200
Puntos de entrada	Único					
Puntos de entrega	Múltiples					
Tipo de trayecto	Horizontal					
	Inclinado					
	Hor.-Inc.					
	Ninguna					
Funciones adicionales	Ninguna					
Alta resistencia química	No	No	Sí	Sí	No	Sí
Manejo de material frágil	Sí					
Manejo material polvoroso	Sí (Puntos de transferencia cerrados con sistema de control de polvo)					
Máxima abrasividad admisible	Baja	Extrema	Moderada			
Tamaño admisible	Muy fino a granular/ Aterronado/ Irregular/ Fino en inclinados					
Máxima corrosividad	Baja	Baja	Alta	Media	Baja	Baja/Alta
Fluidez recomendada	Baja (Adicionando sistema de limpieza a la banda)-Alta					
Manejo de material húmedo	Sí (características especiales requeridas)					

Dentro de la familia de transportadores de cadenas existen divisiones dependiendo de la configuración del sistema y el tipo de elemento adjunto a la cadena para mover el material. Los atributos de los distintos tipos de transportadores de cadenas son mostrados en la Tabla 8 y están basado en la información presentada por Fayed & Skocir [8] y Woodcock & Mason [27]. Aunque los transportadores de cadenas tienen limitada capacidad en cuanto al flujo máximo y distancia de transporte máxima, algunos ofrecen funciones adicionales y capacidad de operar en condiciones severas como materiales abrasivos, con poca capacidad de flujo y a muy altas temperaturas lo que los ideales para algunas aplicaciones. La definición del tipo de transportador de cadena como alternativa estará ligada a la capacidad y distancia requerida dada la notable diferencia del transportador de placa y En-Masse con respecto al de arrastre y rascador, los dos primeros serán considerados para aplicaciones de mayor capacidad y distancia de transporte. La fluidez del material es otro atributo determinante para la definición de las alternativas, se implementará transportador de arrastre cuando la fluidez sea baja y transportador rascador cuando sea buena dejando al transportador de placas y En-Masse para materiales con fluidez alta y media, respectivamente.

Tabla 8. Atributos operativos de los transportadores de cadena.

	Placas	Arrastre	Rascador	En-Masse
Capacidad recomendada [Ton/h]	Hasta 1200	Hasta 40	Hasta 300	Hasta 1000
Máxima distancia de transporte [m]	250	40	30	150
Máximo ángulo de elevación [°]	30	0	0	90
Máxima temperatura [°C]			600	
Máximos puntos de entrada	Único		Múltiples	
Máximos puntos de entrega	Único		Múltiples	
Tipo de trayecto	Horizontal Hor.-Incl.	Horizontal	Horizontal	Horizontal Vertical Hor.-Vert. Hor.-Incl.
Funciones adicionales	Auto- alimentación	Calentamiento- Enfriamiento	Calentamiento- Enfriamiento	Auto- alimentación
Resistencia a químicos	Sí (características especiales requeridas)			
Manejo de material frágil	Sí	Sí	Sí	Sí
Manejo de material polvoroso	Sí	Sí	Sí	Sí
Máxima abrasividad admisible	Extrema	Extrema	No abrasivo	Media
Tamaño admisible	Fino a granular	Muy fino a granular	Fino a granular	Muy fino a granular
Máxima corrosividad admisible	Alta	Media	Media	Media
Fluidez recomendada	Alta	Baja	Buena	Alta
Manejo de material húmedo	Sí (características especiales requeridas)			

La Tabla 9 muestra los diferentes atributos operativos de los tipos de tornillos transportadores basado en la información proporcionada por Fayed & Skocir [8], Woodcock & Mason [27] y la norma CEMA N°350 [6]. Dentro de los atributos de los tornillos rígidos destaca la variedad de funciones adicionales como la idoneidad para procesos de transferencia de calor y de mezcla y la auto-alimentación, que bajo diseño adecuado del paso y diámetro del tornillo se puede lograr sin requerimiento de dispositivos adicionales. Los tornillos verticales permiten operaciones de levantamiento de materiales, pero operando a menor capacidad y distancia que los tornillos rígidos.

Tabla 9. Atributos operativos de los transportadores de cadena.

	Tornillo Rígido	Tornillo Vertical
Máxima capacidad [Ton/h]	Hasta 2000	Hasta 170
Máxima distancia de transporte [m]	200	15
Máximo ángulo de elevación [°]	45	90
Máxima temperatura [°C]	250	
Máximos puntos de entrada	Múltiples	Único
Máximos puntos de entrega	Múltiples	Único
Tipo de trayecto	Horizontal Inclinado	Vertical
Funciones adicionales	Auto-alimentación Enfriamiento Calentamiento Mezcla Compactación Reducción	
Resistencia a químicos	Sí (Características especiales requeridas)	
Manejo de material frágil	No	
Manejo de material polvoroso	Sí	
Máxima abrasividad admisible	Moderada (Características y materiales especiales)	
Tamaño admisible	Muy fino a granular	
Máxima corrosividad admisible	Alta (Materiales especiales)	
Fluidez recomendada	Media (Características especiales)	
Manejo de material húmedo	Sí (Características especiales)	

La Tabla 10 muestra los diferentes atributos operativos de los tipos de elevadores de cangilones basado en la información proporcionada por Fayed & Skocir [8], Woodcock & Mason [27], Fruchtbaum [26] y estándares de fabricantes. Las principales diferencias entre los tipos de cangilones la constituyen los métodos de carga y descarga, esto influye en la capacidad de transporte y el tipo de material a transportar. Por ejemplo, los elevadores de descarga continua y de súper capacidad con menor velocidad de operación pueden manejar materiales frágiles y abrasivos y los elevadores de descarga positiva pueden transportar material con baja fluidez dada la posición de cangilón en el punto de descarga. La definición del tipo de elevador como alternativa dependerá entonces de la abrasividad del material, la fluidez y la capacidad requerida dado que un material extremadamente abrasivo con fluidez media puede ser transportador en elevador continuo o de súper capacidad, pero si el flujo requerido es menor a 170 TPH se seleccionará como alternativa al elevador continuo.

Tabla 10. Atributos operativos de los elevadores de cangilones.

	Descarga centrifuga	Descarga continua	Súper capacidad	Descarga positiva
Máxima capacidad [Ton/h]	Hasta 184	Hasta 170	170-465	Hasta 40
Máxima distancia de transporte [m]			60	
Máximo ángulo de elevación [°]			90	
Máxima temperatura [°C]			540	
Máximos puntos de entrada			único	
Máximos puntos de entrega			Único	
Tipo de trayecto			Inclinado Incl.-Vert. Vertical	
Funciones adicionales			Ninguna	
Resistencia a químicos	Sí (características especiales requeridas)			
Manejo de material frágil	No	Sí	Sí	Sí
Manejo de material polvoroso	Sí			
Máxima abrasividad admisible	No- abrasivo	Extrema	Extrema	Moderada
Tamaño admisible	Fino a granular	Muy fino a granular	Muy fino a aterronado	Muy fino a granular
Máxima corrosividad admisible	Media (Utilizando bandas resistentes a la corrosión)			
Fluidez recomendada	Buena	Media	Media	Baja
Manejo de material húmedo	No	No	Sí	Sí

La Tabla 11 muestra los diferentes atributos operativos de los sistemas de transporte neumático basado en la información proporcionada por Mills [28] y Fruchtbaum [26]. En las principales diferencias entre tipos de sistemas se encuentra la capacidad y distancia de transporte, al aumentar estas se requiere un sistema que garantice mayor suministro de presión. Otra diferencia se encuentra en la abrasividad del material, los sistemas en fase densa pueden transportar materiales de mayor abrasividad dado que operan a velocidades menores comparado con los sistemas de fase diluida. Los atributos de los que dependerá la definición de un tipo de transportador neumático como alternativa será la capacidad, distancia de transporte y la abrasividad del material.

Tabla 11. Atributos operativos de los transportadores neumáticos.

	Diluta presión positiva ventilador	Diluta presión negativa ventilador	Diluta presión positiva blower	Diluta presión negativa blower	Densa compresor y tanque de soplado
Máxima capacidad [Ton/h]	20-100	1-20	100-200	200-300	20-400
Máxima distancia de transporte [m]	60	30	60	150	2500
Máximo ángulo de elevación [°]	90 ° (No se recomienda usar inclinado por el asentamiento)				
Máxima temperatura [°C]	200				
Máximos puntos de entrada	única	Múltiples	única	Múltiples	Múltiples
Máximos puntos de entrega	Múltiples	única	Múltiples	única	Múltiples
Tipo de trayecto	Horizontal Vertical Hor.-Vert. Mezclado				
Funciones adicionales	Sí (Materiales especiales)				
Resistencia a químicos	No				
Manejo de material frágil	Sí				
Manejo de material polvoroso	Moderada				
Máxima abrasividad admisible	Fino a Granular				
Tamaño admisible	Alta (Materiales especiales)				
Máxima corrosividad admisible	Buena				
Fluidez recomendada	Media				
Manejo de material húmedo	No				

La Tabla 12 muestra los diferentes atributos operativos de los sistemas de transporte hidráulicos basado en la información proporcionada por Woodcock & Mason [27] y Jacobs [29]. Se encuentra que la principal diferencia en los tipos de transportadores hidráulicos está en el modo de transporte, que es determinado por el tamaño del material; el modo de transporte homogéneo ocurre para partículas muy finas. Otros atributos operativos en cuanto a capacidades y tipos de material admisibles para operación no difieren significativamente entre modos de transporte. No existe una diferencia considerable en la configuración de estos sistemas, la diferencia está en las características de flujo.

Tabla 12. Atributos operativos de los transportadores hidráulicos.

	Homogéneo	Heterogéneo
Máxima capacidad [Ton/h]		700-1300
Máxima distancia de transporte [m]		800000
Máximo ángulo de elevación [°]	6	6
Máxima temperatura [°C]		-
Máximos puntos de entrada		Único
Máximos puntos de entrega		Único
Tipo de trayecto		Horizontal Hor. - Incl. Inclinado Vertical No-Lineal
Funciones adicionales		Ninguna
Resistencia a químicos		Sí (Materiales especiales)
Manejo de material frágil		Sí
Manejo de material polvoroso		Sí
Máxima abrasividad admisible		Media
Tamaño admisible	Muy fino	Fino/Granular/aterronado
Máxima corrosividad admisible		Media
Fluidez recomendada		Media
Manejo de material húmedo		Sí

Para facilitar el proceso de definición de alternativas por medio del cumplimiento de especificaciones, se desarrolla la Tabla 13 donde se muestran los atributos de todas las posibles alternativas. Se usan los códigos de especificaciones propuestos en la Tabla 2, la numeración de los atributos de la Tabla 6 y la numeración de las posibles alternativas mostrada en la Tabla 5.

Algunas características están presentes en los equipos, pero requieren de características especiales que aumentan el precio de compra del equipo, esto debe ser considerado a nivel económico. En cuanto al atributo funciones adicionales, puede ser deseable que el equipo contenga determinadas funciones, pero todas estas pueden ser desarrolladas en equipos externos, se debe definir si es necesario que la función la realice el equipo transportador.

Tabla 13. Matriz de generación de alternativas basado en cumplimiento de especificaciones.

		Posible Alternativa N°																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
A t r i b u t o s N. ^o	1	20000					1200	40	300	1000	2000	170	184	170	170-465	40	20-100	1-20	100-200	200-300	20-400	700-1300		
	2	35000					250	40	30	150	200	15	60			60	30	60	150	2500	800000			
	3	20			30		30	0	0	90	45	90	90			90°			6	6				
	4	70		600		70/200	600			250		540			200			-						
	5	U.					U.	Mu.			Mu.	U.	U.			U.	Mu.	U.	Mu.	Mu.	U.	U.		
	6	Mu.					U.	Mu.			Mu.	U.	U.			Mu.	U.	Mu.	U.	Mu.	U.			
	7	H./I./H.-I.					H. H.-I.	H.	H.	H./V./ H.- V./ H.-I.	H./I.	V.	I./I.-V./V.			H./V./H.-V.			H./H.-I./I./V./N.L.					
	8	N.					A. C.-E.			A./C.-E./ Me./Com./R.	N.	N.			Me.			N.						
	9	No	N o	Sí	Sí	No	No	Sí (Car. Especiales)			Sí (Car. Especiales)			Sí (Car. Especiales)			Sí (Car. Especiales)			Sí (Car. Especiales)				
	10	Sí					Sí	No	Sí	Sí	No			No	Sí	Sí	Sí	No			Sí	Sí		
	11	Sí (Car. Especiales)					Sí	Sí	Sí	Sí	Sí			Sí			Sí			Sí				
	12	B.	E.	M.			E.	M.	M.	M.	Mo. (Car. Especiales)			N. A.	E.	E.	Mo.	Mo.			E.	M.		
	13	M.F.-G./ A./ I.					F.- G.	M.F.- G.	F.- G.	M.F.- G.	M.F.-G.			F.- G.	M.F.-G.	M.F.- At.	M.F.-G.	F.-G.			M.F.	F./G./At.		
	14	B.	B	M.	M.	N.C.	A.	A.	M.	M.	M.	A. (Car. Especiales)			M. (Car. Especiales)			A. (Car. Especiales)			A.			
	15	B.					A.	M.	B.	M.	M. (Car. Especiales)			B.	M.	M.	B.	B.			M.	M.		
	16	Sí (Car. Especiales)					Sí (Car. Especiales)			Sí (Car. Especiales)			No	No	Sí	Sí	No			Sí				

6.3. Establecimiento de una metodología de priorización de las alternativas con base en los criterios sostenibles

La metodología anteriormente definida permite generar las alternativas que cumplen con las especificaciones necesarias. Ahora se necesita establecer una metodología que permita priorizar entre estas alternativas desde una perspectiva sostenible, lo que consistirá en un problema de toma de decisiones multi-criterio, dado que se deben considerar el ambiente, la sociedad y la economía. El Proceso Analítico Jerárquico, *AHP* por sus siglas en inglés, es una poderosa herramienta para resolver problemas de toma de decisiones multi-criterio y se considera adecuado para el caso abordado.

La implementación del método *AHP* comienza con la descomposición de un problema de decisión en una jerarquía de criterios para facilitar el análisis [30]. Para el caso de diseño conceptual de transportadores continuos desde una perspectiva sostenible se define el problema de manera jerárquica, utilizando los tres pilares de la sostenibilidad, el ambiente, la economía y la sociedad como criterios de priorización y las especificaciones convenientes, basados en los indicadores del desarrollo sostenible como sub-criterios. La Figura 2 resume la estructura *AHP* propuesta para este caso.

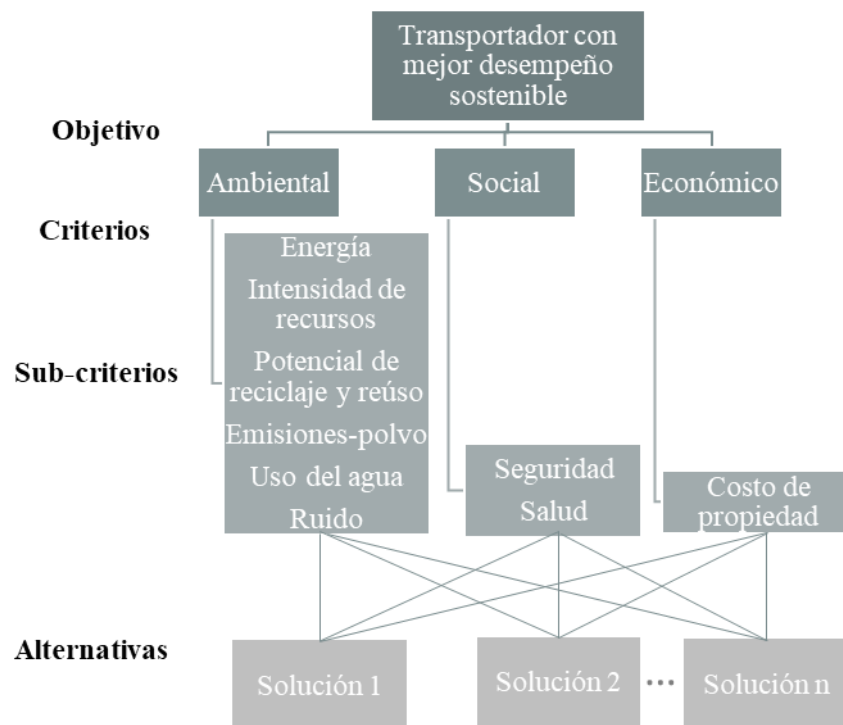


Figura 2. Estructura del Proceso Analítico Jerárquico propuesto.

En la figura 2 se observa que se implementan los tres pilares del desarrollo sostenible como criterios de decisión en el proceso y cada uno de ellos descompuestos en sub-criterios integrados por indicadores de desarrollo sostenible pertenecientes a cada pilar. De los indicadores identificados en la Tabla 3, usados para definir las especificaciones convenientes, se usan como criterios de decisión solamente aquellos que pueda ser significativamente diferentes entre las posibles alternativas, es por esto que criterios como la generación de desechos no han sido considerados.

El criterio ambiental involucra el impacto de la operación del equipo sobre el ambiente teniendo en cuenta el consumo de recursos energéticos y materiales y el impacto sobre el ambiente por emisiones de ruido y material particulado. También se tiene en consideración la viabilidad para del sistema para implementar algún procedimiento de aprovechamiento de material una vez ha llegado a su fin de vida, considerando su capacidad de reciclaje y reúso.

El criterio económico considera el costo de propiedad del sistema considerando el costo en el ciclo de vida del equipo por lo que se considera el costo de compra y gastos atribuibles como el costo de adquisición, el costo operativo a lo largo del ciclo de vida, el costo de disposición y el valor de rescate del equipo. El análisis del costo en el ciclo de vida ha sido aplicado exitosamente en la industria para tomar decisiones optimas en cuanto a la inversión en equipos [31].

El criterio social considera los efectos de la operación del sistema sobre sobre el bienestar del personal y las comunidades cercanas, haciendo énfasis en la salud y seguridad de estas.

La naturaleza de los criterios propuestos conlleva a conflictos en el proceso de priorización, por ejemplo, la reducción del ruido y las emisiones de polvo permiten una mejora en el desempeño ambiental, pero implican un aumento en el costo del sistema por la utilización de sistemas adicionales para el control ambiental. La metodología *AHP* con sus características de toma de decisiones en procesos multi-criterio y su posibilidad de definición de pesos relativos para los criterios permite realizar un proceso de priorización ante la presencia de criterios en conflicto, lo que lo hace adecuado para una priorización fundamentada en la sostenibilidad.

El método *AHP* permite definir el grado de importancia de los criterios, los sub-criterios y de las alternativas en función de cada sub-criterio mediante procedimiento de comparación pareada, descrito a continuación:

1. Desarrollo de la matriz de comparación pareada A ($m \times m$) para m objetos, dónde los objetos pueden ser criterios, sub-criterios o alternativas que buscan ser priorizadas. La matriz A se muestra en la ecuación (1).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dónde a_{ij} indica cuán más importante es el objeto i que el objeto j . La comparación pareada requiere que, para todo i y j , $a_{ii}=1$ y $a_{ij}=1/a_{ji}$ (axioma recíprocal). Los posibles valores asignados a a_{ij} pueden provenir de juicios del diseñador o modelos matemáticos [32] pero es ampliamente usada la escala de importancia relativa propuesta por Saaty [33] que atribuye valores entre 1 y 9 para determinar la preferencia de una alternativa al compararla con otra, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Escala de importancia relativa de Saaty [31].

Escala para alternativa en las filas	Calificación numérica	Recíproco
Extremadamente preferido	9	1/9
Muy fuertemente preferido	7	1/7
Fuertemente preferido	5	1/5
Moderadamente preferido	3	1/3
Igualmente preferido	1	1

Para la comparación pareada entre criterios y sub-criterios para definir su importancia, se propone utilizar la escala de Saaty. Por otro lado, para la comparación pareada entre alternativas en función de sub-criterios, se propone desarrollar para cada tipo de comparación un procedimiento de definición de importancia propio.

La Tabla 15 muestra la implementación de la escala de Saaty durante la comparación pareada de dos sub-criterios. Se muestra una fuerte preferencia por el sub-criterio 2 dado que la preferencia se indica hacia el elemento ubicado en las filas durante la comparación. Además, la Tabla 14 muestra la implementación del axioma recíprocal.

Tabla 15. Implementación de la comparación pareada.

	Sub-criterio 1	Sub-criterio 2
Sub-criterio 1	1	1/5
Sub-criterio 2	5	1

2. Dividir cada entrada en la columna j de A por la suma de todas las entradas en la columna j . Esto resulta en una nueva matriz, A_w , en la cual la suma de las entradas de cada columna es igual a 1. La ecuación (2) muestra esta nueva matriz.

$$A_w = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{1m}}{\sum a_{im}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{m1}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{m2}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{mm}}{\sum a_{im}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. Calcular c_i como los promedios de las filas de la matriz A_w . c_i representa el grado de importancia relativa del objeto i que puede ser un criterio, un sub-criterio o una alternativa.

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{1m}}{\sum a_{im}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{2m}}{\sum a_{im}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{m1}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{m2}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{mm}}{\sum a_{im}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. Verificación de consistencia: además de realizar la comparación pareada para definir grados de importancia, el método *AHP* implementa una verificación de consistencia para corroborar que los juicios realizado por el diseñador han sido adecuados. Por ejemplo, si se afirma que el criterio A es más importante que el criterio B y que el criterio B es más importante que el criterio C, sería inconsistente decir que el criterio C es más importante que el criterio A (Si $A > B$ y $B > C$ es inconsistente $A < C$). Este tipo de inconsistencias es identificado por el método *AHP* garantizando que los juicios realizados sean adecuados. Esta verificación se realiza para cada comparación pareada. Para verificar la consistencia se debe estimar CI/RI . Si CI/RI es ≤ 0.1 , el grado de consistencia es satisfactorio, mientras si CI/RI es > 0.1 , hay inconsistencias y se debe revisar la comparación pareada.

Para estimar CI/RI , primeramente, se debe calcular el producto punto $A.C$ como se muestra en la ecuación (4):

$$A.C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

Luego se calcula λ_{\max} de acuerdo a la ecuación (5):

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{c_i} \quad (5)$$

Posteriormente se calcula el índice de consistencia CI de acuerdo a la ecuación (6):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (6)$$

Para verificar la consistencia se debe estimar entonces CI/RI . RI depende del número de objetos en la comparación pareada y sus valores se muestran a continuación:

m	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

Esta verificación de consistencia debe ser realizada para cada comparación pareada.

5. Luego de implementar la comparación pareada para los criterios, sub-criterios y alternativas en función de cada sub-criterio, se debe realizar la priorización global para definir una clasificación en función del desempeño global de las alternativas. Para ello se usa el vector $C_{Alt. \text{ sub-criterio } i}$ ($1 \times m$) que contiene los c_i que definen la preferencia de las alternativas en función del sub-criterio i y las entradas $c_{\text{sub-criterio } i}$ que definen el grado de importancia de cada sub-criterio en el proceso de decisión. Implementado el producto punto descrito en la ecuación (7) se obtiene la matriz D ($m \times 1$), las entradas D_i indican la preferencia global, preferencia multi-criterio, de la alternativa i . El mayor valor D_i pertenece a la alternativa de mayor conveniencia bajo los grados de importancia definido.

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{Alt. \text{ sub-criterio } 1} & C_{Alt. \text{ sub-criterio } 2} & \dots & C_{Alt. \text{ sub-criterio } m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\text{sub-criterio } 1} \\ c_{\text{sub-criterio } 2} \\ \dots \\ c_{\text{sub-criterio } m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

La implementación del método *AHP* para el caso de diseño conceptual de transportadores continuos desde una perspectiva sostenible requiere de los siguientes procesos:

1. Definición de la importancia relativa de los criterios económico, ambiental y social mediante comparación pareada entre ellos: Se debe obtener un vector C a partir de la comparación pareada entre estos criterios que permita identificar el grado de importancia o peso relativo de los criterios en el proceso de priorización. Los resultados dependerán del juicio del diseñador y sus intereses particulares.
2. Definición del grado de importancia de los sub-criterios mediante la comparación pareada: Se debe realizar la comparación pareada entre los sub-criterios relacionados con el ambiente y la comparación entre los sub-criterios relacionados con el ámbito social, para determinar el grado de importancia de los sub-criterios perteneciente a cada pilar del desarrollo sostenible. La suma de los grados de importancia de cada sub-criterio es igual al grado de importancia del criterio al que pertenece. Dado que el costo de propiedad es el único sub-criterio económico, su grado de importancia es igual a la importancia del criterio al que pertenece. Los resultados dependerán del juicio del diseñador y sus intereses particulares.
3. Comparación pareada de las alternativas en función de cada sub-criterio: Se debe obtener un vector C que indique la prioridad de cada alternativa en función de cada sub-criterio. Dado que se manejan 8 sub-criterios, sería necesario realizar hasta 8 comparaciones pareadas de las alternativas y obtener 8 vectores C uno en función de cada sub-criterio.
4. Verificación de consistencia durante cada comparación pareada realizada.
5. Priorización global en función del desempeño sostenible de los transportados considerando los resultados de la comparación pareada de las alternativas y la importancia de cada sub-criterio para determinar el transportador con mejor desempeño sostenible bajo los grados de importancia propuestos. Estimar el vector D .

El paso 1 requiere de herramientas para definir el desempeño de cada alternativa en función de cada uno de los sub-criterios, modelos que permitan comparar las alternativas en función del costo de propiedad, las emisiones de particulado y ruido, etc. para realizar la comparación pareada. Mediante estos modelos se definen los valores a_{ij} de la comparación pareada.

Para el paso 2 y 3, comparación pareada entre criterio y sub-criterios, la definición de los valores a_{ij} se realiza mediante juicios del diseñador utilizando la escala de importancia relativa de Saaty mostrada en la Tabla 14. Esta comparación pareada tiene en cuenta los intereses particulares del problema de diseño a través de los juicios del diseñador.

6.4. Desarrollo de los métodos para determinar el desempeño sostenible de las posibles alternativas

A continuación, se definen los modelos comparativos del desempeño de cada posible alternativa en función de los sub-criterios a utilizar para desarrollar la comparación pareada en el proceso de priorización. Estos modelos son adecuados para comparación entre sistemas en condiciones de diseño semejantes, es decir, para una misma aplicación.

El desarrollo de estos modelos constituye un aporte a la comunidad científica como generación de nuevo conocimiento dado la carencia de información para comparar el desempeño sostenible de transportadores continuos de sólidos a granel.

6.4.1. Modelos comparativos basados en sub-criterios ambientales

Los siguientes modelos soportan la comparación entre transportadores de sólidos a granel desde una perspectiva ambiental considerando el consumo de recursos energéticos y materiales y el impacto sobre el ambiente por emisiones de ruido y material particulado.

6.4.1.1. Modelo comparativo basado en el consumo de energía

El consumo de energía como sub-criterio de priorización tiene una relevancia considerable ya que determina la intensidad energética asociada a la operación del sistema lo cual incide en el impacto ambiental y el uso de recursos durante la operación del equipo y en los costos operacionales debido al costo asociado a la energía consumida.

El consumo de potencia en transportadores continuos de sólidos a granel es estimado a través de modelos energéticos propuestos en normas, códigos de fabricantes y literatura especializada. En los equipos mecánicos son usualmente utilizadas las normas para estimar la potencia requerida como en el caso de la banda transportadora con las normas BS 5934 [34], JIS B 8805 [35], DIN 22101 [36], CEMA [5], ISO 5048 [37], para los tornillos transportadores las normas CEMA N°350 [6] e ISO 7119 [38], para los elevadores las normas BS [7] e ISO 7190 [39]. Estas normas estiman requerimientos de potencia para proceder con el dimensionamiento a través de modelos empíricos.

Para el diseño de transportadores neumáticos e hidráulicos, el diseño básico y detallado suele estar apoyando en literatura especializada que integra información relevante para el proceso de diseño, ejemplo de esto son la guía de diseño para transportadores neumáticos de Mills [28] y la guía de diseño para transportadores hidráulicos de Wilson [40]. Estas guías de diseño aportan procedimientos iterativos para diseñar los sistemas de transporte y

brindan herramientas gráficas obtenidas a partir de experimentación que permiten estimar parámetros relevantes como la caída de presión.

Estimar el requerimiento de potencia para todas las posibles alternativas es una tarea tediosa dado que para cada tipo de transportadores existen múltiples modelos que pueden ser implementados. El estado del arte de los transportadores continuos no incluye un modelo de energía aplicable para diferentes tipos de equipos. Se propone desarrollar un modelo energético integrado para todas las posibles alternativas, adecuado para una fase de diseño conceptual con poca complejidad matemática para minimizar el tiempo de implementación ya que la finalidad última no es la estimación del consumo de potencia, es el diseño conceptual del transportador. Además, se propone implementar este modelo para estimar consumos típicos en los transportadores para usarlos para propósitos de comparación entre equipos.

Buscando desarrollar el modelo integrado para estimar la potencia requerida en transportadores mecánicos, neumáticos e hidráulicos, el análisis de los fenómenos de consumo de potencia ocurriendo en cada uno de ellos es realizado. Identificando las diferencias entre tipo de sistema y agrupando los fenómenos similares. Mediante esto la Tabla 16 fue obtenida.

La Tabla 16 muestra que el cambio en el momentum en la zona de carga y el cambio en la energía potencial se producen en todos los sistemas, pero las diferencias en los medios de transporte, la configuración del sistema y los principios operativos causan diferentes fenómenos que consumen energía durante el movimiento del material y de los medios de transporte.

Analizando los requisitos de potencia debido a la resistencia al movimiento, las resistencias de fricción son típicas de los sistemas mecánicos y los esfuerzos viscosos son típicos de los sistemas neumáticos/hidráulicos. Los requerimientos de energía localizada ocurren tanto en los sistemas mecánicos como en los neumáticos/hidráulicos, en estos últimos hay un consumo de energía localizado debido al proceso de alimentación y desacoplamiento del material de los medios, mientras que en los transportadores mecánicos los consumos de energía localizados son causados principalmente por la resistencia durante el proceso de alimentación.

Al analizar las pérdidas de potencia, en todos los sistemas estudiados se produce un requisito de potencia adicional debido a las ineficiencias en los accionamientos y los sistemas de transmisión, pero solo los transportadores neumáticos/hidráulicos presentan pérdidas debido a las ineficiencias de la máquina de flujo (bomba o ventilador/soplador/compresor).

Tabla 16. Fenómenos causantes del consumo de energía en transportadores continuos de sólidos a granel.

Categoría de consume de energía	Causas del consumo de energía	Tipos de transportadores continuos de sólidos a granel					
		Banda	Cadena	Tornillo	Elevador	Hidráulico	Neumático
Cambio en el momentum (P_K)	Aceleración de la carga en la zona de alimentación	x	x	x	x	x	x
Cambio en la energía potencial (P_P)	Proceso de elevación o descenso	x	x	x	x	x	x
Requerimiento de potencia debido a la Resistencia al movimiento (P_S)	Resistencia a mover el material a través de la distancia de transporte (P_{S1})	x	x	x	x	x	x
		Resistencia a la fricción de la carga	Resistencia a la fricción de la carga	Resistencia del material contra el canal	Resistencia de la carga (inclinado)	Caída de presión adicional debido a la presencia de sólidos suspendido	
	Resistencia a mover el medio de transporte a través de la distancia de transporte (P_{S2})	x	x	x	x	x	x
		Impresión de los rodillos en la banda	Resistencia a la fricción de los elementos de transporte	Resistencia a la fricción entre partes móviles	Resistencia medio (inclinado)	Esfuerzos viscosos en el canal y los accesorios	
	Resistencia localizada a mover el material o medio de transporte (P_{S3})	x	x		x		
		Fricción del material contra el encausador	Pérdidas en la alimentación por efecto puente del material		Fuerzas durante la alimentación del material	Alimentación y desacople del material al medio de transporte	
	Envoltura de la banda a la polea			Envoltura de la banda a la polea			
Pérdidas de energía (P_L)	Ineficiencias sistema de transmisión y potencia, en máquinas neumáticos o hidráulicas	x	x	x	x	x	x

El requisito de potencia debido a la resistencia al movimiento (P_S) se puede dividir principalmente en tres componentes: resistencia para mover el material a lo largo de la longitud de transporte, resistencia para mover el medio de transporte a lo largo de la longitud de transporte y resistencia localizada al movimiento del material/medio. El requerimiento total de energía es igual a la suma de esos tres componentes.

A pesar de las diferencias en los medios de transporte, la configuración del sistema y los principios operativos que causan diferentes fenómenos que consumen energía, la Tabla 16 muestra que los fenómenos que consumen energía podrían incluirse en las mismas categorías. En todos los sistemas estudiados se produce un consumo de energía debido a la variación en el momentum (P_K) y la energía potencial (P_P), el requerimiento de potencia causados por la resistencia al movimiento (P_S) y las pérdidas de energía (P_L). De este modo, se podría usar una expresión única para estimar los requisitos de potencia para todos los sistemas de estudios como se expresa en la ecuación (5):

$$P_T = P_K + P_P + P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} + P_L \quad (5)$$

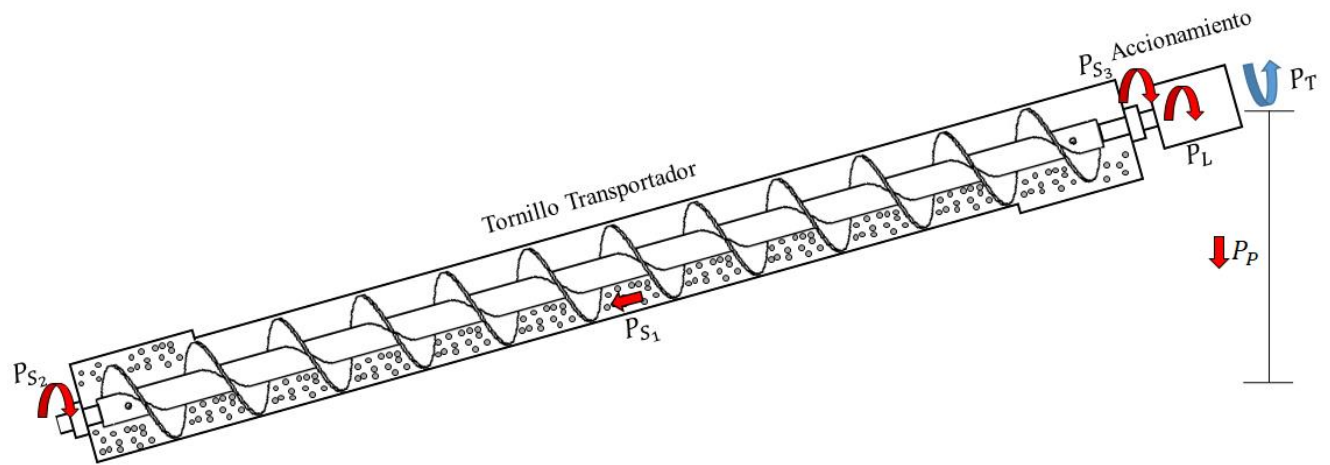
En la Tabla 16, el requerimiento de potencia causado por los accesorios como diversores en cintas transportadoras o desviadores en transportadores hidráulicos o neumáticos no se considera debido a su ocurrencia ocasional. Además, el requisito de potencia causado por la interacción con tolvas y depósitos no se tiene en cuenta porque este modelo se centra en los transportadores, no en los alimentadores. Los requisitos de potencia debidos a accesorios muy utilizados como codos, válvulas y accesorios en sistemas hidráulicos y neumáticos se consideran en el modelo.

P_K y P_P son fáciles de calcular, por otro lado, el requisito de potencia causado por la resistencia al movimiento P_S y las pérdidas de potencia P_L depende de una variedad de fenómenos, por lo que su estimación analítica requiere modelos matemáticos complejos. Teniendo en cuenta la necesidad de un modelo sin tratamiento matemático riguroso y adecuado para una fase de diseño conceptual, la estimación de P_S y P_L se basa en modelos empíricos existentes con ecuaciones sencillas de implementar.

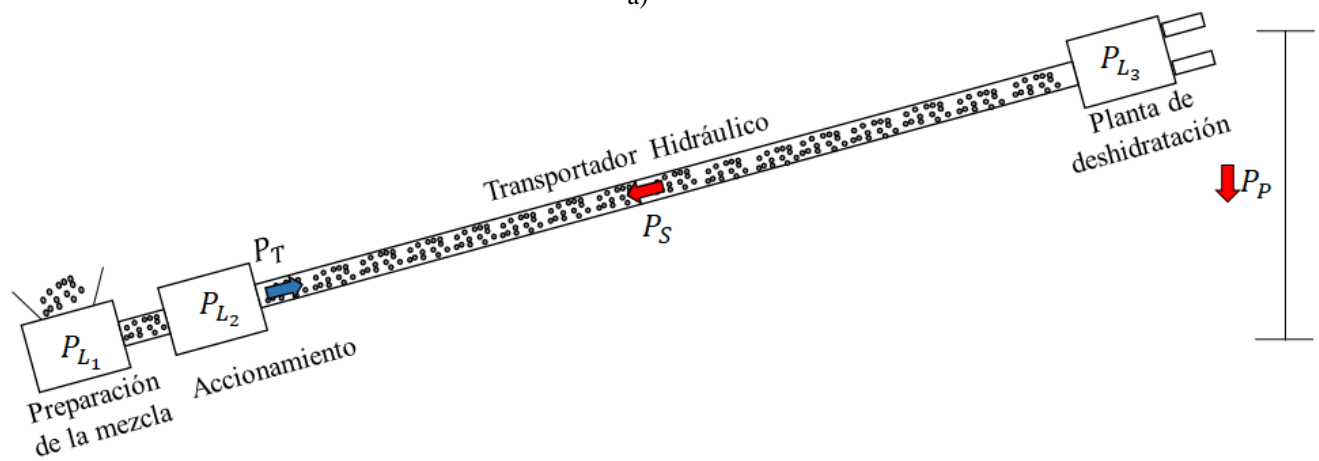
El consumo de energía debido a las pérdidas P_L toma en cuenta las eficiencias de transmisión y transmisión y las ineficiencias de la máquina de flujo. Reescribiendo la ecuación (5) se obtiene que la ecuación (6).

$$P_T = P_L(P_K + P_P + P_{S1} + P_{S2} + P_{S3}) \quad (6)$$

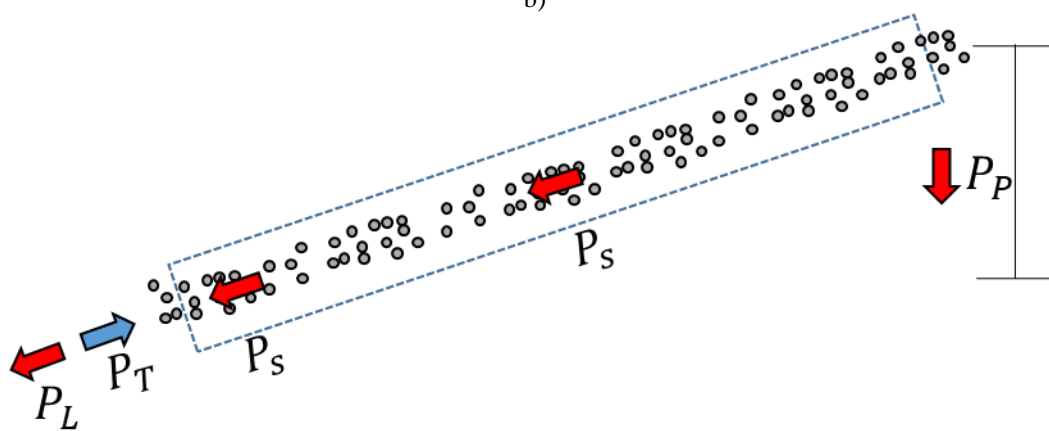
La Figura 3 muestra los componentes de consumo de energía para un sistema mecánico típico, un transportador de tornillo y para un transportador hidráulico. Se observa que, a pesar de las diferencias entre los sistemas, los fenómenos que consumen energía podrían incluirse en los mismos componentes para los sistemas mecánicos y neumáticos/hidráulicos. El volumen de control para el análisis de energía de transportadores, independiente su tipo, se muestra en la figura 3.c.



a)



b)



c)

Figura 3. Comparación del consumo de energía entre a) un transportador mecánico típico como el tornillo y b) un transportador hidráulico c) modelo generalizado.

La Tabla 17 muestra las expresiones específicas de los componentes de consumo de energía para cada tipo de transportador continuo de sólidos a granel considerado basado en correlaciones existentes y valores empíricos para los componentes P_S y P_L , buscando minimizar el tratamiento matemático del modelo.

Tabla 17. Expresiones para estimación de los componentes de consumo de energía.

Familia de transportador	P_L	$P_P^{a)}$	P_{S1}	P_{S2}	P_{S3}	
Banda horizontal	1.2	0	$f_{s1-b}\dot{m}L_c g$	$f_{s2-b}gL_c V[m_c + m_r + 2m_b]$	$f_{L-b}\dot{m}$	
Cadena horizontal			$f_{s1-c}\dot{m}L_c g$	$2.1f_{s2-c}gL_c VM$	$L_c \frac{h}{R}$	
Tornillo horizontal			$f_{s1-s}\dot{m}L_c g$	$f_{s2-sd}f_{s2-sb}DL_c$	0	
Banda inclinada		$\dot{m}_s g \Delta H$		$[f_{s1-b}\dot{m}L_c g] \cos(\theta)$	$f_{s2-b}gL_c V[m_c + m_r + 2m_b] \cos(\theta)$	$f_{L-b}\dot{m}$
Cadena inclinada				$f_{s1-c}\dot{m}L_c g \cos(\theta)$	$2.1f_{s2-c}gL_c VM \cos(\theta)$	$L_c \frac{h}{R}$
Tornillo inclinado				$f_{s1-s}\dot{m}L_c g$	$f_{s2-sd}f_{s2-sb}DL_c$	0
Tornillo vertical				$\lambda f_{s1-sv}\dot{m}L_c g$	$f_{s2-sd}f_{s2-sb}DL_c$	0
Elevador inclinado				$[f_{s-e}\dot{m}L_c g] \cos(\theta)$	$f_{s-e}gL_c V \left[\frac{2m_{ca}}{S} + 2m_m \right] \cos(\theta)$	$\dot{m}gH_0$
Elevador de cangilones				0	0	
Neumático horizontal	1.35	0	$165 \frac{\dot{m}}{\phi} L_c \ln \left(\frac{P_1}{P_1 - 2f_{s2-v} \frac{L_c}{D} \rho g V^2 (1 + \phi)} \right)$		$f_{L-p}\dot{m}$	
Neumático vertical			$165 \frac{\dot{m}}{\phi} H \ln \left(\frac{P_1}{P_1 - 2\beta f_{s2-v} \frac{L_c}{D} \rho g V^2 (1 + \phi)} \right)$		$f_{L-p}\dot{m}$	
Hidráulico horizontal	1.3	$\rho_w g H (1 + S_s) \frac{C_{vd}}{\left(1 - \frac{v_t'}{V}\right)}$	$\rho_w g Q_m L_c 0.32 (S_s - 1)^{1.05} C_{vd}^{0.6} \left(\frac{V}{(2gD)^{\frac{1}{2}}} \right)^{-0.1}$	$f_{L-h}\dot{m}$		
Hidráulico vertical						
Hidráulico inclinado					$\rho_w g Q_m L_c 0.32 (S_s - 1)^{1.05} C_{vd}^{0.6} \left(\frac{V}{(2gD)^{\frac{1}{2}}} \right)^{-0.1} \cos(\theta)$	$f_{L-h}\dot{m}$

a) Por conveniencia, La expresión P_P para transportadores hidráulicos incluye el requerimiento de potencia para elevar o bajar el material y el medio de transporte y la potencia requerida para mantener las particular en posición

La Tabla 17 muestra algunas similitudes y diferencias entre los modelos. Para todos los transportadores mecánicos, P_S se estima como la suma de tres expresiones. Por otro lado, para los transportadores neumáticos e hidráulicos, es más factible estimar P_S con una expresión única.

Para el transportador inclinado, las fuerzas de corte causadas por el material y los medios de transporte se multiplican por $\cos(\theta)$ para considerar la dirección de las fuerzas normales en un plano inclinado. En los transportadores mecánicos verticales e inclinados, el cambio en la energía potencial del flujo se incluye como un término adicional P_P . En los transportadores neumáticos, para mayor facilidad, la potencia adicional necesaria para

elear o descender el material se incluye en un factor empírico β , este factor también considera la potencia requerida para mantener en su lugar el material transportado.

La resistencia inercial en el área de aceleración entre el material y los medios de transporte ocurre en todos los sistemas estudiados, pero es insignificante en comparación con los otros componentes de consumo de energía por lo que se desprecia. La Tabla 17 no incluye una expresión para estimar la potencia debido al cambio en el momentum P_k , se considera despreciable comparado con los otros componentes de consumo de energía.

Las consideraciones, simplificaciones y modelos empíricos utilizados para determinar las expresiones mostradas en la Tabla 17 son importantes para entender las expresiones. Estos son discutidos a continuación.

En las bandas transportadoras, el modelo empírico utilizado para estimar los requerimientos de energía causados por la resistencia a las fuerzas de movimiento está basado en la norma ISO 5048 [37]. De acuerdo con este estándar, la impresión de los rodillos en la correa se modela como resistencia de fricción con un coeficiente de fricción empírico, que depende de las condiciones operativas, especialmente de la temperatura, pero para la mayoría de las aplicaciones un valor de $f_{s1-b} = 0.025$ es confiable. La resistencia a la fricción de la carga se expresa en términos de flujo de masa y un coeficiente fricción empírico f_{s2-b} , que depende del material transportado y puede ser un poco más alto que f_{s1-b} pero para una fase de diseño conceptual, 0.025 se considera adecuada. El consumo de energía localizado es calculado con el factor empírico basado en [5].

Las expresiones para el transportador de tornillo están basadas en el modelo empírico utilizado para estimar los requerimientos de energía debido a la resistencia a las fuerzas de movimiento de la norma ISO 7119 [38]. La resistencia del material contra el canal se expresa en términos del flujo de masa, la distancia de transporte y un coeficiente empírico que depende del tipo de material con valores en el rango de 0.4 a 4.4. La resistencia entre las partes móviles se expresa en términos del diámetro de tornillo, distancia de transporte y dos coeficientes empíricos f_{s2-sb} que es función del material de los cojinetes de suspensión y f_{s2-sd} que es función del diámetro. Para tornillo vertical, el factor λ considera el incremento en el consumo de energía debido al tornillo completamente lleno y la operación vertical.

En el elevador de cangilones, los fenómenos de consumo de energía debidos a las fuerzas en el proceso de carga como la fuerza durante la alimentación en el elevador centrífugo, se expresan en términos de flujo másico y una altura equivalente altura H_0 basada en el método de cálculo de resistencia de ISO 7190 [39]. Esta altura equivalente esté en el rango de 3 a 12 m y depende del tipo de elevador y el material.

En el transportador neumático, el requerimiento de potencia debido a las fuerzas de corte considera la caída de presión causada solo por el movimiento del gas y la caída de presión adicional debido a la partícula sólida. El efecto del transporte de gas solo se basa en [41]. La caída de presión se estima a través de la fórmula de Darcy considerando una velocidad baja en el extremo corriente arriba de la tubería y densidad constante. La caída de presión se calcula en términos del efecto de gas y un factor de caída de presión para tener en cuenta el efecto de partículas sólidas [42], que podrían considerarse iguales a la relación de carga de sólidos. El factor empírico β cuenta con los requerimientos de potencia debido a la variación de la energía potencial del flujo y la potencia requerida para mantener las partículas transportadas en su lugar de acuerdo con [43].

En el transportador neumático, la caída de presión causada por los accesorios como los codos y válvulas, se considera utilizando con el método de la longitud equivalente y el requisito de potencia localizado se calculan con un factor empírico f_{L-p} basado en la caída de presión típica en dispositivos de alimentación [41] y sistemas de filtro o ciclones [44]. El consumo de energía en las máquinas de flujo se estima con el modelo de compresión isotérmica considerando la caída de presión total.

En los transportadores hidráulicos la estimación de los requerimientos de potencia por el transporte del fluido y los efectos del transporte sólido se basan en un modelo semi-empírico [45]. En vertical y en transporte inclinado hay requisitos de potencia adicionales debido a la variación de la energía potencial de las partículas y el fluido y la potencia requieren para evitar la deposición del material sólido a granel, conocido como efecto de retención, este efecto está incluido con el termino v'_t . El requerimiento de potencia localizado es estimado con el factor f_{L-h} basado en el consumo de energía típica de los sistemas de deshidratación.

La Tabla 18 resume los valores de los coeficientes empíricos relevantes para el modelo.

Tabla 18. Coeficientes Empíricos del modelo de energía.

Familia de transportadores	Descripción	Valor
Banda	Coeficiente de fricción rodillos-correa	$f_{s1-b} = 0.025$
	Coeficiente de fricción material	$f_{s2-b} = 0.027 - 0.035$
Cadena	Coeficiente de fricción material	$f_{s1-c} = 0.4 - 1.0$
Tornillo	Coeficiente de fricción material	$f_{s1-s} = 0.4 - 4.4$
	Factor cojinetes	$f_{s2-sb} = 1.0 - 4.4$
	Factor diámetro	$f_{s2-sd} = 18 - 540$
Elevador	Altura equivalente proceso de carga	$H_0 = 3 - 12 \text{ m}$

Algunas características como los coeficientes empíricos para cálculos de resistencia dependen del tipo de transportador, como sucede en el caso de los transportadores de cadenas y los elevadores lo que hará que los requerimientos de potencia sean diferentes para cada tipo de transportador dentro de estas familias para una misma aplicación. Para el caso de las bandas y los transportadores hidráulicos, los diferentes tipos de transportadores dentro de estas familias no implican una diferencia significativa en el consumo de potencia.

La Tabla 19 muestra los factores empíricos que inciden en las diferencias de los requerimientos de potencia entre tipos de transportadores pertenecientes a la familia de transportadores de cadenas. La diferencia en los coeficientes de fricción depende del mecanismo de movimiento de la cadena, si está rodando como en el transportador de placas o está deslizando como en los transportadores tipo arrastre, rascador y En-Masse.

Tabla 19. Coeficiente de fricción en función del tipo de transportador de cadena.

	Placas	Arrastre, Rascador y En-Masse
f_{s2-c}	Cadena Seca: 0.10 – 0.14 Cadena Lubricada: 0.07 – 0.10	Cadena Seca: 0.33 – 0.5 Cadena Lubricada: 0.2 – 0.4

La Tabla 20 muestra los factores empíricos que inciden en las diferencias de los requerimientos de potencia entre tipos de transportadores pertenecientes a la familia de elevadores de cangilones. Las diferencias se deben al modo de carga de los cangilones, en los elevadores con descarga centrífuga donde parte del material ingresa al cangilón por un proceso de recogida donde las fuerza durante la excavación explican la altura equivalente mayor que en otros tipos de elevadores.

Tabla 20. Altura equivalente en función del tipo de elevador de cangilones.

	Descarga centrífuga	Descarga continua	Súper capacidad	Descarga positiva
H_0 [m]	12	3	3	10

Para el caso de los transportadores neumáticos, existen diferencias significativas en el requerimiento de potencia en función del tipo del transportador, pero esto no está directamente ligado a los coeficientes empíricos como el caso del transportador de cadena y el elevador de cangilones. Las diferencias en los requerimientos de potencia se deben principalmente al efecto negativo de transportar material con un flujo de aire innecesariamente alto y a bajos factores de carga de sólidos [28], por tanto se presentan menores requerimientos de potencia en los sistemas neumáticos operando en fase densa [46].

El modelo integrado se utilizó para estimar el requerimiento de potencia específico promedio (RPE) [Wh/ton* m] y el requerimiento de potencia localizado promedio (RPL) [Wh/ton] de los sistemas estudiados para diferentes materiales, tipo de operación (horizontal, inclinado o vertical) y a distintas capacidades de los sistemas, teniendo en cuenta el diseño y los parámetros operativos adecuados para cada condición. Dado que la estimación de los requerimientos de potencia requiere de un diseño preliminar, se establecieron diseños de acuerdo a normativa para estimación de potencia a distintas condiciones a fin de determinar los consumos promedios.

Utilizando los requerimientos de potencia promedio específicos y localizado, el requerimiento de potencia total en una aplicación específica se podría estimar con la ecuación (7).

$$P_T = \dot{m}L_C RPE + \dot{m}RPL \quad (7)$$

La figura 4 muestra el requerimiento de potencia específico para transporte en horizontal.

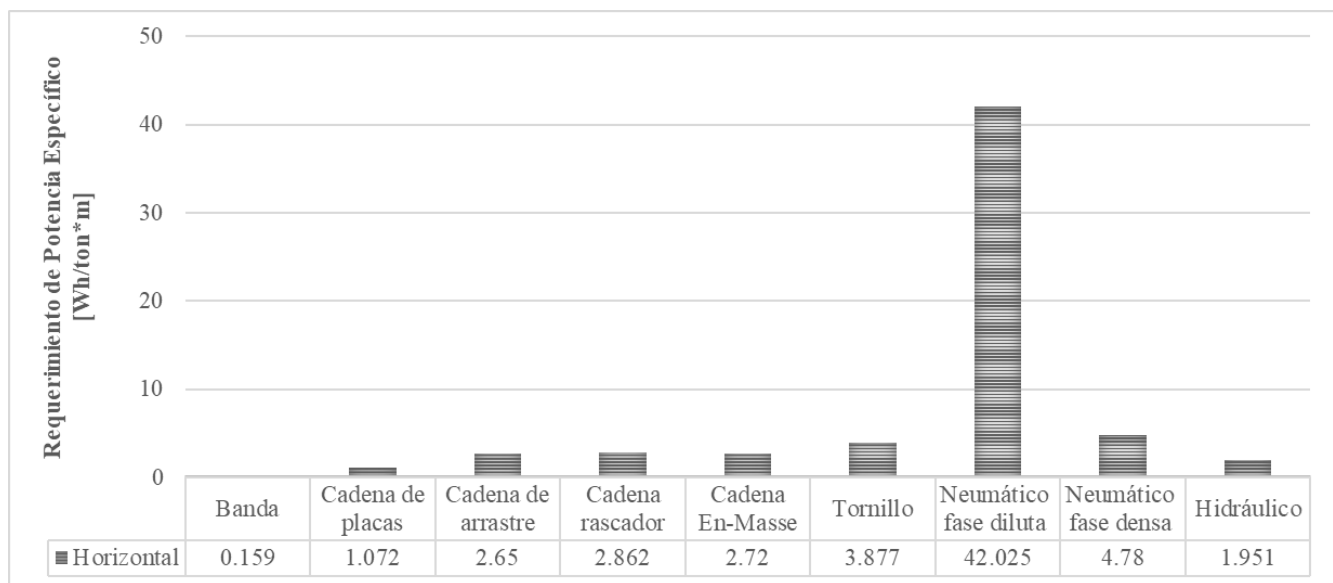


Figura 4. Requerimiento de potencia específico para transporte horizontal.

La figura 5 muestra el requerimiento de potencia específico para transporte inclinado.

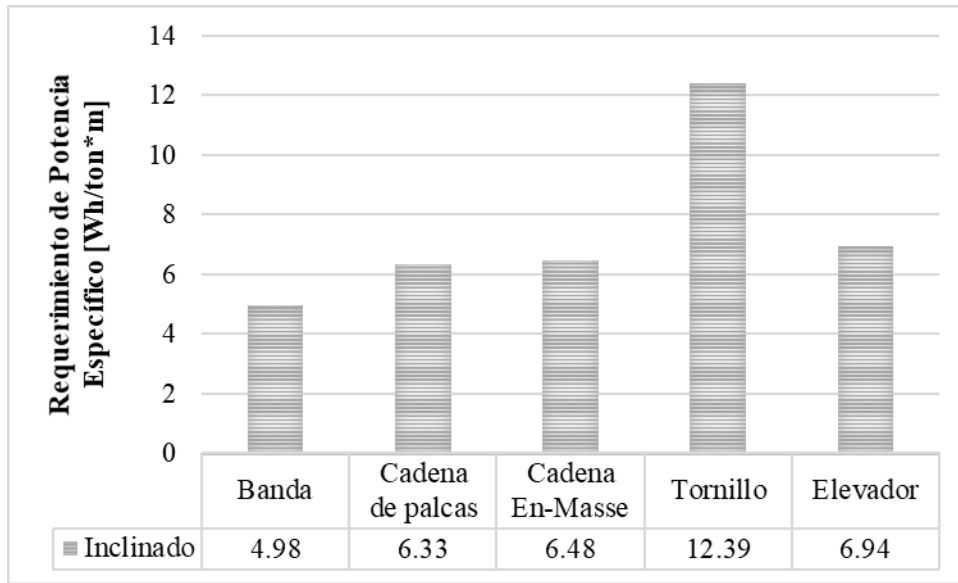


Figura 5. Requerimiento de potencia específico para transporte inclinado.

La figura 6 muestra el requerimiento de potencia específico para transporte vertical. Se observa que no hay diferencia entre tipos de transportador dado que la diferencia se debe a un consumo localizado debido al modo de carga del cangilón.

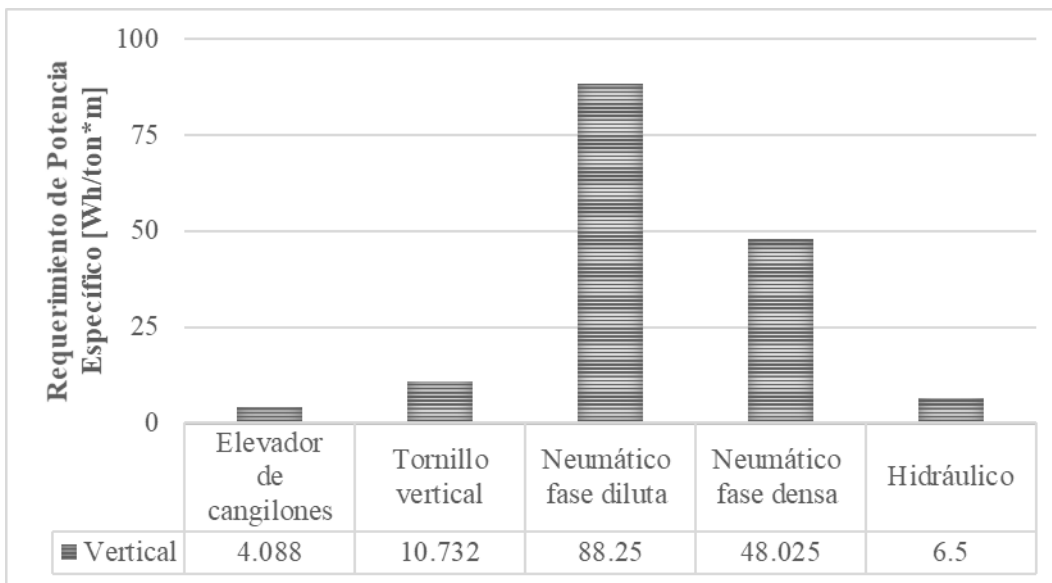


Figura 6. Requerimiento de potencia específico para transporte vertical.

La figura 7 muestra el requerimiento de potencia localizado para los transportadores considerados.

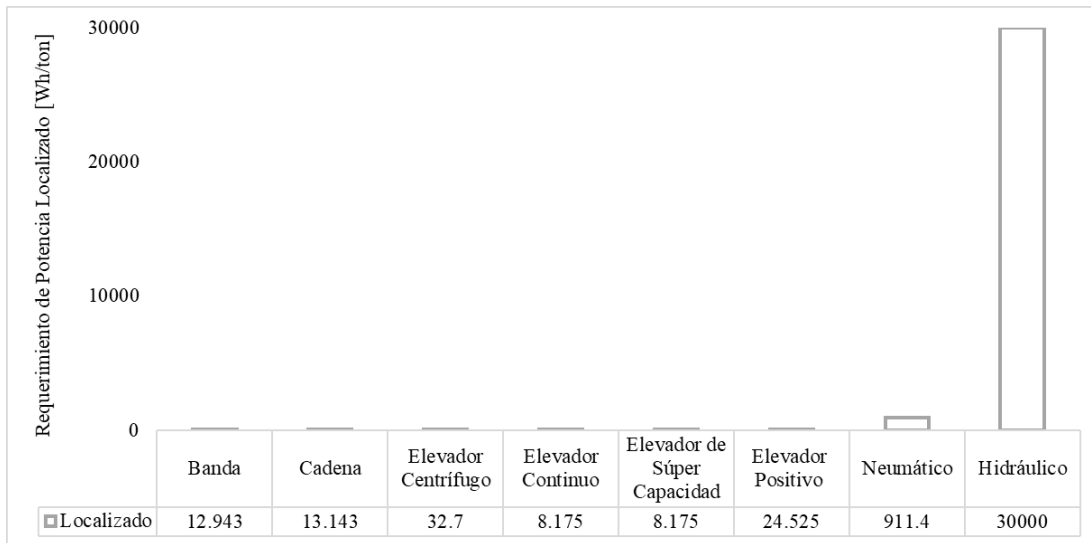


Figura 7. Requerimiento de potencia localizado.

La Figura 4 y la figura 7 muestran que para la operación de transporte horizontal el sistema con mayor eficiencia energética es la banda transportadora debido a su RPE significativamente bajo y su bajo RPL. Su RPE es 264, 31 y 12 veces más bajo que el RPS en transportadores neumáticos, de tornillo e hidráulicos, respectivamente. Para una operación inclinada, la banda transportadora el RPE es 2,48 veces más bajo que el transportador de tornillo.

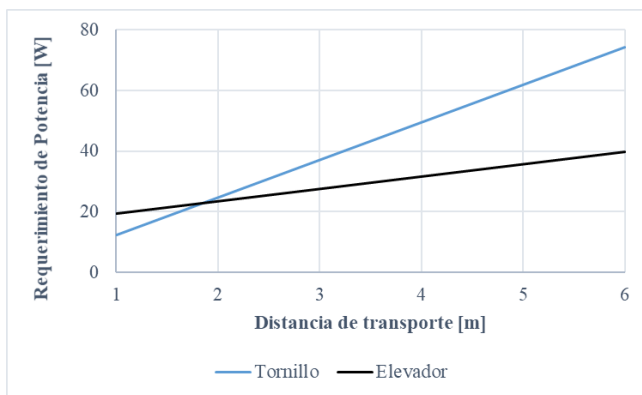
Para operación vertical, el elevador de cangilones es el sistema más eficiente. A diferencia de los transportadores de tornillo y neumáticos/hidráulicos, el elevador no requiere energía para impulsar el sistema vacío. El RPL dependerá del tipo de transportador, siendo menor para los sistemas continuos debido a su método de carga de material. Independiente del tipo de elevador, las fuerzas durante el proceso de alimentación son menores que el consumo de energía causado por el movimiento del medio de transporte y el material en los transportadores de tornillo, de cadena y transportadores neumáticos/hidráulicos.

El requerimiento específico de potencia en el transportador hidráulico es 12.27 veces mayor que en el transportador de banda para operación horizontal. Un requerimiento de potencia más alto para mover material y medios de transporte y mayores pérdidas de energía explican la menor eficiencia en los transportadores hidráulicos comparados con las bandas. Por otro lado, el RPE en el transportador hidráulico es 1.98 veces más bajo que en los transportadores de tornillo para el funcionamiento horizontal. La principal ineficiencia en el transportador hidráulico es su LPR significativamente alto debido a los sistemas de deshidratación. Las pérdidas de potencia más altas se producen en los sistemas neumáticos e hidráulicos debido a que, además de las ineficiencias en el sistema de transmisión, presentan ineficiencias en la máquina de flujo (bomba o ventilador/soplador/compresor).

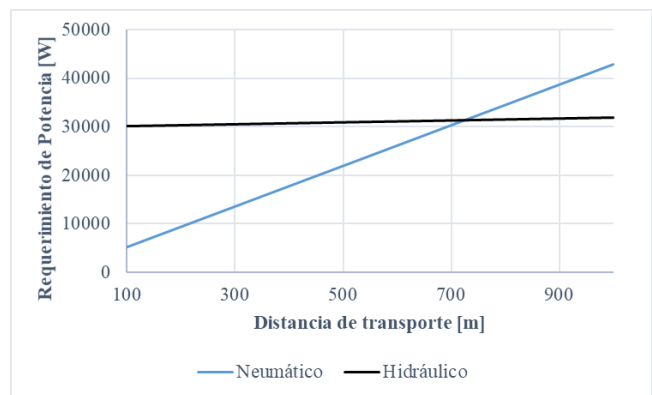
El proceso de elevación incluye el cambio en la energía potencial del sistema y la potencia necesaria para mantener las partículas transportadas en su lugar. En los transportadores neumáticos e hidráulicos, el requerimiento de potencia causado por el proceso de elevación es mayor que en los transportadores mecánicos porque el cambio en la energía potencial ocurre en el material transportado y en los medios de transporte, y el efecto de retención es significativo en esos sistemas debido al aumento en el límite de la velocidad de deposición.

Teniendo en cuenta la resistencia de potencia localizada, los sistemas mecánicos presentan un bajo RPL causado por la resistencia al movimiento en el proceso de alimentación comparado con los sistemas hidráulica y neumática, donde el PRL es significativamente más alto debido a la potencia requerida para separar el material del medio de transporte. El PRL es 32,9, 2000 y 2500 veces más alto en el transportador hidráulico que en el neumático, el elevador de cangilones y los transportadores de banda, respectivamente. Entonces, los transportadores hidráulicos solo son adecuados para una larga distancia de transporte.

Existe un rango óptimo de longitud de transporte para cada tipo de transportador; se representa en la figura 8. Para el funcionamiento vertical, el requerimiento específico de potencia es 2,62 más bajo en el elevador de cangilones que en el transportador de tornillo, pero según la figura 8, para una altura de elevación inferior a 2 metros, el transportador de tornillo requiere menos potencia, esto es causado por el RPL en elevador de cangilones. Una situación similar ocurre entre los transportadores neumáticos e hidráulicos. El consumo de energía específico en el transportador hidráulico es 21,5 veces menor que en el transportador neumático, pero el transportador hidráulico requiere menos potencia solo para la aplicación con una longitud de transporte superior a 750 metros debido a la alta potencia requerida por el sistema de deshidratación.



a)



b)

Figura 8. Requerimiento de potencia para transportar 1 tonelada/h de material con a) tornillo transportador y elevador de cangilones y b) transportador neumático e hidráulico.

Los valores obtenidos de requerimiento de potencia específico y requerimiento de potencia localizado son implementados para la comparación pareada entre alternativas en función del consumo de energía durante el proceso de priorización. El modelo desarrollado y los resultados obtenidos a partir de este permiten la comparación energética entre alternativas con reducido consumo de tiempo.

El desarrollo del modelo muestra que, a pesar de las diferencias entre los sistemas, los fenómenos que consumen energía comparten características por lo que pueden ser incluido en una misma categoría, posibilitando el desarrollo de un modelo integrado.

La comparación pareada en función del consumo de energía establecerá la preferencia al calcular la razón entre el requerimiento total de potencia de la alternativa 2 (A2) con respecto al requerimiento de la alternativa 1 (A1). La Tabla 21 ilustra la comparación pareada en función del consumo de energía.

Tabla 21. Comparación pareada en función del consumo energético.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	$\frac{[\dot{m}L_C RPE + \dot{m}RPL]_{A2}}{[\dot{m}L_C RPE + \dot{m}RPL]_{A1}}$
Alternativa 2	$\frac{[\dot{m}L_C RPE + \dot{m}RPL]_{A1}}{[\dot{m}L_C RPE + \dot{m}RPL]_{A2}}$	1

La Tabla 22 muestra como ejemplo la comparación pareada a nivel de consumo de energía para una banda y una cadena de placas transportando 1 TPH con distancia de transporte de 1 m. Esto indica que se preferiría la alternativa banda por presentar un menor consumo.

Tabla 22. Ejemplo de comparación pareada en función del consumo de energía.

	Banda	Placas
Banda	1	$\frac{14.215}{13.102}$
Placas	$\frac{13.102}{14.215}$	1

El modelo energético para diseño conceptual de transportadores continuos constituye un aporte a la comunidad científica como generación de nuevo conocimiento. Este modelo permite comparar el consumo de energía entre diferentes sistemas con ecuaciones simplificadas, requiriendo poco tiempo de implementación. Además, el desarrollo del modelo permite caracterizar y comparar los fenómenos físicos causantes del requerimiento de potencia en los transportadores.

6.4.1.2. Modelo comparativo basado en Emisión de material particulado – generación de polvo

El polvo está compuesto de partículas sólidas finas que pueden ser fácilmente elevadas y transportadas por una corriente como el viento y siempre es generado cuando un sólido a granel es transportado. El polvo se puede caracterizar en dos tipos, el polvo fugitivo y el no fugitivo. El polvo fugitivo es aquel que se vuelve aerotransportado por fuera de las fronteras del equipo que transporta el material. El polvo no fugitivo es aquel que se vuelve aerotransportado dentro de las fronteras del equipo [47].

El polvo fugitivo y no fugitivo causa problemas de mantenimiento, especialmente el derivado de materiales abrasivos ya que ingresan a los sistemas de transmisión y rodamientos causando su falla. Además, el polvo puede causar deslizamiento en las bandas. Los sistemas de compresión, actuadores neumáticos y mecánicos y sistemas de lubricación requieren operación libre de contaminantes y su vida se ve drásticamente acortada a causa del material particulado por lo que es necesario la inversión adicional en equipos y estrategias para el control del polvo [48].

En cuanto al impacto del polvo fugitivo sobre la salud del personal, algunos materiales son insolubles en el cuerpo humano y estos pueden acumular en los tejidos pulmonares o para al torrente sanguíneo siendo transportados a través del cuerpo, en ambos casos, desencadenando problemas para la salud. Otros materiales pueden reaccionar con los fluidos corporales creando subproductos tóxicos. En cuanto a la seguridad, las nubes de polvos no fugitivos combustibles representan un riesgo potencial de explosión en los procesos de transporte.

Existen normativas ambientales que han sido promulgadas para proteger la salud y seguridad del personal en entornos de trabajo, así como la salud pública, teniendo en consideración el efecto del polvo derivado de procesos como el transporte de sólidos. En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (*EPA*) promulga las normas nacionales de emisiones y calidad del aire y la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (*OSHA*) procura la salud y seguridad de los trabajadores, estas dos organizaciones han sido responsables de la legislación y aplicación de las normas para el control de las emisiones de material particulado fugitivo. *EPA* promulgó la compilación de factores de emisión AP-42 [49] incluyendo estimados de las emisiones de material particulado fugitivo PM_{10} y $PM_{2.5}$ generado durante el transporte de sólidos a granel y estableció niveles de emisión máximos permitidos. *OSHA* promulgó la norma de los polvos fugitivos [50] cuya implementación procura el bienestar de los trabajadores y disminuir el impacto de la emisión de particulado en la salud y seguridad pública, imponiendo límites de emisión y recomendaciones para su control y reducción. Tanto *EPA* como *OSHA* están soportados por una multitud de consultores nacionales y estatales, así como por organizaciones científicas y de vigilancia.

Buscando procurar el bienestar, la salud pública y la seguridad, prologar la vida útil de los sistemas, aumentar su confiabilidad y reducir los costos asociados a mantenimiento y equipos para control de polvo, es relevante considerar la generación polvo fugitivo y no fugitivo como criterio de selección.

Para el desarrollo del modelo comparativo entre soluciones se tiene en consideración la escala comparativa de generación de polvo fugitivo y no fugitivo en función del tipo de transportador propuesto por Levy & Kalman [47]. La Tabla 23 muestra la escala propuesta por Levy & Kalman y los niveles de preferencias propuesto para propósitos de comparación pareada en el método *AHP* derivada de esta información.

Tabla 23. Generación de polvo fugitivo y no fugitivo y niveles de preferencia de transportadores.

Familia de transportadores	Fugitivo	No fugitivo	Nivel de preferencia
Banda	5	0	1.5
Banda con cubierta	3	2	2.3
Cadena no cerrada	3	1	2.4
Cadena cerrada	2	2	2.6
Tornillo	1	3	3.4
Elevador	1	4	3.1
Neumático fase diluida	1	5	2.8
Neumático fase densa	1	3	3.4
Hidráulico	1	0	4.3

No existe diferencia considerable en los niveles de polvo generado dentro de las familias de transportadores, la principal diferencia se atribuye a la condición cerrada o abierta del transportador, por tanto, la Tabla 23 muestra los niveles por familia de transportadores donde la única diferencia dentro de las familias, se estable para las bandas y cadenas al considerar si el sistema es cerrado o abierto.

Con estos niveles de preferencia se desarrolla la comparación pareada. La comparación pareada en función de las emisiones de polvo establece la preferencia entre la alternativa 2 (A2) con respecto la alternativa 1 (A1) de acuerdo a la Tabla 24.

Tabla 24. Comparación pareada en función del sub-criterio emisiones.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	<i>Preferencia emisiones A1</i> <i>Preferencia emisiones A2</i>
Alternativa 2	<i>Preferencia emisiones A2</i> <i>Preferencia emisiones A1</i>	1

La Tabla 25 muestra la comparación pareada en función de la emisión de particulado para una banda con cubierta (preferencia 2.3) y un tornillo (preferencia 3.4) como alternativas, mostrando mayor conveniencia para el tornillo dado su menor emisión de polvo fugitivo y no fugitivo. La consideración de accesorios como las cubiertas y canales cerrados para los transportadores de banda y cadena muestran mejoría en su preferencia ante el criterio de emisión de particulados, pero aumentarían el costo del equipo.

Tabla 25. Ejemplo de comparación pareada en función de las emisiones de particulado.

	Banda con cubierta	Tornillo
Banda con cubierta	1	$\frac{2.3}{3.4}$
Tornillo	$\frac{3.4}{2.3}$	1

Es importante considerar que no se puede prevenir la generación de polvo durante el transporte de sólidos a granel con ciertas características, pero se puede disminuir la emisión con consideración de diseño y tecnologías de control de polvo. A continuación, se identifica las fuentes de emisión y las medidas de prevención necesarias de acuerdo al manual del control de polvo para la industria de minerales [51].

Tabla 26. Fuentes de emisión y las medidas de prevención en la operación de transportadores continuos.

	Puntos de emisión de particulado	Medidas de prevención
Banda	Puntos de transferencia (ej.: Alimentación, descarga)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alimentar en la dirección de movimiento con la misma velocidad de la banda en el centro de ella. ▪ Cama de impacto y carga en superficie curva. ▪ Cortinas de polvo en las tolvas. ▪ Puntos de transferencia cerrado con sistema de control de polvo.
	Banda en retorno	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rascadores de banda. ▪ Lavado de banda.
	A lo largo de la banda	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Empalme vulcanizado. ▪ Banda cerrada en caso de viento.
Elevador de cangilones	Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adecuado diseño de la tolva.
	Descarga	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Colector de polvo.
Tornillo	Fugas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiales resistentes a la abrasión.
	Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adecuado diseño de la tolva.
Cadena	Fugas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiales resistentes a la abrasión. ▪ Sellos auto-adhesivos de neopreno.
	Puntos de transferencia (ej.: Alimentación, descarga)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adecuado diseño de la tolva.
	Fugas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiales resistentes a la abrasión.
Neumático Hidráulico	Fugas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiales resistentes a la abrasión. ▪ Codos de alto espesor.

6.4.1.3. Modelo comparativo basado en el uso del agua

El agua es un recurso necesario para preservar la salud humana y los ecosistemas y el crecimiento de la población hacen necesario una planeación y gerencia a largo plazo de los recursos hídricos, procurando disminuir el uso y contaminación de ella [52], por lo que en aplicaciones industriales como el manejo de sólidos a granel es deseable la reducida participación del agua en el proceso. Por lo anterior, implementar el uso del agua como criterio de selección es determinante desde la perspectiva sostenible de la metodología de diseño.

La Tabla 27 muestra los niveles de preferencias de los sistemas basados en el uso del agua. Se observa la poca preferencia del transporte hidráulico debido a su extensivo requerimiento de agua.

Tabla 27. Nivel de preferencia en función del uso del agua.

Familia de transportadores	Nivel de preferencia
Bandas	4
Cadena	5
Tornillo	5
Elevador de cangilones	5
Neumático	5
Hidráulico	1

Con estos niveles de preferencia se desarrolla la comparación pareada. La comparación pareada en función del uso del agua establece la preferencia entre la alternativa 2 (A2) con respecto la alternativa 1 (A1) de acuerdo a la Tabla 28.

Tabla 28. Comparación pareada en función del sub-criterio uso del agua.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	$\frac{\text{Preferencia uso agua A1}}{\text{Preferencia uso agua A2}}$
Alternativa 2	$\frac{\text{Preferencia uso agua A2}}{\text{Preferencia uso agua A1}}$	1

La Tabla 29 muestra la comparación pareada en función del uso del agua entre el transportador de cadena (preferencia 5) y la banda transportadora (preferencia 4), mostrando la preferencia por la cadena.

Tabla 29. Ejemplo de comparación pareada en función de las emisiones de particulado.

	Cadena	Banda
Cadena	1	$\frac{5}{4}$
Banda	$\frac{4}{5}$	1

6.4.1.4. Modelo comparativo basado en el ruido generado

El ruido generado en operaciones industriales se considera una forma de contaminación dado que afecta el entorno y a los miembros de este, la exposición prolongada a altos niveles de ruido puede afectar la salud, particularmente con la pérdida irreversible de la audición.

Procurando el bienestar y la salud de las personas que puede estar expuestas a ruidos industriales, personal de planta y vecinos, se han promulgado leyes para limitar y controlar los niveles de ruidos en procesos industriales. La Autoridad de Protección Ambiental (*EPA*) de Australia promulgó la política de ruido para la industria [53] que busca establecer límites de ruido en función del tiempo de generación del ruido, horario de generación y el tipo de entorno afecta. Por otro lado, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (*OSHA*) [54] establece niveles límites de ruido promediados en el tiempo en función de las horas de exposición. Fuentes de ruido por fuera de estos límites establecidos en estas normas se consideran no permitidos por lo que se requiere implementar tecnologías de control para atenuarlas hasta un nivel permitido, siendo esto una inversión adicional.

Implementar el ruido como criterio de selección es relevante en la perspectiva sostenible de la metodología de diseño dado que incide sobre el ambiente y la sociedad al afectar la salud, el bienestar y aumentar el costo del sistema al requerir soluciones tecnológicas para atenuar los efectos del ruido generado cuando estos están por fuera de los permitidos por la ley.

El sonido se genera por acciones como la rotación, el deslizamiento, el flujo, los impactos, la oscilación, la vibración, la combustión, etc. Muchas de estas acciones ocurren en los sistemas de transporte de sólidos a granel, convirtiendo a estos equipos en fuentes de ruido [48]. La Tabla 30 muestra los componentes de cada familia de transportador que es catalogado como una fuente de ruido típica de acuerdo a Kulwiec [48].

Tabla 30. Componentes fuentes de ruido en transportadores de acuerdo a [48].

Familia de transportadores	Componentes
Banda	Rodamientos, banda, motor, transmisión, tolva, poleas, rodillos, descarga.
Cadena	Cadena, rueda, rodamientos, banda, motor, transmisión, tolva, descarga.
Tornillo	Tornillo, rodamientos, tolva.
Elevador de cangilones	Cangilones en carga, banda/cadena, polea/rueda, rodamientos, tolva, descarga.
Neumático	Ventilador/Compresor, Tubería con flujo, sistema de alimentación.
Hidráulico	Bomba, Tubería con flujo

La Tabla 31 muestra los niveles de preferencias de los sistemas basados en el ruido producido. Para estipular los niveles de preferencia se tuvo en cuenta literatura especializada [55], [48]. Se muestra poca preferencia para los sistemas hidráulicos y neumáticos debido al ruido producido en los procesos de compresión y de transporte a través de la tubería.

Tabla 31. Nivel de preferencia en función del ruido generado.

Familia de transportadores	Nivel de preferencia
Bandas	4
Cadena	4
Tornillo	4
Elevador de cangilones	4
Neumático	2
Hidráulico	3

Con estos niveles de preferencia se desarrolla la comparación pareada. La comparación pareada en función del uso del agua establece la preferencia entre la alternativa 2 (A2) con respecto la alternativa 1 (A1) de acuerdo a la Tabla 32.

Tabla 32. Comparación pareada en función del sub-criterio uso del agua.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	<i>Preferencia uso agua A1</i>
		<i>Preferencia uso agua A2</i>
Alternativa 2	<i>Preferencia uso agua A2</i>	1
	<i>Preferencia uso agua A1</i>	

La Tabla 33 muestra la comparación pareada en función de la generación de ruido entre transportador de cadena y transportador neumático, mostrando la preferencia dado el alto ruido generado por el compresor de un sistema neumático y el fluido en movimiento por las tuberías y accesorios.

Tabla 33. Ejemplo de comparación pareada en función del ruido generado.

	Cadena	Neumático
Cadena	1	$\frac{4}{2}$
Neumático	$\frac{2}{4}$	1

6.4.1.5. Modelo comparativo basado en la intensidad de recursos.

En un esquema de diseño sostenible es indispensable considerar la intensidad de recursos materiales y energéticos requeridos para la producción de un equipo, dada la capacidad limitada de los ecosistemas para hacer frente a la demanda actual de material y energía [56], [57]. Este modelo busca soportar la comparación entre transportadores continuos en función de sus requerimientos de recursos para la fabricación.

No hay evidencias de un modelo para estimar la intensidad de recursos para fabricar transportadores de sólidos a granel. Una aproximación con propósitos comparativos es considerar el peso total del sistema transportador, ya que este será un buen indicador de la cantidad de material utilizado para fabricarlo y es útil para estimar la cantidad energía requerida para transformar dicho material. También será importante identificar el tipo de materiales utilizados en cada sistema considerado. Teniendo en cuenta que predomina el uso de metales en los transportadores continuos a excepción de las bandas fabricadas de materiales no metálicos, se considera adecuado un modelo que permita estimar el peso de metales y no metales en los sistemas a considerar.

Para desarrollar el modelo de estimación de peso de material metálico y no metálico del sistema, se propone utilizar constantes que indiquen el peso por unidad de longitud y capacidad [kg/tph*m] o por unidad de capacidad del transportador [kg/tph], de manera que se pueda obtener una aproximación del peso del sistema al conocer la longitud y capacidad requerida. La ecuación (8) muestra la estimación del peso metálico y la ecuación (9) del peso de material no metálico en los transportadores.

$$m_{acero} = C_{aceroL} * L_c * \dot{m} + C_{aceroM} * \dot{m} \quad (8)$$

$$m_{polimero} = C_{polimeroL} * L_c * \dot{m} \quad (9)$$

Para estimar estas constantes, se realiza el siguiente procedimiento:

1. Inicialmente, en cada tipo de transportador considerado se determinan los elementos más relevantes en cuanto a su peso.
2. Se determinan el tipo de elemento adecuados para una aplicación dada en función del material transportado y la capacidad del sistema, tomando el peso por unidad de longitud o el peso total del elemento de manuales de diseño y catálogos.
3. Conocido el peso de cada elemento y la capacidad para la que es adecuado se determina la masa relativa de cada elemento por unidad de capacidad es decir kg/tph o por unidad de capacidad y longitud kg/tph*m
4. La masa relativa de todos los elementos metálicos y la de todos los elementos no metálicos se suma para obtener el valor de las constantes requeridas.

La Tabla 34 muestra el peso relativo de los componentes que mayor masa aportan a los sistemas considerados, a partir de estos valores y teniendo en cuenta su material principal, se determinan las constantes de material metálico y no metálico.

Tabla 34. Peso relativo de los principales componentes en transportadores.

Banda Transportadora		Elevador con cadena	
Rodillo Carga [kg/m*tpd]	0.018	Cadena [kg/m*tph]	0.913
Rodillo Retorno [kg/m*tph]	0.009	Cangilón [kg/m*tph]	1.755
Banda Carga [kg/m*tph]	0.029	Carcasa [kg/m*tph]	0.842
Banda Retorno [kg/m*tph]	0.031	Terminales [kg/tph]	16.000
Poleas y Terminales[kg/tph]	0.340		
Elevador con banda		Tornillo Transportador	
Peso Banda [kg/m*tph]	0.823	Tornillo [kg/m*tph]	0.868
Peso Cangilón [kg/m*tph]	1.755	Canal [kg/m*tph]	1.785
Peso Carcasa [kg/m*tph]	0.842	Accesorios [kg/m*tph]	0.198
Terminales [kg/tph]	16.000	Terminales [kg/tph]	0.510
Transportador de Placas		Transportador de Cadenas	
Placas [kg/m*tph]	1.560	Carcasa [kg/m*tph]	0.428
Rodillos Carga [kg/m*tph]	0.030	Cadena [kg/m*tph]	0.067
Rodillos Retorno [kg/m*tph]	0.010	Accesorios [kg/m*tph]	0.340
Accesorios [kg/tph*m]	0.198	Terminales [kg/tph]	0.410
Transportador Neumático		Transportador Hidráulico	
Tubería [kg/m*tph]	1.3	Tubería [kg/m*tph]	0.08
Terminales [kg/tph]	15	Terminales [kg/tph]	0.2

La Tabla 35 muestra las constantes del modelo para los sistemas estudiados.

Tabla 35. Constantes de peso relativo para el modelo comparativo de intensidad de recursos en fabricación de transportadores.

	C_{metL} Peso Metálico [kg/m*tph]	C_{metm} Peso Metálico [kg/tph]	$C_{no-metL}$ Peso No Metálico [kg/m*tph]
Banda Transportadora	0.03	0.80	0.06
Elevador con banda	2.60	16.00	0.82
Elevador con cadena	3.51	16.00	0.00
Tornillo Transportador	2.85	0.51	
Transportador de placas	1.60	0.20	
Transportador de cadenas	0.84	0.41	
Transportador Neumático	1.30	15.00	
Transportador Hidráulico	0.08	7.00	

Mediante las constantes presentadas en la Tabla 35 es posible estimar de manera aproximada el peso de cada alternativa considerada.

Para estimar la energía requerida para obtener los materiales metálicos y los no- metálicos, principalmente polímeros en las bandas, usados en cada alternativa, se usa la ecuación (10) y (11) respectivamente.

$$E_{acero} = CE_{acero} * m_{acero} \quad (10)$$

$$E_{polimero} = CE_{polimero} * m_{polimero} \quad (11)$$

Las constantes necesarias para estimar la energía requerida corresponden a la intensidad energética del material, la energía neta para fabricar una unidad del material. Estos datos son tomados de los listados de intensidad energética de materiales desarrollados por Spence & Cook [58].

Tabla 36. Intensidad energética de material en transportadores continuos.

	Acero	Polímero
Intensidad Energética [GJ/Ton]	40	70

Conocido la cantidad de recursos energéticos y materiales requeridos para la fabricación de los sistemas analizados, se debe definir preferencia en función de la intensidad total de recursos con propósitos de comparación pareada. La comparación se hará a partir del totalizado de recursos, la suma de recursos energéticos y de material requeridos, como lo muestra la ecuación (12).

$$Recursos\ totales = 0.5(m_{acero} + m_{acero}) + 0.5(E_{polimero} + E_{polimero}) \quad (12)$$

La comparación pareada en función de la intensidad de recursos se de acuerdo a la Tabla 37.

Tabla 37. Comparación pareada en función del sub-criterio intensidad de recursos.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	$\frac{recursos\ A2}{recursos\ A1}$
Alternativa 2	$\frac{recursos\ A1}{recursos\ A2}$	1

6.4.1.6. Modelo basado en el potencial de reciclaje y reúso de los componentes del sistema

Dada la limitada capacidad de las fuentes de recursos materiales para abastecer las necesidades actuales y de estrategias como la economía circular que toman fuerza en los métodos de diseño y los modelos empresariales, es importante considerar la capacidad de aprovechar los componentes del sistema al final de su ciclo de vida.

No hay evidencias de un modelo para estimar la capacidad de reciclaje o reúso de los componentes de transportadores continuos. Para desarrollar el modelo, se propone tener en cuenta la capacidad de reúso y reciclaje de estos componentes en función de su material, teniendo en cuenta que se ha identificado el extenso uso de metales especialmente aceros, exceptuando las bandas poliméricas.

Para considerar la capacidad de reciclaje de los componentes del sistema, se hará uso de índice de reciclaje R . Este índice corresponde a la fracción entre el precio unitario del material reciclado con el precio unitario del material virgen, a mayor valor del índice indica menor deterioro de las propiedades del material con el reciclaje, menor devaluación post-reciclaje y mayor viabilidad económica del proceso [59].

Dado que en los transportadores se tienen predominantemente dos tipos de materiales se desarrolla un índice de reciclabilidad para el sistema transportador, teniendo en cuenta la reciclabilidad del material principal de sus componentes y la masa relativa de estos con respecto a la masa total del sistema. La ecuación (13) se usa para estimar de la reciclabilidad del sistema.

$$R_{sistema} = \frac{m_{acero}}{m_{acero} + m_{no-met}} * R_{acero} + \frac{m_{polimero}}{m_{acero} + m_{polimero}} * R_{polimero} \quad (13)$$

Los índices de reciclabilidad del acero y del polímero de las bandas, R_{acero} y $R_{polimero}$, se utiliza la información suministrada en el informe *Análisis de Programas Nacionales de Reciclaje de Desechos Sólidos* [60] en el que se desarrollan funciones de costos para el reciclaje de distintos materiales. La Tabla 38 muestra los índices de reciclabilidad R_{acero} y $R_{polimero}$.

Tabla 38. Índices de reciclabilidad. [60]

R_{acero}	$R_{polimero}$
1.0	0.7

Un mayor índice de reciclabilidad del acero frente a los polímeros de las bandas sugiere que el reciclaje del primero presenta mayor viabilidad económica y resulta más atractivo.

Para analizar el potencial de reúso de los componentes del sistema, se debe tener en cuenta no solo su material si no también su geometría y nivel de degradación al final de la vida útil del equipo. Se definen índices de potencial de reúso de acuerdo al juicio de expertos para los componentes metálicos y las bandas no metálicas, RS_{acero} y $RS_{polímero}$, respectivamente. Con el uso de índices de potencial de reúso se define la ecuación (14) para estimar la viabilidad de reúso de componentes del sistema transportador.

$$RS_{sistema} = \frac{m_{met}}{m_{met} + m_{no-met}} * RS_{acero} + \frac{m_{no-met}}{m_{met} + m_{no-met}} * RS_{polímero} \quad (14)$$

La Tabla 39 muestra los índices de potencial de reúso de los componentes metálicos RS_{acero} y de las bandas $RS_{polímero}$, en transportadores continuos. Estos fueron establecidos mediante el juicio de expertos considerando la geometría y el nivel de degradación de los componentes metálicos y las bandas al final de la vida útil de los transportadores.

Tabla 39. índice de potencial de reúso de los componentes de transportadores.

RS_{acero}	$RS_{polímero}$
0.60	0.15

Para definir la preferencia a nivel de circularidad de los componentes del sistema se debe considerar el potencial de reciclaje y reúso, $R_{sistema}$ y $RS_{sistema}$. Es importante considerar que el reúso y el reciclaje permiten implementar la circularidad en el ciclo de vida de los materiales, pero el reúso es preferido frente al reciclaje dado que involucra menor procesamiento del material, con ello menor consumo de energía y depreciación de las propiedades del material. De acuerdo a la jerarquía establecida por Maccarini y Avellaneda [61], se prefiere en un 55% la implementación del reúso en un proceso circular con material industrial. La ecuación (15) permite definir la preferencia entre sistemas en términos de su potencial de reciclaje y reúso.

$$Preferencia_{R\&R} = 0.45R_{sistema} + 0.55RS_{sistema} \quad (15)$$

La comparación pareada en función del potencial para reúso y reciclaje de los componentes del sistema se establecerá entre la preferencia de la alternativa 2 (A2) con respecto la alternativa 1 (A1) de acuerdo a la Tabla 40.

Tabla 40. Comparación pareada en función del sub-criterio reciclaje y reúso.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	$\frac{Preferencia\ R\&R\ A1}{Preferencia\ R\&R\ A2}$
Alternativa 2	$\frac{Preferencia\ R\&R\ A2}{Preferencia\ R\&R\ A1}$	1

6.4.2. Modelo comparativo basado en criterio económico

El criterio económico se fundamenta en el costo de propiedad del sistema analizado durante su tiempo de depreciación, lo que permite priorizar las alternativas considerando todas las implicaciones económicas que tiene el equipo en esta ventana de tiempo [62]. El costo de propiedad a utilizar considera el precio de compra y gastos atribuibles como los costos de operación y de adquisición. El costo de propiedad durante el tiempo de depreciación del equipo, se estima mediante (16):

$$\text{Costo de propiedad} = \text{Precio de compra} + \sum \text{Gastos Atribuibles} \quad (16)$$

Los gastos atribuibles incluyen:

- Costo de operación: incluye los costos asociados a la energía, consumibles y mantenimiento.
- Costo de adquisición: incluye los costos asociados al diseño, al entrenamiento del personal, a los equipos auxiliares y conexiones, a la instalación y compra de equipos auxiliares y conexiones.

Considerando los rubros significativamente variables entre alternativas, que por tanto serán determinantes en los procesos de comparación pareada y los rubros que representan un amplio porcentaje de los gastos atribuibles, se determina únicamente incluir en el modelo el costo de compra, el costo de energía, el costo de mantenimiento, el costo de equipos auxiliares y conexiones y el costo de instalación.

Resulta conveniente incluir el concepto utilizado por Ulrich [63] conocido como costo del módulo, que integra el precio de compra del equipo, los gastos por compra de equipos auxiliares y conexiones necesarias para la operación y el precio de instalación del módulo, equipo principal y auxiliares. De esta manera se plantea el modelo de costo de propiedad en la ecuación (17):

$$\text{Costo de propiedad} = \text{Costo del Módulo} + \text{Costo Energía} + \text{Costo Mantenimiento} \quad (17)$$

La comparación pareada en función del costo de propiedad establecerá la preferencia entre el costo de la alternativa 2 (A2) con respecto al costo de la alternativa 1 (A1) de acuerdo a la Tabla 41.

Tabla 41. Comparación pareada en función del costo de propiedad.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	$\frac{\text{Costo total propiedad A2}}{\text{Costo total propiedad A1}}$
Alternativa 2	$\frac{\text{Costo total propiedad A1}}{\text{Costo total propiedad A2}}$	1

A continuación, se presentan los modelos para estimación del costo de módulo y los costos de energía y mantenimiento.

6.4.2.1. Modelo para estimación del costo del módulo

Con módulo entendemos el equipo principal, los equipos auxiliares y conexiones necesarias para la operación del primero, por tanto el costo del módulo incluye el precio de compra del equipo, los gastos por compra de equipos auxiliares y conexiones necesarias y el precio de instalación del módulo [63]. El costo del módulo se estima tomando como base el precio de compra del equipo principal, de acuerdo a la ecuación (18), donde C_d es el factor de costo del módulo que depende del costo de los equipos auxiliares, la infraestructura civil, eléctrica, neumática e hidráulica, etc. requerida por el equipo principal y las horas de trabajo necesarias para el montaje.

$$\text{Costo del Módulo} = C_d * \text{Precio de Compra} \quad (18)$$

El factor de costo de módulo ha sido definido para distintas familias de transportadores en el *Apéndice I: Costos de equipos* del libro *Economía de la Ingeniería Química* [64]. En la Tabla 42 se resumen los valores de C_d :

Tabla 42. Valores del factor de costo de módulo de acuerdo a [64].

Familia de transportadores	Factor C_d
Bandas	2.4
Cadena	2.2
Tornillo	2.2
Elevador de cangilones	2.4
Neumático	2.2
Hidráulico	2.4

Definido el factor de módulo C_d , se debe definir el método para estimación del precio de compra del equipo principal. El precio de compra considera la inversión necesaria para adquirir el sistema. Existen distintos modelos para estimación de costos de equipos de ingeniería, uno popular para transportadores de sólidos a granel es el método del factor potencial, este método está basado en el concepto de economía de escala que considera que el costo tiende a incrementarse de manera potencial con el tamaño o la capacidad del producto [65].

En el Apéndice I: Costos de equipos del libro *Economía de la Ingeniería Química* [64] y en el *Manual de Estimación Conceptual de Costos* [66] se utiliza el método del factor exponencial para estimación de costos de transportadores en una etapa conceptual. El método factorial estima el costo de un equipo transportador de determinada longitud basado en el costo de un transportador de las mismas características, longitud distinta y tamaño distinto utilizando exponentes de longitud y tamaño. El tamaño hace referencia a un atributo propio de cada tipo de transportador, por ejemplo, el ancho de la banda transportadora, el diámetro del tornillo transportador o la tubería de un transportador neumático, el tamaño de los cangilones de un elevador, etc. La ecuación (19) se utiliza para la estimación de costo de transportadores de acuerdo a este método.

$$\text{Precio compra (Longitud 2)} = \text{Costo Longitud 1} \left(\frac{\text{Longitud 2}}{\text{Longitud 1}} \right)^{\text{Exp. Long.}} * \left(\frac{\text{Tamaño 2}}{\text{Tamaño 1}} \right)^{\text{Exp. Tam.}} \quad (19)$$

La Tabla 43 muestra los Costos de entrada para estimación o Costos Longitud 1, la longitud para este costo, los exponentes de longitud y tamaño de acuerdo a la información suministrada en el Apéndice I: Costos de equipos del libro *Economía de la Ingeniería Química* [64].

Tabla 43. Parámetros para estimación conceptual de costos de transportadores de acuerdo a [57].

	Costo Long. 1 [\$ USD]	Exponente Longitud	Long. 1 [ft]	Tamaño 1	Exponente Tamaño
Banda	4000	0,76	10	Ancho banda: 16 pulg.	0,6
Tornillo	2000	0,78	9	Diámetro tornillo: 9 pulg.	1,2
Elevador	4000	0,5	12	Cangilón: 6 x 4 pulg.	0,37
Neumático	38000	0,37	30	Diámetro: 3 pulg.	0,55

Aunque el método y la información suministrada por Garrett [64] ha sido ampliamente utilizada para el desarrollo de presupuestos, se considera que presenta algunas dificultades para ser incluida en esta metodología. Esta información solo incluye algunas de las familias de transportadores consideradas, dejando por fuera los transportadores de cadenas e hidráulicos y sin considerar las diferencias de costos entre tipos de transportadores de una misma familia. Por otro lado, el factor de tamaño resulta poco conveniente para una etapa conceptual dado que el tamaño del sistema se obtiene al evaluar normas o recomendaciones de fabricante teniendo en cuenta la capacidad y el material a transportar, por lo que un factor capacidad sería más conveniente al ser una especificación inicial. Además, los costos presentados por Garrett [64] se consideran desactualizados dado que el libro fue presentado en 1998. Por estas dificultades se propone desarrollar un modelo de costos de transportadores para ser incluido en esta metodología.

El modelo propuesto es de tipo factor potencial, cambiando el factor de tamaño por un factor de capacidad y utilizando costos y exponentes adecuados a la presente década. Se presenta la ecuación del modelo propuesto:

$$\text{Costo Longitud 2} = \text{Costo Longitud 1} \left(\frac{\text{Longitud 2}}{\text{Longitud 1}} \right)^{\text{Exp. Long.}} * \left(\frac{\text{Capacidad 2}}{\text{Capacidad 1}} \right)^{\text{Exp. Cap.}} \quad (20)$$

La Tabla 44 presenta la información necesaria para la estimación de costos utilizando el método del factor exponencial presentado en la ecuación (7), para los distintos transportadores considerados como posibles alternativas dentro de esta metodología. Los exponentes fueron estimados a partir de información obtenida en bases de datos, herramientas de cálculo de costos de equipos y literatura especializada como *Diseño de Plantas y Economía para Ingenieros Químicos* [67]. La información presentada en esta tabla corresponde a datos del año 2018.

Tabla 44. Parámetros para estimación conceptual de costos de transportadores, para el año 2018, con el método propuesto.

	Costo Long. 1 [USD]	Exponente Longitud	Long. 1 [m]	Capacidad 1 [TPH]	Exponente Capacidad
Banda grado 1	4300	0,76			
Banda grado 2	5160	0,82			
Banda con resistencia a aceites	5590	0,84			
Banda con resistencia media a aceites	4945	0,80	3	35	0,46
Banda EPDM	6020	0,80			
Banda con nervios (depende material)	5590-7826	0,86			
Transportador de placas	12000	0,58	2,1	141	0,47
Transportador de arrastre	2200	0,54	2,1	20	0,60
Transportador rascador	1800	0,62	2,1	20	0,58
Transportador tipo <i>En-Masse</i>	10000	0,64	2,1	140	0,45
Tornillo	2300	0,58	3,7	3,15	0,31
Elevador Descarga centrifuga	3900	0,5	3,7	8,8	0,26
Elevador Descarga continua	4900	0,45	3,7	35,4	0,31
Elevador Cangilones súper capacidad	7500	0,5	3,7	78,75	0,33
Descarga positiva	3100	0,45	3,7	6	0,30
Diluta presión positiva con ventilador	12000	0,20	10	0,9	0,7
Diluta presión negativa con ventilador					
Diluta presión positiva con <i>blower</i>	140000	0,17	10	36	0,44
Diluta presión negativa con <i>blower</i>					
Fase densa compresor tanque de soplado	310000	0,20	10	180	0,40
Homogéneo	600000000	0,37	396000	1370	1,05
Heterogéneo					

Utilizando los datos de la Tabla 44 se puede estimar el precio de compra y con ello el costo del módulo.

Al analizar la tabla 44 se observa que existen diferencias a nivel de costos dentro de una misma familia de transportadores. Ejemplo de esto es la familia de bandas transportadores, en estas las prestaciones adicionales que ofrecen las bandas especiales también implican un aumento en el precio de compra del equipo. Una banda con resistencia a químicos o para operación a altas temperaturas tendrá un mayor precio de compra que una banda grado 1 sin resistencia a altas temperaturas, sin resistencia a químicos y recomendada para materiales poco abrasivos.

La figura 9 muestra el precio de compra en dólares de algunos sistemas operando horizontalmente en función de su distancia de transporte a distintas capacidades para observar el efecto de la longitud y la capacidad sobre el precio del sistema. Se observa costos de sistemas para transporte horizontal a distintas longitudes y capacidades. Se observa que el mejor desempeño en términos de precio de compra dependerá de la capacidad y distancia de transporte requerida. Sin embargo, de manera general, la figura indica que el sistema neumático no resulta atractivo en términos de precio de compra de equipos en operación horizontal.

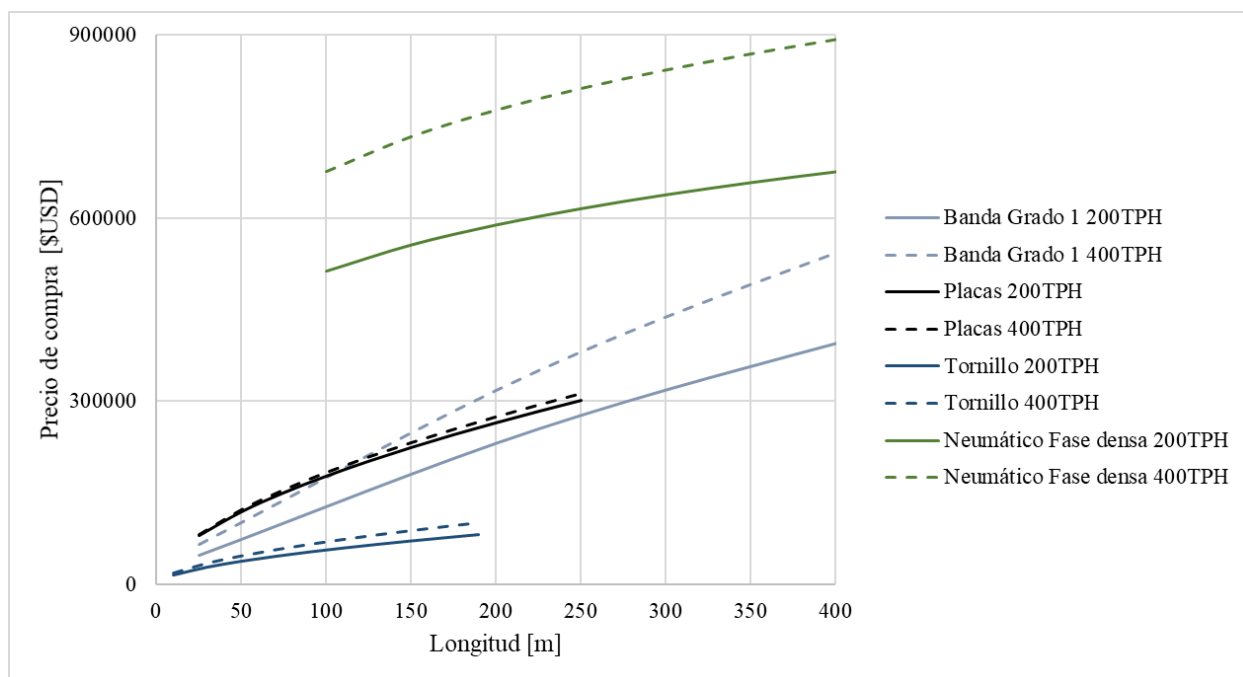


Figura 9. Precio de compra para sistemas de transporte en operación horizontal a distintas capacidades y distancias de transporte.

Al incluir accesorios o materiales especiales aumenta el costo del sistema, esto se puede tener en cuenta con un factor especial que se multiplica por el precio de compra para obtener el nuevo valor del equipo. Al usar bandas con cubierta el factor es 1.2 y al usar sistemas neumáticos con materiales inoxidables como el 304 el factor es de 1.8.

6.4.2.2. Modelo para estimación de los costos de operación

Los costos operacionales consideran aquellos asociados a la operación de la máquina y son de naturaleza variable dependiendo de la tasa de trabajo del equipo. Para este caso se manifestó considerar los costos de energía y costos de mantenimiento que incluye los gastos por mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo y reemplazo de partes. La estimación del costo operacional se realiza de acuerdo a la ecuación (21).

$$\text{Costo Operacional} = \text{Costo Energía} + \text{Costo Mantenimiento} \quad (21)$$

El costo asociado al consumo de energía puede ser determinado utilizando la ecuación (21) para estimación de los requerimientos de potencia a partir de los requerimientos de potencia promedio específicos y localizado, el costo de la energía en el lugar de instalación del equipo y el tiempo de uso del equipo en la ventana de tiempo de análisis. De acuerdo a esto y teniendo en cuenta que los costos se realizan en el ciclo de vida, el costo de la energía se estima de acuerdo a la ecuación (21):

$$\text{Costo Energía} = (\dot{m}L_c RPE + \dot{m}RPL) * \text{Horas Operación} * \text{Costo Wh} \quad (21)$$

Utilizando el requerimiento de potencia promedio específico RPE para operación horizontal, inclinada y vertical de las figuras 4, 5 y 6 respectivamente, el requerimiento de potencia localizado RPL de la figura 7 y el costo promedio de la energía en sector industrial en los Estados Unidos 6.9 centavos de dólar por kWh, se estima el costo asociado al consumo de energía de los equipos considerados en la metodología.

Con propósitos de comparación se realiza la estimación de un costo de la energía en basa relativa, costo por transportar 1000 toneladas de material una distancia de 1 metro. Este costo se estima como función de la distancia de transporte para observar el efecto del requerimiento de potencia localizado, a mayor distancia de transporte el costo relativo disminuye.

La figura 10 compara el costo relativo asociado al consumo de energía para equipos en operación horizontal, se observa que la banda presenta el menor costo por consumo de energía, lo cual se esperaba dado que presenta los requerimientos de potencia específicos y localizados más bajos. Se observa que no hay variación en el costo relativo de la energía en función de la longitud de transporte para el tornillo, dado que su modelo no considera potencia localizada. Es notable que el costo por consumo de energía no es una fortaleza para el transporte neumático, por tanto, su selección estará ligado a otros atributos.

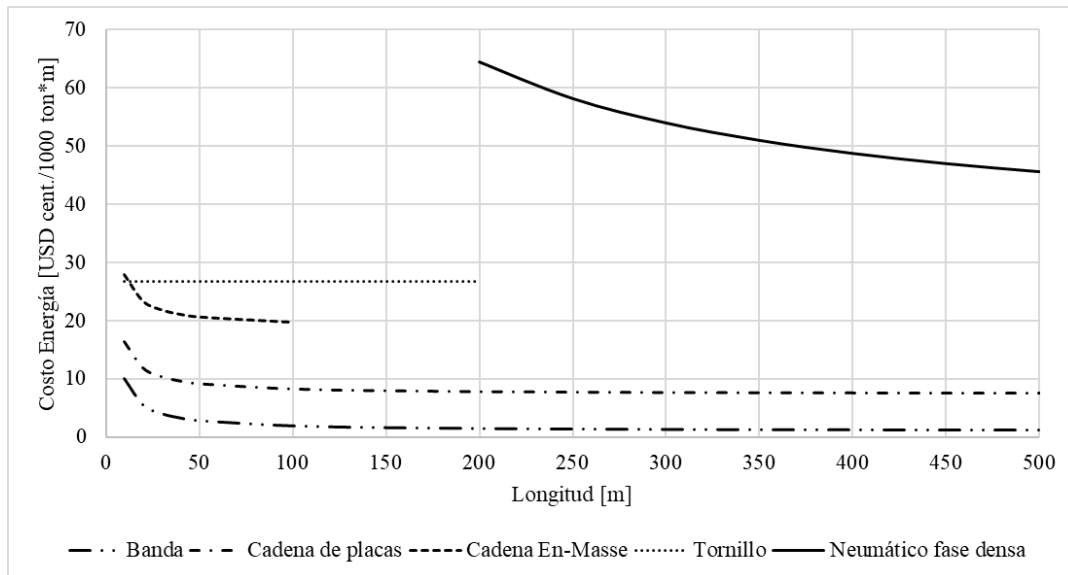


Figura 10. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud de transporte para operación horizontal.

La figura 11 muestra la comparación del costo para transporte horizontal en grandes distancias. Hay una disminución del costo relativo en función de la longitud para el transporte hidráulico por el alto consumo de energía localizado en la deshidratación del material. Se observa que en términos de costo de energía el transporte neumático e hidráulico no son competitivos con la banda. Por tanto, la implementación del sistema hidráulico está recomendado únicamente para longitudes de transporte inviables para las bandas y cualquier otro tipo de sistema o cuando el trayecto implica notables cambios de nivel y curvas.

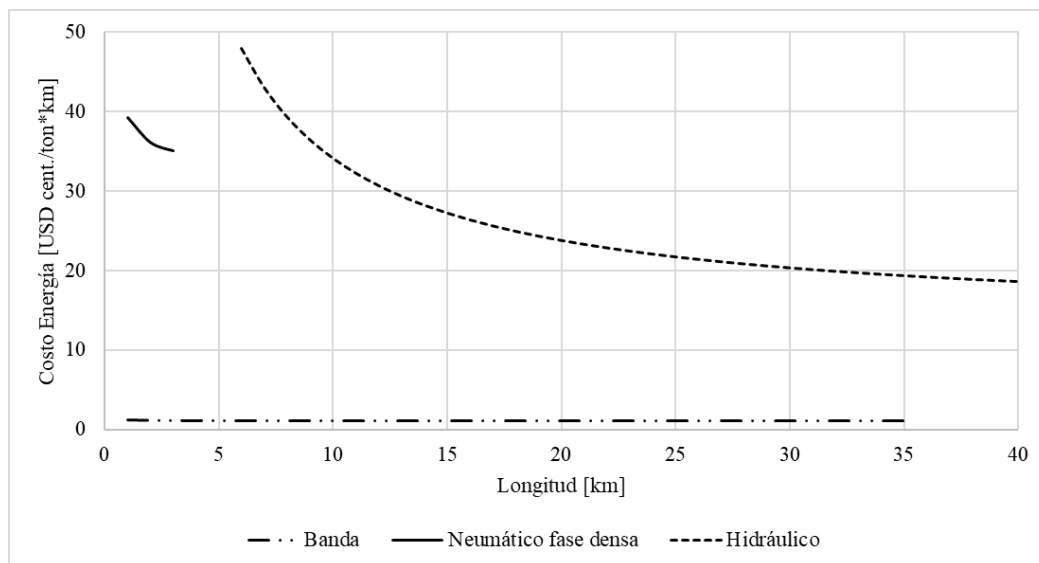


Figura 11. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud para operación horizontal en grandes distancias.

La figura 12 muestra la comparación del costo relativo de la energía para operación inclinada. La banda presenta menor costo por energía, pero los transportadores de cadenas se muestran competitivos para esta aplicación.

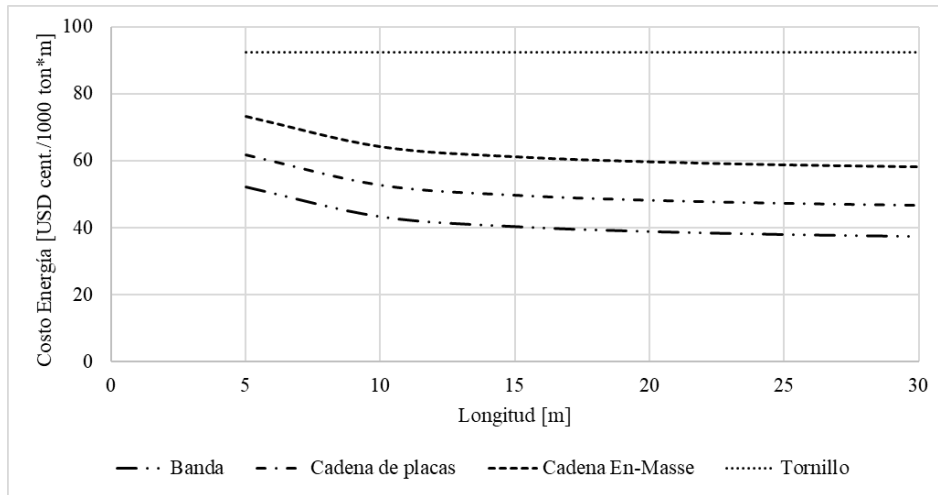


Figura 12. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud de transporte para operación inclinada.

La figura 13 muestra la comparación del costo relativo de la energía para operación vertical. Se observa que en términos de costos de energía es preferible el uso de elevadores con descarga continua a distancias de elevación reducidas, pero a distancias mayores a los 30 metros no hay una diferencia notable. La implementación de cada tipo de elevador dependerá de la naturaleza del material transportado, por ejemplo, elevador de descarga continua para materiales abrasivos y elevadores de descarga positiva para materiales con poca fluidez.

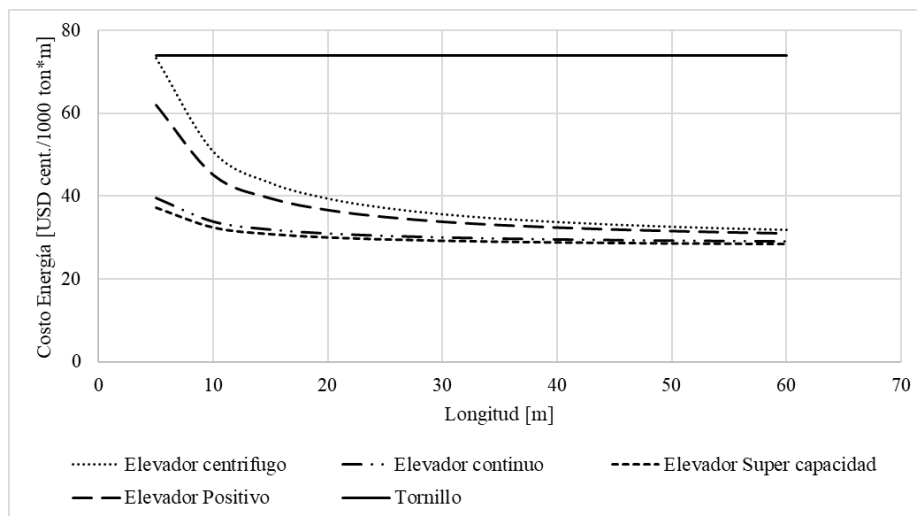


Figura 13. Costo relativo del consumo de energía en función de la longitud de transporte para operación inclinada.

Para la estimación de los costos totales de mantenimiento en el tiempo de depreciación del sistema, se usa el modelo presentado en el *Manual de Gerencia de Mantenimiento e Ingeniería* [68] que considera que el costo total de mantenimiento puede ser estimado considerando las horas acumuladas de uso h , el precio de compra del equipo, como reflejo del tamaño del equipo, y dos factores RF1 y RF2 que consideran el tipo de equipo y las condiciones de operación (material transportado y ambiente de trabajo). La ecuación (22) muestra el modelo de costo total de mantenimiento:

$$\text{Costo Total de Manimiento} = RF1 * \text{Precio de compra} * \left(\frac{h}{1000} \right)^{RF2} \quad (22)$$

El uso de la ecuación (8) se dificulta por los factores RF1 y RF2 dado que varían con las condiciones de operación. Materiales más abrasivos, mayor capacidad y velocidad del equipo incrementan estos factores y los costos de mantenimiento. Sin embargo, las condiciones de operación son iguales para las alternativas a evaluar y sus años de depreciación y por tanto horas acumuladas también son semejantes, se puede utilizar un modelo simplificado basado en el costo de compra del equipo para estimar el costo total de mantenimiento.

CEMA sugiere usar el 5 % del precio de compra de una banda transportadora para predecir su costo anual de mantenimiento [5], asumiendo una vida útil promedio de 10 años se tendría unos costos totales de mantenimiento de 50 % del precio de compra. Teniendo esto en cuenta se plantea la ecuación (23) para estimar el costo total de mantenimiento con finalidad de comparación entre alternativas:

$$\text{Costo Total de Manimiento} = C_m * \text{Precio de compra} \quad (23)$$

La ecuación 11 se considera adecuada para una fase conceptual por las razones ya presentadas. El factor C_m depende del tipo de familia de transportador y se definen sus valores considerando recomendaciones de fabricantes y normas y teniendo en cuenta el nivel y frecuencia requerido. La Tabla 45 se muestran sus valores.

Tabla 45. Factor para estimación del costo total de mantenimiento a partir del precio de compra.

Familia de transportadores	Factor C_m
Bandas	0,5
Cadena	0,5
Tornillo	0,65
Elevador de cangilones	0,5
Neumático	0,7
Hidráulico	0,6

6.4.3.3. Modelo comparativo basado en el costo de propiedad

Desarrollado los modelos para estimación del costo del módulo y costos operacionales, se retoma el modelo de costo de propiedad que fue presentado en la ecuación (16) y esta ecuación se reescribe teniendo en cuenta los resultados previos, dando como resultado la ecuación (24).

$$\text{Costo total propiedad} = (C_d + C_m) * \text{Precio de compra} + \text{Costo Energía} \quad (24)$$

A fin de caracterizar y comparar los sistemas en una condición de diseño específica, se estima el costo de propiedad para sistemas en operación durante 10 años, estimando los costos de energía y mantenimiento para operar de forma continua y constante a 200 TPH en transporte horizontal durante este intervalo de tiempo e incluyendo el costo del módulo para los equipos considerados. La figura 14 muestra los resultados de este análisis de costo de propiedad en función de la distancia de transporte. Estos son resultados propios de la capacidad analizada, el modelo desarrollado debe ser empleado para cada caso particular de diseño.

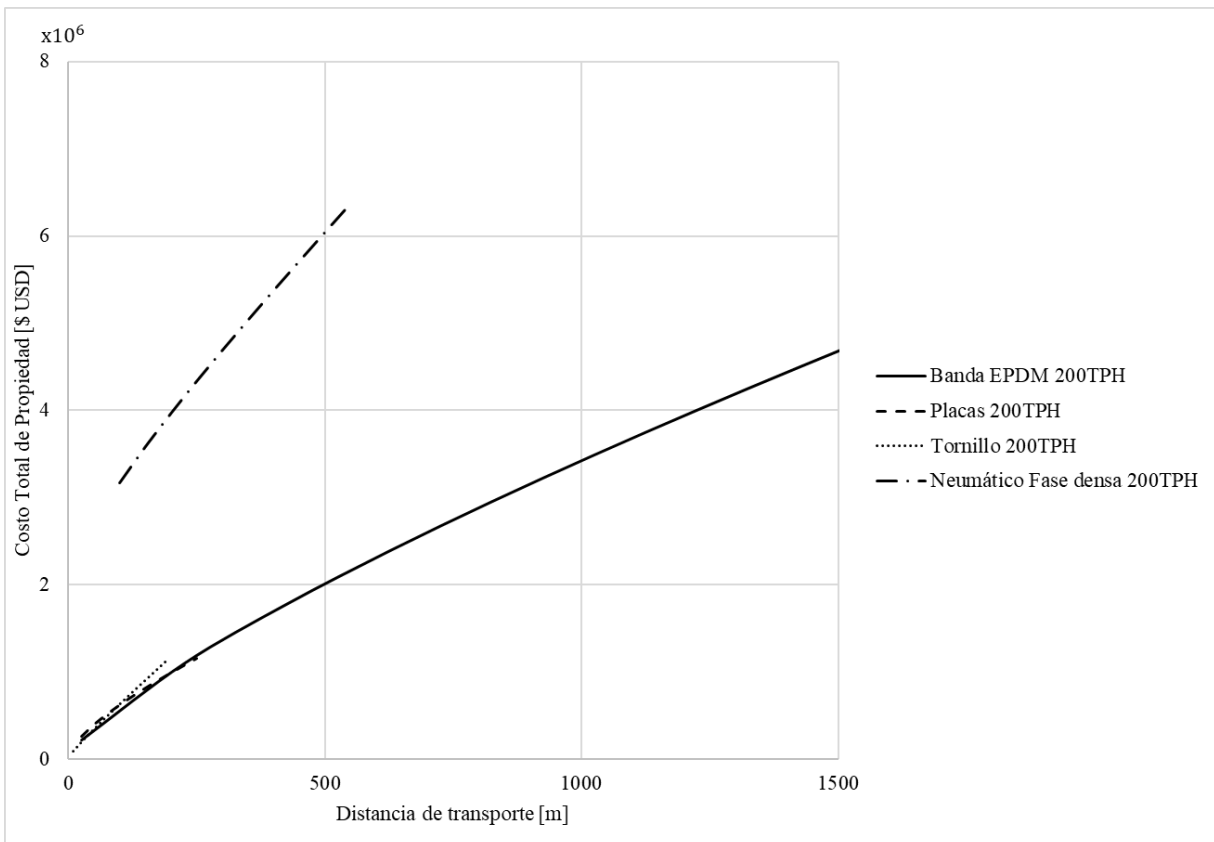


Figura 14. Costo de propiedad de algunos sistemas con capacidad de 200 TPH a distintas longitudes.

De acuerdo a la figura 14 los sistemas más atractivos en términos del costo son el transportador de placas y la banda transportadora a distancias mayores a los 50 metros, a distancias menores el transportador de tornillo presenta menor costo para el caso analizado de una capacidad de 200 TPH. Se observa un alto costo del sistema neumático, en promedio 3.5 veces el costo de una banda para la misma capacidad y distancia de transporte. De acuerdo a la figura a la figura 9, el precio de compra de los sistemas neumáticos es mayor en comparación con los sistemas mecánicos y además tendrá un consumo de energía significativamente mayor.

Buscando entender el comportamiento de costos del caso de análisis se detalla la distribución de costos con sistemas de 200 TPH y 100 metros de distancia de transporte en la Tabla 46. Para este caso se observa un menor costo en la banda transportadora a causa de su bajo costo de energía, a pesar de que el transportador de placas tiene menor costo de módulo y mantenimiento para esta especificación de diseño. El tornillo transportador presenta un costo de módulo y mantenimiento menores a los del transportador de placas y banda, pero su costo de energía es aproximadamente 2 veces el de estos equipos y por ello el costo de los tres equipos es bastante comparable para esta aplicación. Para el caso del transportador neumático, se presenta mayor costo en cada uno de los componentes, siendo más significativa la diferencia en el costo de energía que llega a ser hasta 56 veces el costo de la energía en la banda.

Tabla 46. Costos, en millones de dólares, de sistemas de 200 TPH y 100 metros de distancia de transporte horizontal.

	Costo Módulo	Costo Mantenimiento	Costo Energía	Costo de Propiedad
Banda EPDM	0,46 (78%)	0,10 (16%)	0,03 (6%)	0,59
Placas	0,39 (62%)	0,09 (14%)	0,15 (23%)	0,62
Tornillo	0,12 (20%)	0,04 (6%)	0,47 (74%)	0,63
Neumático Fase densa	1,13 (36%)	0,36 (11%)	1,68 (53%)	3,17

Teniendo en cuenta los análisis realizados, el beneficio económico obtenido al implementar una banda transportadora se debe al bajo consumo de energía asociado a su operación.

En operación inclinada y vertical el consumo de energía es mayor y por tanto el costo de la energía tiene un mayor efecto en el costo de propiedad, por tanto, para este tipo de operación es altamente deseable un bajo consumo.

6.4.3. Modelos comparativos basados en sub-criterios social

Los siguientes modelos soportan la comparación de las alternativas en términos del impacto de la operación sobre personal y comunidades cercanas en términos del deterioro de la salud o riesgos durante la operación, seguridad.

6.4.3.1. Modelo comparativo basado en el impacto sobre la seguridad

La operación de los distintos transportadores considerados puede comprometer la seguridad de los operadores y el personal de mantenimiento. El estándar de seguridad ANSI B 20.1 *Norma de Seguridad para Transportadores, Teleféricos y Equipos Relacionados* [69] emite recomendaciones para el diseño, construcción, instalación, mantenimiento, inspección y operación de transportadores relacionado con el riesgo de accidentes.

A fin de definir los niveles de preferencia de las alternativas en función del impacto sobre la seguridad, en la Tabla 47 se identifican los riesgos de accidentes asociados a cada familia de transportador y las recomendaciones para minimizar los riesgos de acuerdo al estándar ANSI B 20.1.

Tabla 47. Riesgo de accidentes y recomendaciones para prevenirlos por familia de transportador.

Familia de transportador	Riesgo de accidente	Recomendaciones
Banda	Partes del cuerpo o ropa atrapada entre banda y polea	Uso de guardas. Equipo detenido y bloqueado durante operaciones de mantenimiento
	Carga deslizándose hacia abajo	Uso de backstops
	Riesgo de caída de operador de un tripper	Plataforma adecuada
Cadena	Sobrecarga	Protección de sobrecarga
	Extremidades o ropa atrapada	Uso de guardas y pasamanos. Equipo detenido y bloqueado durante operaciones de mantenimiento
Tornillo	Carga deslizándose hacia abajo.	Uso de backstops
	Rodamientos lubricados en zonas con acceso peligroso	Tubería para lubricación
Elevador	Riesgo impacto o contacto con partes móvil o material	Canal con cubierta
	Riesgo impacto o contacto con partes móvil o material	Elevador completamente encerrado
Neumático Hidráulico	Apertura en puertas de recipientes de presión	Diseño adecuado puertas y empaques

Se identifica que los riesgos de accidentes asociados a los transportadores se pueden minimizar con las consideraciones adecuadas durante el diseño y buenas prácticas en los procesos realizados sobre estos sistemas. Por tanto, estos riesgos de accidente no inciden de manera significativa sobre la preferencia de algún sistema en el proceso de priorización.

A nivel de seguridad también es importante considerar el riesgo de explosión debido a polvo no-fugitivo. De acuerdo a Wypych [70], la mayoría de sólidos a granel polvorosos pueden causar una explosión cuando se combinan con la cantidad adecuada de oxidante en presencia de una fuente de ignición.

Eliminar las fuentes de ignición y reducir la generación de polvo no-fugitivo puede disminuir el riesgo de explosión pero usualmente no se puede garantizar la total prevención de este por lo que se requieren estrategias de protección como la ventilación para alivio de presión [70]. Dado que hay diferencias en el nivel de generación de polvo no-fugitivo en cada familia de transportador, independiente del material y las fuentes de ignición, se tiene diferencias en el riesgo de explosión dependiente del tipo de transportador.

Para el desarrollo del modelo comparativo entre soluciones se tiene en consideración la escala comparativa de generación no fugitivo en función del tipo de transportador propuesto por Fayed [71]. La Tabla 48 muestra la escala propuesta por Fayed y los niveles de preferencias propuesto para propósitos de comparación pareada en el método *AHP* derivada de esta información.

Tabla 48. Generación de polvo no fugitivo y niveles de preferencia en función del impacto en seguridad.

Familia de transportadores	No fugitivo	Nivel de preferencia
Banda	0	5
Banda con cubierta	2	3,5
Cadena no cerrada	1	4
Cadena cerrada	2	3,5
Tornillo	2	3,5
Elevador	4	2
Neumático fase diluta	5	1
Neumático fase densa	3	3
Hidráulico	0	5

Con estos niveles de preferencia se desarrolla la comparación pareada en función de la seguridad fundamentado en el riesgo de explosión, otros tipos de riesgo no fueron considerados ya que no había diferencia significativa en el nivel de riesgo entre las familias de transportadores y estos riesgos eran controlables en todos los transportadores considerados desde el diseño y las buenas practicas. En cambio, el riesgo de explosión difiere entre tipo de transportador por lo tanto los niveles de protección de explosión serán diferentes entre ellos.

La comparación pareada en función de la seguridad establecerá la preferencia entre la alternativa 2 (A2) con respecto la alternativa 1 (A1) de acuerdo a la Tabla 49.

Tabla 49. Comparación pareada en función del sub-criterio seguridad.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	<u>Preferencia seguridad A1</u> <u>Preferencia seguridad A2</u>
Alternativa 2	<u>Preferencia seguridad A2</u> <u>Preferencia seguridad A1</u>	1

La Tabla 50 muestra la comparación pareada en función de la seguridad para una banda con cubierta (preferencia 3.5) y un transportador de cadena no cerrada (preferencia 4) como alternativas, mostrando mayor conveniencia para el transportador de cadena, que requerirá menor nivel de protección ante explosión.

Tabla 50. Ejemplo de comparación pareada en función de la seguridad.

	Banda con cubierta	Tornillo
Banda con cubierta	1	<u>3.5</u> <u>4</u>
Tornillo	<u>4</u> <u>3.5</u>	1

6.4.3.2. Modelo comparativo basado en el impacto sobre la salud

El principal impacto de la operación de los transportadores continuos de sólidos a granel sobre la salud está relacionado con las emisiones fugitivas que conllevan a problemas en la salud al ser inhalados y el ruido que conlleva al deterioro de la audición. Teniendo en cuenta lo definido para las emisiones fugitivas y el ruido, en la Tabla 51 se definen los niveles de preferencia en función de lo establecido para el ruido y las emisiones fugitivas.

Tabla 51. Niveles de preferencia en función del impacto en salud.

Familia de transportadores	Nivel de preferencia
Bandas	2,5
Banda con cubierta	3,5
Cadena no cerrada	3,5
Cadena cerrada	4
Tornillo	4,5
Elevador de cangilones	4,5
Neumático	3,5
Hidráulico	3,5

La comparación pareada en función del impacto sobre la salud establecerá la preferencia entre la alternativa 2 (A2) con respecto la alternativa 1 (A1) de acuerdo a la Tabla 52.

Tabla 52. Comparación pareada en función del sub-criterio seguridad.

	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	<u>Preferencia emisiones A1</u> <u>Preferencia emisiones A2</u>
Alternativa 2	<u>Preferencia emisiones A2</u> <u>Preferencia emisiones A1</u>	1

La Tabla 53 muestra la comparación pareada en función del impacto sobre la salud para una banda preferencia 2.5) y un transportador neumático (preferencia 3.5) como alternativas, mostrando mayor conveniencia para el transportador neumático.

Tabla 53. Ejemplo de comparación pareada en función del impacto en la salud.

	Banda	Neumático
Banda	1	<u>2.5</u> <u>3.5</u>
Neumático	<u>3.5</u> <u>2.5</u>	1

7. Verificación de la funcionalidad y el valor agregado de los elementos incorporados, mediante casos de estudio, para el diseño conceptual de transportadores continuos con un enfoque de sostenibilidad.

Se propone realizar casos de estudio del diseño conceptual de transportadores continuos implementando la estructura metodológica presentado con los elementos que se han integrado al proceso para la aproximación sostenible. Se busca comparar los resultados obtenidos del proceso de diseño conceptual incorporando elementos para la aproximación sostenible contra resultados obtenidos mediante metodologías de diseño conceptual tradicionales, buscando identificar el valor agregado de incluir la sostenibilidad en el proceso.

7.1. Caso de Estudio 1

Como caso de estudio se toma el problema de diseño de transportar nitrato de amonio a una tasa de 35,64 TPH en trayecto con inclinación de 25° y una distancia de transporte de 12,55 m, en una planta de emulsión explosiva en una mina de carbón a cielo abierto. La figura 15 muestra el tornillo transportador instalado actualmente para la aplicación descrita. El diseño conceptual para este problema de ingeniería fue realizado por una firma de ingeniería durante el diseño de la planta, utilizando metodologías tradicionales.



Figura 15. Tornillo transportador utilizado actualmente y problema analizado en el caso de estudio 1.

Se procede a realizar el diseño conceptual para el problema de transporte considerado, haciendo uso de la estructura de diseño propuesta y los elementos incorporados.

7.1.1. Definición de las especificaciones

La Tabla 54 muestra la definición de las especificaciones necesarias para el caso de estudio. Las características del material fueron obtenidas de manuales CEMA [6]. Las especificaciones convenientes se buscan minimizar y se consideraran en el proceso de priorización.

Tabla 54. Definición de especificaciones para el caso de estudio 1.

Especificación Necesarias	Definición de especificación
Flujo de material	35,64 TPH
Distancia de transporte	12,55 m
Ángulo de elevación	25 °
Temperatura del material	≈30 °C (Ambiente)
Puntos de entrega	Único
Puntos de entrada	Único
Tipo de sistema	Móvil
Tipo de trayecto	Inclinado
Funciones adicionales	Auto-alimentación (Deseable)
Densidad	864 kg/m ³
Alta resistencia química	No
Material frágil	No
Material polvoroso	Sí
Abrasividad del material	Media
Tamaño material	Muy fino
Corrosividad del material	Media
Fluidez del material	Media
Material Húmedo	No
Otras características	Explosivo/Higroscópico

7.1.2. Generación de alternativas

Teniendo en consideración las especificaciones convenientes y la matriz de generación de alternativas, Tabla 13, se definen los sistemas a considerar en el diseño conceptual. A partir de la matriz de generación de alternativas, se definen como alternativas bandas transportadoras, transportadores de cadena, tornillos transportadores y elevadores de cangilones. Los sistemas neumáticos dado que se conoce que son inadecuados a nivel de costos y los sistemas hidráulicos no son considerados como alternativas ya que no son competitivos a bajas capacidades y distancias de transporte.

A continuación, se ilustra la implementación de la matriz de generación de alternativas. Cada atributo de un sistema que cumpla con su especificación correspondiente es marcado en verde indicado que habilita la definición de dicho sistema como alternativa. Aquel sistema al que se le hayan validado todos sus atributos, es decir, toda su columna este de color verde es considerado una alternativa.

Se observa que se han definido como alternativas los sistemas 6, 10, 11 y 14.

Tabla 55. Implementación de la matriz de generación de alternativas para el caso de estudio 1.

		Posible Alternativa N°																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
A t r i b u t o s N o	1	20000					1200	40	300	1000	2000	170	184	170	170-465	40	20-100	1-20	100-200	200-300	20-400	700-1300				
	2	35000					250	40	30	150	200	15	60				60	30	60	150	2500	800000				
	3	20			30		30	0	0	90	45	90	90				90°					6	6			
	4	70		600		70/200		600				250				540				200					-	
	5	U.					U.	Mu.				Mu.	U.	U.				U.	Mu.	U.	Mu.	Mu.	Mu.	U.		
	6	Mu.					U.	Mu.				Mu.	U.	U.				Mu.	U.	Mu.	U.	Mu.	U.			
	7	H./L./H.-I.					H. H.-I.	H.	H.	H./V./ H.- V./ H.-I.	H./I.	V.	I./I.-V./V.				H./V./H.-V.					H./H.-I./I./V./N.L.				
	8	N. (Requiere alimentador externo)					A. C.-E.				A./C.-E./ Me./Com./R.	N.	N.				Me.					N.				
	9	No	N o	Sí	Sí	No	No	Sí (Car. Especiales)				Sí (Car. Especiales)				Sí (Car. Especiales)				Sí (Car. Especiales)					Sí (Car. Especiales)	
	10	Sí					Sí	No	Sí	Sí	No				No	Sí	Sí	Sí	No					Sí	Sí	
	11	Sí (Car. Especiales)					Sí	Sí	Sí	Sí	Sí				Sí				Sí					Sí		
	12	B.	E.	M.			E.	M.	M.	M.	Mo. (Car. Especiales)				N. A.	E.	E.	Mo.	Mo.			E.	M.			
	13	M.F.-G./ A./ I.					F.- G.	M.F.- G.	F.- G.	M.F.- G.	M.F.-G.				F.- G.	M.F.-G.	M.F.- At.	M.F.-G.	F.-G.					M.F.	F./G./At.	
	14	B.	B	M.	M.	N.C.	A.	A.	M.	M.	M.	A. (Car. Especiales)				Mo. (Car. Especiales)				A. (Car. Especiales)					Sí	
	15	B.					A.	M.	B.	M.	M. (Car. Especiales)				B.	M.	M.	B.	B.			M.	M.			
	16	Sí (Car. Especiales)					Sí (Car. Especiales)				Sí (Car. Especiales)				No	No	Sí	Sí	No					Sí		

De acuerdo a la Tabla 55, se considera como alternativa la banda transportadora con nervios. Esta es la única alternativa dentro de la familia de bandas dado que solo esta puede cumplir con el requerimiento de los 25° de inclinación [5]. Aunque las bandas no cuentan con función de auto-alimentación, esta puede ser realizada al implementar un alimentador antes de la banda lo que implicará un mayor costo inicial para el sistema. Dada la abrasividad media del material, se debe usar una banda grado 2. La banda requiere de una cubierta dado que el material es polvoroso.

De acuerdo a la Tabla 55, se considera como alternativa el transportador de cadena tipo En-Masse. Los transportadores de arrastre y rascador no se consideran alternativas dado que no se recomiendan para operación inclinada [8]. Aunque el transportador de placas es adecuado para operación inclinada de 25°, no es conveniente para materiales finos como el nitruro de amonio dado que se puede filtrar entre las placas y tampoco es adecuada dada la fluidez media del material [47].

De acuerdo a la Tabla 55, se considera como alternativa el elevador de cangilones con descarga continua. No se considera como alternativa el elevador con descarga centrifuga dado que no es adecuado para manejar materiales abrasivos por sus altas velocidades [25]. No se considera el elevador de súper capacidad dado que el flujo requerido es muy bajo para este tipo de sistemas. Los elevadores de descarga positiva son implementados cuando se manejan materiales húmedos o de baja fluidez, por lo que no son requeridos para esta aplicación.

Se observa que se ha definido como alternativa un tipo de transportador dentro de cada familia viable para el problema del diseño. Esto da muestra de que el método de generación de alternativas funcionada de manera adecuada buscando definir el sistema más conveniente para una aplicación dentro de cada alternativa.

La Tabla 55 muestra los sistemas que se consideran alternativas para este caso de estudio.

Tabla 56. Alternativas generadas para el caso de estudio 1.

Alternativa 1	Sistema 6: Banda transportadora con nervios grado 2
Alternativa 2	Sistema 10: Transportador de cadena En-Masse
Alternativa 3	Sistema 11: Elevador de cangilones inclinado descarga continua
Alternativa 4	Sistema 14: Tornillo transportador

7.1.3. Priorización de las alternativas

Se procede a realizar la priorización de las alternativas generadas desde una perspectiva sostenible para lo que se considera la interacción con el ambiente, la sociedad y la economía de cada alternativa. Se aplica el método AHP para definir los pesos relativos de los criterios, esta definición de importancia depende del juicio del diseñador y los intereses específicos del cliente. La figura 16 muestra el resultado al comparar los distintos criterios, encontrado que para este caso de estudio el criterio más importante en el proceso de priorización es el criterio económico con un 48 % en el peso relativo en el proceso de decisión, seguido del criterio ambiental con 34 % y por último el criterio social con 18 %.

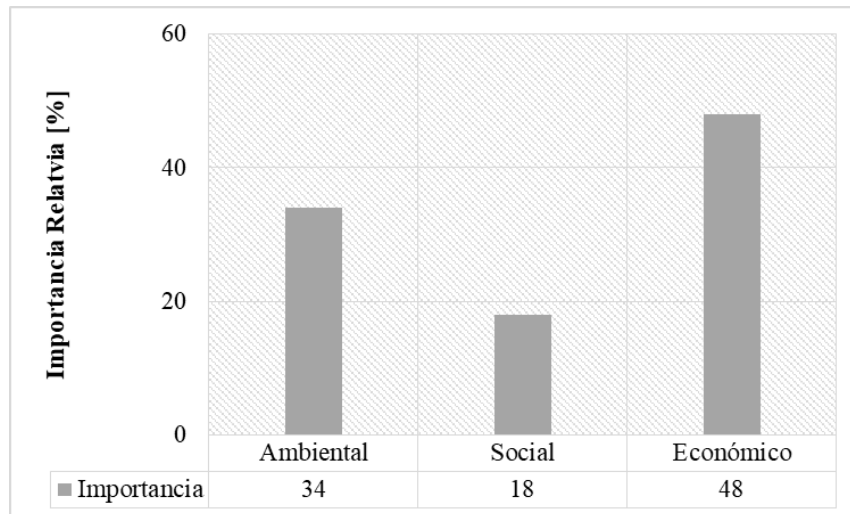


Figura 16. Pesos relativos de los criterios obtenidos con método AHP para el caso de estudio 1.

Se aplica el método *AHP* para definir la importancia relativa de cada sub-criterio al compararlo contra los sub-criterios de un mismo tipo. La figura 17 resume la estructura jerárquica propia del método AHP y los grados de importancia de criterios y sub-criterios. El costo de propiedad tiene una fuerte importancia en el proceso de priorización. Es importante notar que la sumatoria de los pesos de los sub-criterios de un mismo tipo será igual a el peso relativo del criterio al que pertenecen. No considera el ruido y consumo de agua dado que la diferencia no es significativa entre las alternativas en cuanto al nivel de ruido generado y el uso del agua.

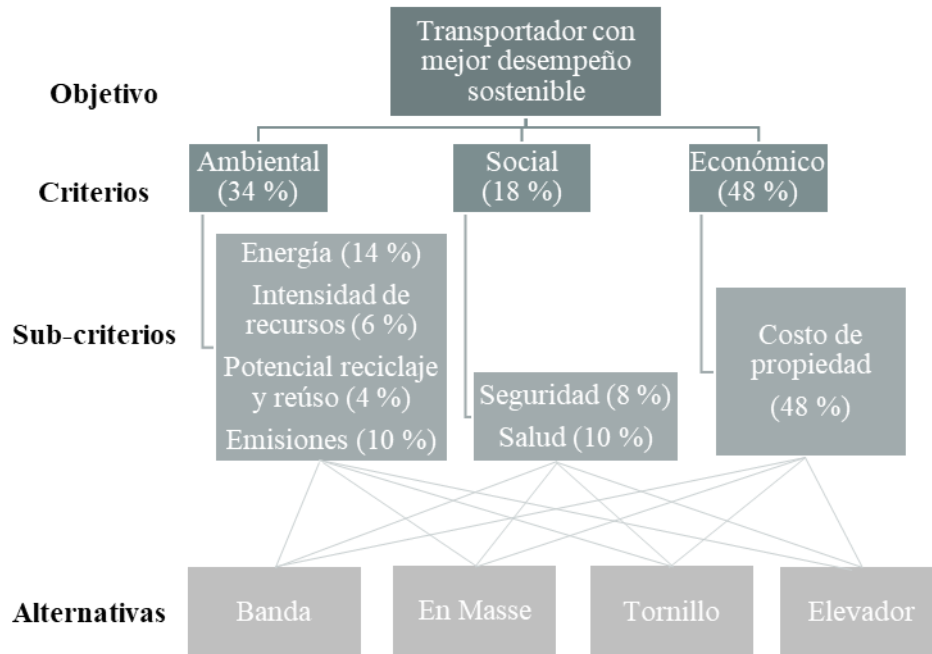


Figura 17. Estructura jerárquica y pesos relativos para el caso de estudio 1.

Se procede a implementar los modelos comparativos asociados a los sub-criterios presentados en la figura. En cuanto al sub-criterio asociado al consumo de energía, se utilizó la ecuación (7), el flujo másico y distancia de transporte del caso de estudio los requerimientos de potencia específicos y localizados de cada alternativa en operación inclinada, para calcular el requerimiento de potencia promedio para comparar entre alternativas en términos de consumo de energía. La Tabla 53 muestra los distintos parámetros para la estimación del requerimiento de potencia promedio comparativo para cada alternativa.

$$P_T = \dot{m}L_C RPE + \dot{m}RPL \quad (7)$$

Tabla 57. Parámetros para estimación del requerimiento de potencia promedio en caso de estudio 1.

	RPE [wh/ton*m]	RPL [wh/ton]	Potencia [kW]
Alt 1: Banda	4,98	12,943	2,69
Alt 2: En-Masse	6,48	13,143	3,37
Alt 3: Elevador	6,94	8,175	3,40
Alt 4: Tornillo	12,39	0	5,54

Se observa que el menor requerimiento de potencia se presenta en la banda y el mayor de estos se presenta en el tornillo.

En cuanto al sub-criterio costo de propiedad, se utiliza la ecuación (24) para estimar el costo de propiedad asumiendo que el equipo opera en promedio 8 horas diarias transportando nitrato de amonio de manera no continua. La Tabla 58 muestra los parámetros utilizados para estimar el costo total de propiedad.

$$\text{Costo de propiedad} = (C_d + C_m) * \text{Precio de compra} + \text{Costo Energía} \quad (24)$$

Tabla 58. Estimación del costo total de propiedad [\$1000 USD] de las alternativas para el caso de estudio 1.

Costo [\$1000 USD]	C _d	C _m	Precio compra	Energía	Costo de Propiedad
Alt 1: Banda	2,4	0,5	28	5	87
Alt 2: En-Masse	2,2	0,5	13	7	42
Alt 3: Elevador	2,4	0,5	13	7	44
Alt 4: Tornillo	2,2	0,65	12	11	45

Se observa que el menor costo de propiedad se presenta en los transportadores de cadena tipo En Masse dado un bajo costo de compra y bajo costo asociado a la energía. La banda transportadora cuenta con el menor costo por consumo de energía, pero un alto costo de compra debido a la necesidad de adicionar una cubierta por las características polvorosas del material y un equipo alimentador dado que no cuenta con esta función adicional. El tornillo transportador presenta el menor costo de compra, pero un alto costo asociado al consumo de energía.

La Tabla 59 muestra la estimación de recursos materiales, recursos energéticos y con ellos recursos totales para fabricar cada sistema y además el potencial de reciclaje y reúso de cada alternativa.

Tabla 59. Estimación del total de recursos y la preferencia por potencial de reciclaje y reúso para el caso de estudio 1.

	Recursos Material [kg]	Recursos Energéticos [GJ]	Recursos totales	Preferencia R&R
Alt. 1: Banda	66,9	3,47	70,37	0,63
Alt 2: Cadena En-Masse	388,1	15,52	403,62	0,78
Alt. 3: Elevador	2140,3	85,61	2225,91	0,78
Alt. 4: Tornillo	1293,4	51,74	1345,12	0,78

En cuanto a los sub-criterios que son definidos mediante nivel de preferencia asociados a las emisiones del polvo, la seguridad y la salud, la Tabla 60 resume los niveles de preferencia para las alternativas mostrando además los parámetros de comparación costo, potencia requerida, recursos totales y preferencia por potencial de reciclaje y reúso.

Tabla 60. Parámetros de comparación entre alternativas para el caso de estudio 1.

	Alt. 1: Banda	Alt. 2: En Masse	Alt. 3: Elevador	Alt. 4: Tornillo
Energía: Potencia requerida [kW]	2,69	3,37	3,40	5,54
Emisiones: Nivel de preferencia	2,3	2,6	3,1	3,4
Seguridad: Nivel de preferencia	3,5	3,5	2	3,5
Salud: Nivel de preferencia	3,5	4	4,5	4,5
Costo de propiedad [\$1000 USD]	87	43	44	45
Recursos totales	70,37	403,62	2225,91	1345,12
Preferencia potencial R&R	0,63	0,78	0,78	0,78

Teniendo en cuenta los parámetros de comparación de la Tabla 61 y los pesos relativos de los sub-criterios de la figura 17 se implementó la comparación pareada por sub-criterio del método AHP que permitieron definir los niveles de preferencia de cada alternativa. La Tabla 56 muestra la matriz A para el sub-criterio costo de propiedad, buscando ilustrar el proceso de comparación pareada.

Tabla 61. Ilustración de comparación pareada: matriz A sub-criterio costo para el caso de estudio 1.

Matriz A sub-criterio Costo de propiedad				
	Alt. 1 Banda	Alt. 2 En Masse	Alt. 3 Elevador	Alt. 4 Tornillo
Alt. 1 Banda	1	43/87	44/87	45/87
Alt. 2 En Masse	87/43	1	44/43	45/43
Alt. 3 Elevador	87/44	43/44	1	45/44
Alt. 4 Tornillo	87/45	43/45	44/45	1

La Tabla 62 muestra la matriz A_w y el vector C que indica el grado de preferencia de cada alternativa en función del sub-criterio costo. De acuerdo a esta tabla, la alternativa En Masse es la más conveniente en términos de costo de propiedad y con ello c_i mayor.

Tabla 62. Ilustración de comparación pareada: matriz A y vector C sub-criterio costo para el caso de estudio 1.

Matriz A_w sub-criterio Costo de propiedad					Vector C
	Alt. 1 Banda	Alt. 2 En Masse	Alt. 3 Elevador	Alt. 4 Tornillo	
Alt. 1 Banda	0,144	0,144	0,144	0,144	0,144
Alt. 2 En Masse	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292
Alt. 3 Elevador	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285
Alt. 4 Tornillo	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279

La Tabla 63 muestra los vectores C para cada sub-criterio, entendiendo que los valores c_i indican el grado de preferencia de cada alternativa se puede analizar el desempeño de cada una de estas en función de cada sub-criterio.

Tabla 63. Grado de preferencia por sub-criterio para el caso de estudio 1.

	Energía (14%)	Recursos (6%)	Potencial R&R (4%)	Emisiones (10%)	Seguridad (8%)	Salud (10%)	Costo (48%)
Alt. 1 Banda	0,325	0,212	0,212	0,202	0,280	0,212	0,144
Alt. 2 En Masse	0,260	0,139	0,263	0,228	0,280	0,242	0,292
Alt. 3 Elevador	0,257	0,025	0,263	0,272	0,160	0,273	0,285
Alt. 4 Tornillo	0,158	0,042	0,263	0,298	0,280	0,273	0,279

Se observa que en los sub-criterios con mayor importancia en la toma de decisión costo seguido de energía. La figura 18 muestra los resultados del proceso de priorización global, se observa que, para este caso de estudio con los pesos relativos definidos, la alternativa 2 transportador de cadenas tipo En Masse resulta la más conveniente, obteniendo un grado de preferencia D_i de 0,265 frente a un 0,252, 0,248 y 0,235 de las alternativas 4, 3 y 1 respectivamente.

La figura 18 permite observar los aportes individuales de cada sub-criterio en el grado de preferencia, permitiendo identificar que la alternativa 2 transportador de cadenas tipo En Masse resulta la más conveniente debido a su alta conveniencia a nivel de costos y energía dado su menor costo de propiedad y por ser la segunda alternativa con menor consumo de energía, siendo estos dos sub-criterios los que constituyen el 62 % de importancia en el proceso de priorización. En los otros sub-criterios, que constituyen el 38 % restante del peso en el proceso de priorización, la alternativa 2 muestra un desempeño adecuado. La solución, transportador de cadena En Masse, demuestra su conveniencia frente a métodos tradicionales de diseño conceptual. La solución obtenida se desempeña con menor costo de propiedad, menor consumo de energía y menor requerimiento de recursos para su fabricación y

desempeño semejante en emisiones, ruido, salud y seguridad al ser comparado con el tornillo transportador, solución obtenida con métodos de diseño tradicionales.

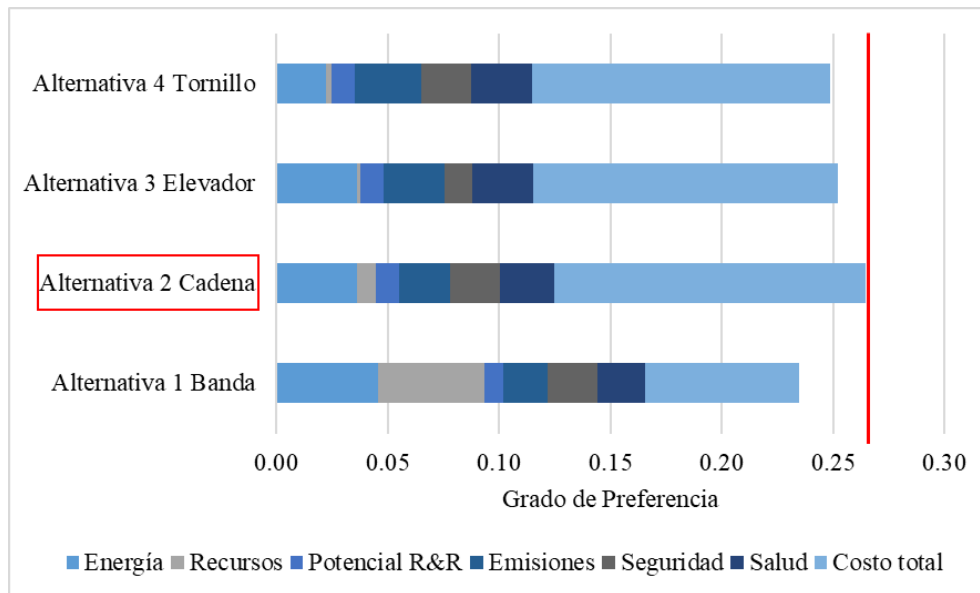


Figura 18. Resultados del proceso de priorización utilizando AHP para el caso de estudio 1.

7.2. Caso de Estudio 2

Como caso de estudio se toma el problema del transporte de cereal, cebada, desde un buque hacia una tolva para el proceso de descarga de este material. Este es un problema de transporte regular en los puertos colombianos, país importador de cereales, y suele ser solucionado usando sistemas neumáticos. Se requiere transportar cebada a una tasa de 400 TPH en un trayecto inclinado de 30 ° con distancia total de 34 metros. Se requiere una ubicación fija para el equipo. La figura 19 muestra un transportador neumático utilizado regularmente para la descarga de cereales en buques, esta figura se muestra únicamente con propósitos ilustrativos. Para el caso solo interesa el tramo de transporte, y no el de alimentación y carga del material desde el buque dado los alcances del estudio.



Figura 19. Transportador Neumático para descarga de cereal en buques y problema analizado en el caso de estudio 2.

7.2.1. Definición de las especificaciones

La Tabla 64 muestra la definición de las especificaciones necesarias para el caso de estudio. Las características del material fueron obtenidas de manuales CEMA [6]. Las especificaciones convenientes se buscan minimizar y se consideraran en el proceso de priorización.

Tabla 64. Definición de especificaciones para el caso de estudio 2.

Especificación Necesarias	Definición de especificación
Flujo de material	400 TPH
Distancia de transporte	34 m
Ángulo de elevación	30 °
Temperatura del material	≈30 °C (Ambiente)
Puntos de entrega	Único
Puntos de entrada	Único
Tipo de trayecto	Inclinado
Tipo de sistema	Fijo
Funciones adicionales	Cerrado-Hermético
Densidad	497 kg/m ³
Alta resistencia química	No
Material frágil	No
Material polvoroso	Sí
Abrasividad del material	Media
Tamaño material	Fino
Corrosividad del material	Media
Fluidez del material	Media
Material Húmedo	No
Otras características	Explosivo

7.2.2. Generación de alternativas

Teniendo en consideración las especificaciones convenientes y la matriz de generación de alternativas, Tabla 13, se definen los sistemas a considerar en el diseño conceptual. A partir de la matriz de generación de alternativas, se definen como alternativas bandas transportadoras, transportadores de cadena, tornillos transportadores, elevadores de cangilones y sistemas neumáticos. Los sistemas hidráulicos no son considerados como alternativas ya que no son competitivos a bajas capacidades y distancias de transporte.

Tabla 65. Implementación de la matriz de generación de alternativas para el caso de estudio 2.

		Posible Alternativa N°																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
A t r i b u t o s N. º	1	20000						1200	40	300	1000	2000	170	184	170	170-465	40	20-100	1-20	100-200	200-300	20-400	700-1300				
	2	35000						250	40	30	150	200	15	60				60	30	60	150	2500	800000				
	3	20				30		30	0	0	90	45	90	90				90°					6	6			
	4	70			600		70/200		600				250			540				200					-		
	5	U.						U.	Mu.				Mu.	U.	U.				U.	Mu.	U.	Mu.	Mu.	U.			
	6	Mu.						U.	Mu.				Mu.	U.	U.				Mu.	U.	Mu.	U.	Mu.	U.			
	7	H./L./H.-I.						H. H.-I.	H.	H.	H./V./ H.- V./ H.-I.	H./I.	V.	I./I.-V./V.				H./V./H.-V.					H./H.-I./I./V./N.L.				
	8	Requiere cubierta						Cub.	Sí				Sí			Sí				Sí					Sí		
	9	No	N o	Sí	Sí	No	No	Sí (Car. Especiales)				Sí (Car. Especiales)			Sí (Car. Especiales)				Sí (Car. Especiales)					Sí (Car. Especiales)			
	10	Sí						Sí	No	Sí	Sí	No			No	Sí	Sí	Sí	No			Sí	Sí				
	11	Sí (Car. Especiales)						Sí	Sí	Sí	Sí	Sí			Sí				Sí					Sí			
	12	B.	E.	M.			E.	M.	M.	M.	Mo. (Car. Especiales)			N. A.	E.	E.	Mo.	Mo.			E.	M.					
	13	M.F.-G./ A./ I.						F.- G.	M.F.- G.	F.- G.	M.F.- G.	M.F.-G.			F.- G.	M.F.-G.	M.F.- At.	M.F.-G.	F.-G.					M.F.	F./G./At.		
	14	B.	B	M.	M.	N.C.	M.	A.	M.	M.	M.	A. (Car. Especiales)			Mo. (Car. Especiales)				A. (Car. Especiales)					Sí			
	15	B.						A.	M.	B.	M.	M. (Car. Especiales)			B.	M.	M.	B.	B.			M.	M.				
	16	Sí (Car. Especiales)						Sí (Car. Especiales)				Sí (Car. Especiales)			No	No	Sí	Sí	No					Sí			

De acuerdo a la Tabla 65, se considera como alternativa la banda transportadora con nervios. Esta es la única alternativa dentro de la familia de bandas dado que solo esta puede cumplir con el requerimiento de los 30° de inclinación [5]. Dada la abrasividad media del material, se debe usar una banda grado 2. La banda requiere de una cubierta dado que el material es polvoroso y debe mantenerse libre de contaminación.

De acuerdo a la Tabla 65, se considera como alternativa el transportador de cadena tipo En-Masse. Los transportadores de arrastre y rascador no se consideran alternativas dado que no se recomiendan para operación inclinada [8]. Aunque el transportador de placas es adecuado para operación inclinada a 30 °, no es conveniente para materiales finos como el nitruro de amonio dado que se puede filtrar entre las placas y tampoco es adecuada dada la fluidez media del material ya que se adheriría a las placas [47].

De acuerdo a la Tabla 65, se considera como alternativa el elevador de cangilones de súper capacidad, el único en esta familia de transportadores adecuado para la capacidad requerida [25]. El elevador debe tener la modificación para operar inclinado.

De acuerdo a la Tabla 65, se considera como alternativa el sistema neumático de fase densa con compresor y tanque de soplado dado que es el adecuado para manejar la capacidad requerida [26].

Se observa que se ha definido como alternativa un tipo de transportador dentro de cada familia viable para el problema del diseño. Esto da muestra de que el método de generación de alternativas funcionada de manera adecuada buscando definir el sistema más conveniente para una aplicación dentro de cada alternativa.

La Tabla 66 muestra los sistemas que se consideran alternativas para este caso de estudio.

Tabla 66. Alternativas generadas para el caso de estudio 2.

Alternativa 1	Sistema 6: Banda transportadora con nervios grado 2
Alternativa 2	Sistema 10: Transportador de cadena En-Masse
Alternativa 3	Sistema 15: Elevador de súper capacidad con descarga continua
Alternativa 4	Sistema 14: Tornillo transportador
Alternativa 5	Sistema 21: Fase densa con compresor y tanque de soplado

7.1.3. Priorización de las alternativas

Se utilizará la priorización de los criterios presentada en la figura 16 que corresponde al criterio económico con un 48 % en el peso relativo en el proceso de decisión, seguido del criterio ambiental con 34 % y por último el criterio social con 18 %. Estos pesos relativos fueron obtenidos implementado el método AHP con comparación pareada entre criterios.

La figura 20 resume la estructura jerárquica propia del método AHP y los grados de importancia de criterios y sub-criterios a implementar en este caso de estudio, obtenidos mediante comparación pareada. No se considera el uso del agua como sub-criterio dado que no hay diferencia significativa en el consumo de este recurso por parte de los sistemas considerados.

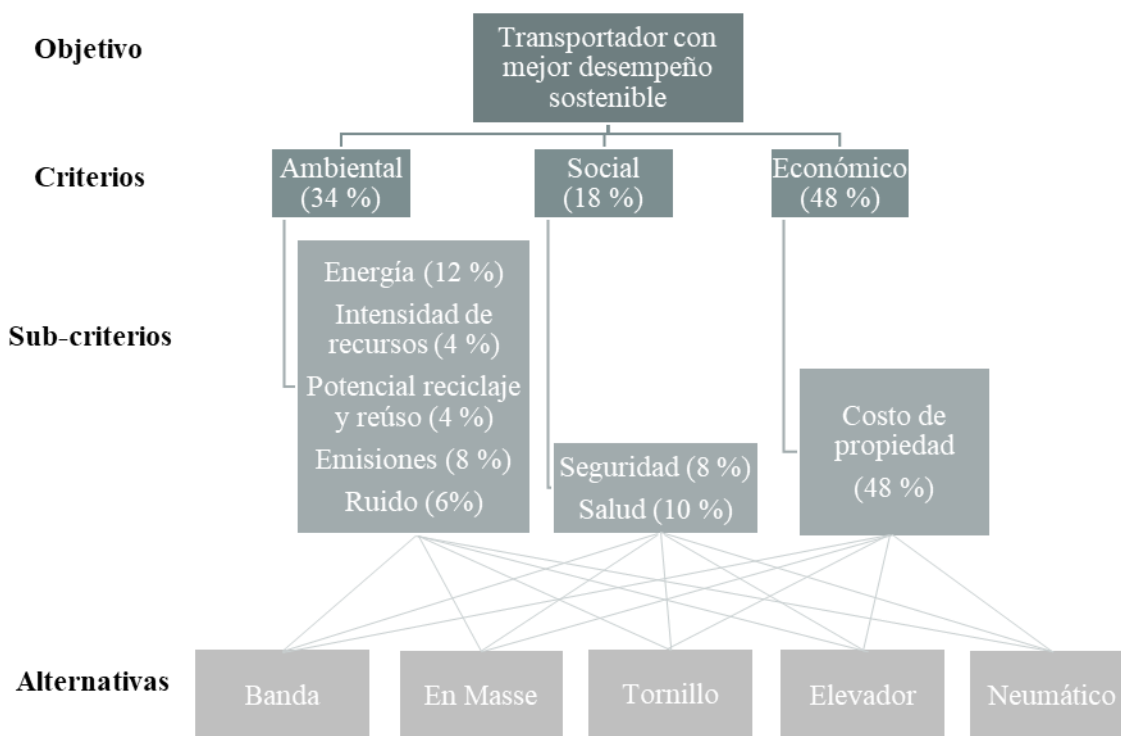


Figura 20. Estructura jerárquica y pesos relativos para el caso de estudio 2.

Se procede a implementar los modelos comparativos asociados a los sub-criterios presentados en la figura 20.

La Tabla 67 muestra los distintos parámetros para la estimación del requerimiento de potencia promedio comparativo para cada alternativa.

Tabla 67. Parámetros para estimación del requerimiento de potencia promedio en caso de estudio 2.

	RPE [wh/ton*m]	RPL [wh/ton]	Potencia [kW]
Alt 1:Banda	4,98	12,94	72,91
Alt 2: En-Masse	6,48	13,14	93,39
Alt 3: Elevador	6,94	8,18	107,65
Alt 4: Tornillo	12,39	0	168,50
Alt 5: Neumático	25,92	911,40	717,07

El menor requerimiento de energía se presenta en la banda transportadoras, el transportador tipo En-Masse y el elevador de súper capacidad presentan requerimientos de potencia similares, 1,32 veces mayor al requerimiento de la banda. El Tornillo presenta un requerimiento de potencia 2.3 veces mayor al de la banda y el requerimiento de potencia del sistema neumático es 9.8 veces mayor al de la banda.

En cuanto al sub-criterio costo de propiedad, se utiliza la ecuación (24) para estimar el costo de propiedad asumiendo que el equipo opera 24 horas diarias, no continuas, transportando nitruro, teniendo un funcionamiento diario promedio de 8 horas. La Tabla 68 muestra los parámetros utilizados para estimar el costo total de propiedad.

Tabla 68. Estimación del costo total de propiedad [\$1000 USD] de las alternativas para el caso de estudio.

Costo [\$1000 USD]	C _d	C _m	Precio compra	Energía	Costo de Propiedad
Alt 1:Banda	2,4	0,5	195	147	711
Alt 2: En-Masse	2,2	0,5	76	188	393
Alt 3: Elevador	2,2	0,65	58	217	386
Alt 4: Tornillo	2,4	0,5	45	340	467
Alt 5: Neumático	2,2	0,7	818	1444	3815

Se observa que el menor costo de propiedad se presenta en el transportador de cadenas, dado su bajo costo de compra y de energía.

La Tabla 69 muestra la estimación de recursos materiales, recursos energéticos y con ellos recursos totales para fabricar cada sistema y además el potencial de reciclaje y reúso de cada alternativa.

Tabla 69. Estimación del total de recursos y la preferencia por potencial de reciclaje y reúso para el caso de estudio 2.

	Recursos Material [kg]	Recursos Energéticos [GJ]	Recursos totales	Preferencia R&R
Alt. 1: Banda	1486,97	83,77	1570,74	0,63
Alt 2: Cadena En-Masse	11520,00	460,80	11980,80	0,78
Alt. 3: Elevador	38977,89	1559,12	40537,00	0,78
Alt. 4: Tornillo	54139,08	2165,56	56304,64	0,78
Alt. 5: Neumático	23680,00	947,20	24627,20	0,78

En cuanto a los sub-criterios que son definidos mediante nivel de preferencia asociados a las emisiones del polvo, la seguridad y la salud, la Tabla 70 resume los niveles de preferencia para las alternativas.

Tabla 70. Preferencia de los sistemas en función de las emisiones, el ruido, la seguridad y salud.

	Nivel de Preferencia			
	Emisiones	Ruido	Seguridad	Salud
Alt. 1: Banda	2,3	4	3,5	3,5
Alt 2: Cadena En-Masse	2,6	4	3,5	4
Alt. 3: Elevador	3,1	4	2	4,5
Alt. 4: Tornillo	3,4	4	3,5	4,5
Alt. 5: Neumático	3,4	2	3	3,5

Se implementa la comparación pareada teniendo en cuenta los parámetros de comparación entre alternativas a nivel de energía, recursos, potencial de reciclaje y reúso, costo y los niveles de preferencia de acuerdo a las emisiones, el ruido, la seguridad y la salud.

La Tabla 71 muestra los vectores C para cada sub-criterio, entendiendo que los valores c_i indican el grado de preferencia de cada alternativa, se puede analizar el desempeño de cada una de estas en función de cada sub-criterio.

Tabla 71. Grado de preferencia por sub-criterio.

	Energía (12%)	Recursos (4%)	Potencial R&R (4%)	Emisiones (8%)	Ruido (6%)	Seguridad (8%)	Salud (10%)	Costo (48%)
Alt. 1 Banda	0,332	0,793	0,168	0,155	0,222	0,226	0,175	0,157
Alt. 2 En Masse	0,259	0,104	0,208	0,176	0,222	0,226	0,200	0,284
Alt. 3 Elevador	0,226	0,031	0,208	0,209	0,222	0,129	0,225	0,290
Alt. 4 Tornillo	0,143	0,022	0,208	0,230	0,222	0,226	0,225	0,239
Alt. 5: Neumático	0,040	0,051	0,208	0,230	0,111	0,194	0,175	0,029

Se observa que en cuanto al sub-criterios más relevantes, el costo de propiedad, la alternativa más conveniente es el elevador, seguida de el transportador de cadenas tipo En-Masse. En cuanto al consumo de energía y los recursos la alternativa más conveniente es la banda transportadora, pero esta es poco adecuada en términos de costo dado la necesidad de una banda tipo *flexowell* por el grado de inclinación y la cubierta.

De acuerdo a la figura 21 la alternativa más conveniente es el transportador de cadena tipo En-Masse dado que su desempeño integral desde una perspectiva sostenible es el más adecuado. La solución presenta un reducido consumo de energía, el segundo menor entre las alternativas, el segundo menor costo del equipo y desempeño adecuado a nivel de emisiones, ruido, potencial de reciclabilidad y reuso, seguridad y salud.

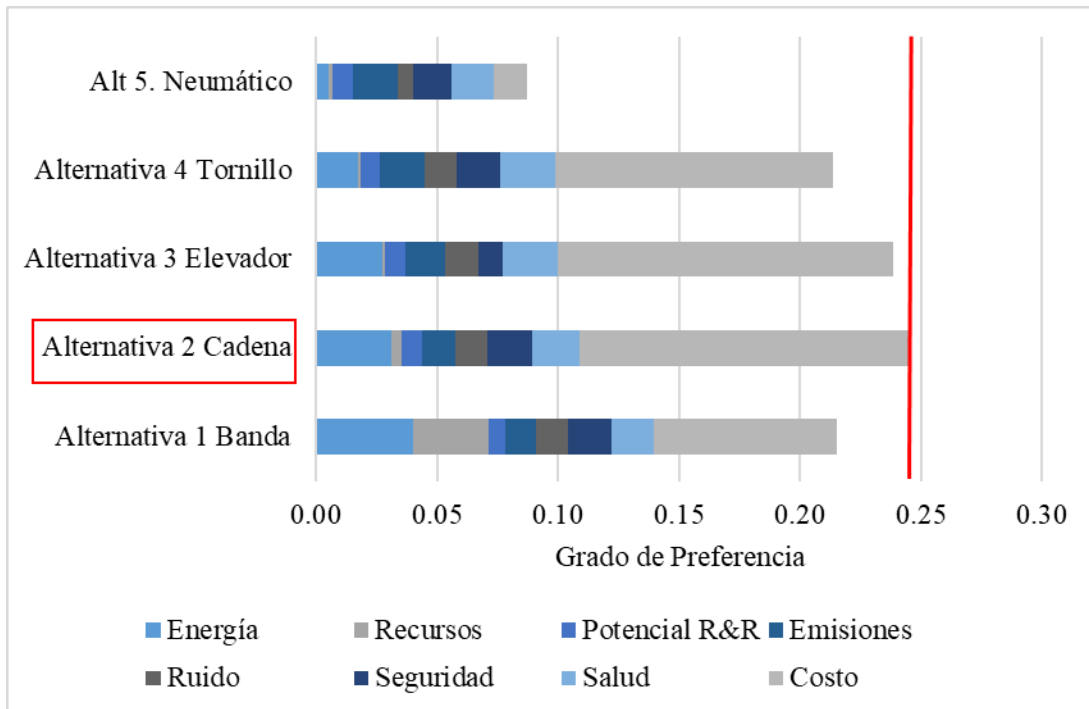


Figura 21. Resultados del proceso de priorización utilizando AHP para el caso de estudio2.

La solución obtenida al problema de diseño, transportador de cadena tipo En-Masse muestra un desempeño mucho más conveniente en términos sostenibles que el transportador neumático, solución ampliamente implementada en los puertos colombianos para este problema de transporte de material. El transportador neumático, aunque cumple con los requerimientos operacionales, es el menos conveniente desde una perspectiva sostenible ya que presenta un consumo energético y costo mucho más elevado que las otras alternativas, además es la alternativa que produce mayor ruido durante su operación.

Los transportadores neumáticos para el problema de diseño analizado son convenientes para equipos móviles, dado que en la longitud de transporte solo se tiene la tubería sin ningún medio de transporte que añada peso considerable. De esta manera se tiene un equipo con poco peso entre alimentación y descarga, facilitando la movilidad, montaje y desmontaje del equipo.

7.4 Análisis del valor agregado de la estructura de diseño con los elementos incorporados

Mediante los casos de estudio se pudo corroborar que la definición de especificaciones necesarias garantiza que el sistema diseñado cumpla con sus requerimientos operacionales y la definición de especificaciones convenientes permite tener en consideración el enfoque sostenible de manera adecuada. Se considera que las especificaciones establecidas son apropiadas para el problema de diseño.

La base de conocimiento y la matriz de generación de alternativas permiten de forma práctica, definir como alternativa un único tipo de transportador dentro de cada familia para el caso específico de diseño, garantizando que este cumpla con todos los requerimientos operacionales. Este proceso de generación de alternativas requiere poco tiempo dado el uso de la matriz que resume extensa información de manera tabular, con un método simple para descartar sistemas, por tanto, este método de definición de especificaciones se considera funcional y adecuado.

Se evidenció que el proceso de priorización de alternativas desde la perspectiva sostenible con el método *AHP* resulta conveniente dado el potencial del método para solucionar problemas de toma de decisiones multi-criterio. El éxito del proceso de priorización también dependió en los modelos comparativos desarrollados dado que son simples, adecuados para una fase conceptual y requiere poco tiempo de implementación.

En resumen, la estructura del proceso de diseño propuesta es funcional y su implementación es práctica, consume poco tiempo y puede ser desarrollada por ingenieros con experiencia reducida en el diseñando transportados continuos.

En cuanto al valor agregado, la incorporación de elementos para la aproximación sostenible durante el proceso de priorización con Análisis Jerárquico permite considerar el desempeño a nivel ambiental, económico y social durante el diseño conceptual. No hay evidencia de una metodología o herramienta para el diseño conceptual de transportadores de sólidos que soporte el diseño teniendo en cuenta los tres pilares de la sostenibilidad.

Se ha demostrado que considerar un enfoque sostenible durante el diseño conceptual de transportadores continuos conduce a resultados de más atractivos en términos sociales, ambientales y económicos comparado con sistemas definidos previamente con metodologías tradicionales. Para el caso de estudio 1 la solución obtenida mediante el diseño con aproximación sostenible presenta un costo de propiedad 1,07 veces menor y un consumo de energía 1,7 veces menor al de la solución obtenida con metodologías de diseño tradicionales. Para el caso de estudio 2 obtuvo una solución con costo de propiedad 5,36 veces menor y un consumo de energía 10 veces menor al compararlo con la solución obtenida con métodos de diseño tradicionales.

8. Conclusiones

1. Se ha identificado que las metodologías y herramientas existentes para el diseño conceptual de transportadores continuos cumplen con el objetivo de sistematizar y facilitar el proceso de diseño, pero presentan un enfoque principalmente operacional, sin considerar el desempeño ambiental, económico y elementos sociales.
2. Se han identificado los elementos a incorporar para permitir una aproximación sostenible en el proceso de diseño de transportadores continuos, estos elementos son: un listado de aproximadamente de 28 especificaciones para el diseño incluyendo los elementos operacionales y los de sostenibilidad, un método para generación de las alternativas desde el enfoque operacional, un proceso de priorización basado en criterios sostenibles y modelos para determinar el desempeño sostenible de las alternativas.
3. Mediante los casos de estudio, se ha observado que la integración de los elementos sostenibles presentados permite obtener una solución que cumpla con los requerimientos operacionales con la posibilidad de un mejor desempeño ambiental, mejor interacción con la sociedad y más atractivo en términos económicos. Para el caso de estudio 1 la solución obtenida mediante el diseño con aproximación sostenible presenta un costo de propiedad 1,1 veces menor y un consumo de energía 1,7 veces menor al de la solución obtenida con metodologías de diseño tradicionales. Para el caso de estudio 2 se obtuvo una solución con costo de propiedad 5,4 veces menor y un consumo de energía 10 veces menor al compararlo con la solución obtenida con métodos de diseño tradicionales.
4. Resulta totalmente conveniente la incorporación de elementos para la aproximación sostenible del diseño conceptual de sistemas industriales al incluir herramientas que permitan sistematizar el proceso y abordarlo de forma simplificada y con mínimo consumo de tiempo. Es adecuado el uso de bases de conocimiento para la generación de alternativas desde el enfoque operacional y del método AHP para la priorización en función de la sostenibilidad, incluyendo modelos que permitan comparar el desempeño sostenible entre sistemas.
5. Los modelos desarrollados constituyen uno de los principales aportes de conocimiento en esta tesis, dada la carencia de información para comparar el desempeño sostenible de transportadores continuos de sólidos a granel.

6. No hay evidencias de un modelo energético integrado que pueda ser aplicado a sistemas de transporte de tipo mecánico, hidráulico y neumático. El modelo desarrollado permite comparar el consumo de energía entre diferentes sistemas con ecuaciones simplificadas, apropiadas en el diseño conceptual y básico, requiriendo poco tiempo de implementación. Además, el desarrollo del modelo permitió caracterizar y comparar los fenómenos físicos causantes del requerimiento de potencia en los transportadores, aportando al entendimiento de la naturaleza de los distintos sistemas considerados.

7. El modelo económico permite considerar costo de módulo y costos operacionales en transportadores continuos. No se tenía una única fuente con la información necesaria para considerar estos tipos de costos en el caso de transportadores. Adicionalmente a integrar información de distintas fuentes, el modelo económico generó nuevo conocimiento al desarrollar el factor de capacidad, que sustituye el no tan conveniente factor de tamaño. Por estas razones se considera este modelo un aporte al conocimiento.

8. El modelo de intensidad en el uso de material se considera un aporte importante dado que no existía evidencia de información que permitiera comparar el consumo de recursos materiales para la fabricación de transportadores continuos y estimar de manera aproximada el peso de un equipo al conocer su longitud y capacidad.

9. Se considera que existe falencia en información que permite estimar el nivel de emisiones de ruido y particulado y el uso de agua en procesos de transporte de sólidos a granel.

10. El desarrollo de la base de conocimientos es un aporte a la comunidad científica ya que la presentada en esta tesis aborda mayor cantidad de sistemas y mayor número de atributos que las existentes para transportadores continuos. Esta base de conocimientos incluye extensa caracterización de los atributos operacionales de transportadores mecánicos, hidráulicos y neumáticos.

9. Recomendaciones y Trabajos Futuros

1. Se ha encontrado poca información sobre caracterización del impacto sobre el ambiente y la sociedad por parte de sistemas de transporte continuo en términos del ruido, las emisiones y la intensidad del material en la fabricación de estos sistemas. Se requieren estudios que caractericen de forma detallada estos fenómenos en distintos sistemas transportadores de sólidos a granel.

2. La estructura para el diseño conceptual ha sido desarrollada de forma tal que pueda ser fácilmente programable. Entre los trabajos futuros está el desarrollo de un ejecutable fundamentado en la estructura para el diseño conceptual presentada, incluyendo los elementos incorporados. Esta herramienta computacional tendría como entradas la definición de especificaciones, como una primera salida se tendrían las alternativas al problema de diseño y la segunda salida sería la definición de preferencias de estas alternativas, determinando así la más conveniente, en función del desempeño sostenible, para el caso de diseño particular.

3. El transporte continuo es solo uno de los procesos en el manejo de sólidos a granel. Dada la conveniencia de incorporar elementos en el diseño de transportadores, se propone como trabajo futuro incorporar elementos al diseño de sistemas utilizados en otros procesos de manejo de sólidos a granel, como alimentación, almacenamiento, etc. Para ello se tiene en cuenta que la estructura presentada es adecuada para el diseño de otros tipos de sistema, realizando cambios en el listado de especificaciones, en la base de conocimientos y desarrollando los modelos adecuados para el sistema de interés. Con esto se busca contribuir a la sostenibilidad en todo el proceso de manejo de sólidos a granel.

4. La aproximación sostenible debe extenderse al diseño básico y el diseño detallado, buscando que se fabrique un sistema con un adecuado desempeño en cuanto a su interacción con el ambiente, la sociedad y adecuado en términos económicos.

10. Referencias

- [1] Y. Park, «ICMESE: Intelligent Consultnat System for Material Handling Equipment Selection and Evaluation,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 15, nº 5, pp. 325-333, 1996.
- [2] D. Fonseca, G. Uppal y T. Greene, «A knowledge-based system for conveyor equipment selection,» *Expert System with Application*, vol. 26, pp. 615-623, 2004.
- [3] F. Chan., R. Ip y H. Lau, «Integration of expert system with analytical hierarchy process for the design of material handling equipment selection system,» *Journal of Material Processing Technologies*, vol. 116, pp. 113 - 145, 2001.
- [4] O. Kulak, «A decision support for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments,» *Expert Systems with Application*, vol. 29, pp. 310-319, 2005.
- [5] Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA), *Belt Conveyors for Bulk Materials*, 1988.
- [6] CEMA, *CEMA Standard N° 350 Screw Conveyors for Bulk Material*, 2015.
- [7] British Standard Institution, «Bucket elevators. Specification for dimensions of vertical bucket elevators with calibrated round steel link chains,» 1982.
- [8] M. Fayed y T. Skocir, *Mechanical Conveyors: Selection and Operation*, Abingdon: CRC Press, 1997.
- [9] H. Nasr, *Expert system techniques applied to engineering problems: a prototype system for material handling*, Houston, TX.: Unpublished thesis, Industrial engineering department, University of Houston, , 1984.

- [10] E. Fisher, J. Faber y M. Kay, «MATHES: an expert system for material handling equipment selection.,» *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 14, pp. 297-310, 1988.
- [11] W. Honng, MATHES II: an expert system for material handling equipment selection, Unpublished thesis, Industrial Engineering Department, NCSU, 1990.
- [12] S. Swaminathan, J. Matson y J. Mellichamp, «EXCITE: expert consultant for in-plant transportation equipment,» *International Journal of Production Research* , pp. 1969-1983, 1992.
- [13] S. Chakraborty y D. Banik, «Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process,» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 28, pp. 1237-1245, 2006.
- [14] C. Labuschagne, A. Brent y R. van Erck, «Assesing the sustainability performances of industries,» *Journal of Cleaner Production* , vol. 13, pp. 373-385, 2005.
- [15] A. Azapagic y S. Perdan, «Indicators of Sustainable Development for Industry: A General Framework,» *Trans IChemE*, vol. 78, pp. 243-261, 2000.
- [16] F. Begić y N. Afgan, «Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case,» *Energy*, vol. 32, n° 10, pp. 1979-1985, 2007.
- [17] M. Zarandi, S. Mansour, S. Hosseiniyou y M. Avazbeigi, «A material selection methodology and expert system for sustainable product design,» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 57, pp. 885-903, 2011.
- [18] A. Amindoust, S. Ahmed, A. Saghafinia y A. Bahreininejad, «Sustainable supplier selection: A ranking model based on fuzzy inference system,» *Applied Soft Computing*, vol. 12, n° 6, pp. 1668-1677, 2012.
- [19] M. Waris, M. Shahir, M. Faris y A. Idrus, «Criteria for the selection of sustainable onsite construction equipment,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 3, n° 1, pp. 96-110, 2014.

- [20] C. Riba, *Diseño Concurrente*, Ediciones UPC, 2002.
- [21] Global Reporting Initiative , «GRI Standards,» 2016.
- [22] A. Azapagic, «Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, pp. 639-662, 2004.
- [23] J. Cervera y M. Ureña, «Green production indicators: a guide for moving toward sustainable development,» 2017.
- [24] J. Apple, *Plant Layout and Material Handling*, New York: John Wiley & Sons, 1977.
- [25] D. McGlinchey, *Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation*, Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [26] J. Fruchtbaum, *Bulk Materials Handling Handbook*, New York: Springer, 1988.
- [27] C. Woodcock y J. Mason, *Bulk Solid Handling: an introduction to practice and technology*, New York: Springer, 1987.
- [28] D. Mills, «Pneumatic Conveying Design Guide,» Elsevier, 2004.
- [29] B. Jacobs, *Design of Slurry Transport Systems*, Elsevier, 1991.
- [30] T. Saaty, «Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process,» *Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat.*, vol. 102, nº 2, pp. 251-318, 2008.
- [31] T. Markeset y U. Kumar, «Application of LCC techniques in selection of mining equipment and technology,» de *Mine Planning and Equipment Selection* , 2000.

- [32] E. Triantaphyllou y S. Mann, «Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges.,» *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, vol. 2, n° 1, pp. 35-44, 1995.
- [33] T. Saaty, *Theory and applications of the analytic network process: Decision making with benefits, opportunities, costs, and risks*, Pittsburgh: RWS Publications, 2005.
- [34] British Standards Institution, «BS 5934: Calculation of operating power and tensile forces in belt conveyors with carrying idlers on continuous mechanical handling equipment.,» 1980.
- [35] Japanese Standards Association (JSA), «JIS B 8805: Rubber belt conveyors with carrying idlers - Calculation of operating power and tensile forces,» 2008.
- [36] Deutsches Institut für Normung (DIN), «DIN 22101: Continuous conveyors - belt conveyors for loose bulk materials - basis for calculation and dimensioning,» 2011.
- [37] International Organization for Standardization (ISO), «ISO 5048: Continuous mechanical handling equipment - Belt conveyors with carrying idlers - Calculation of operating power and tensile forces,» 1989.
- [38] International Organization for Standardization, ISO 7119 Continuous mechanical handling equipment for loose bulk materials -- Screw conveyors -- Design rules, 1981.
- [39] International Organization for Standardization (ISO), «ISO 7190: Continuous mechanical handling equipment -- Bucket elevators -- Classification,» 1981.
- [40] K. Wilson, G. Addie, A. Sellgren y R. Clift, «Slurry Transport using Centrifugal Pumps,» Springer, 2006.
- [41] C. Woodcock y J. Mason, «Gas/solids flow in pipes,» de *Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology*, New York, Springer Science , 1987, pp. 116-125.

- [42] J. Mason, Pressure drop and flow characteristics for the pneumatic transport of fine particles through curved and straight circular pipes, Liverpool , 1972.
- [43] D. Mills, J. Mason y P. Marjanovic, «A comparison of pressure drops in horizontal and vertical pneumatic conveying pipelines,» de *3rd Conf on Pneumatic Conveying*, Pecs, Hungary, 1985.
- [44] Z. Zhu, Y. Na y Q. Lu, «Pressure drop in cyclone separator at high pressure,» *J.o. T. Science*, vol. 17, n° 3, pp. 275-280, 2008.
- [45] F. Pugh y W. K., «Role of the interface in stratified slurry flow,» *Powder Technology*, vol. 104, pp. 221-226, 1999.
- [46] S. Laouar y Y. Molodtsov, «Experimental characterization of the pressure drop in dense phase pneumatic transport at very low velocity,» *Powder Technology* , pp. 165-173, 1998.
- [47] A. Levy y Kalman, Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids, Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [48] R. Kulwiec, Material Handling Handbook, John Wiley & Sons, 1985.
- [49] United States Environmental Protection Agency (EPA), «AP-42: Compilation of Air Emissions Factors Emissions Factors,» 2009.
- [50] U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA), «Standards for Fugitive and Combustible dust particles,» 1998.
- [51] Department of Health and Human Services, Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing, Pittsburgh, 2012.
- [52] P. Gleick, «Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use,» *Ecological Applications*, vol. 8, n° 3, pp. 571-579, 1998.

- [53] Environment Protection Authority, «Noise Policy for Industry,» Sydney, 2017.
- [54] Occupational Safety and Health Administration, «1910.95 Occupational Noise Exposure,» Harrisburg, Pennsylvania , 2012.
- [55] M. Karmis, Mine Health and Safety Management, Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2001.
- [56] P. Koltun, «Materials and sustainable development,» *International, Progress in Natural Science: Materials*, vol. 20, pp. 16-29, 2010.
- [57] M. Ashby, «Materials and Sustainable Development,» 2015.
- [58] R. Spence y D. Cook, «Building materials in developing countries,» Wiley, 1983.
- [59] G. Villalba, M. Segarra, A. Fernández, J. Chimenos y F. Espiell, «A proposal for quantifying the recyclability of materials,» 2002.
- [60] TN: Joint Institute for Energy & Environment, «Analysis of National Solid Waste Recycling Programs and Development of Solid Waste Recycling Cost Functions.,» 1999.
- [61] L. Maccarini y J. Avellaneda, «Recycling concepts and the index of recyclability for building materials,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 72, pp. 127-135, 2013.
- [62] Society of Automotive Engineers, «Reliability and Maintainability: Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment M-110.2,» Warrendale, PA, 1999.
- [63] G. Ulrich, «Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics,» John Wiley & Sons, New York, 1983.

- [64] D. Garrett, «Appedix 1: Equipment Cost Estimates,» de *Chemical Engineering Economics*, New York, Van Nostrand Reinhold , 1998.
- [65] R. Westney, *The Engineer's Cost Handbook*, Marcel Dekker, INC. , 1997.
- [66] J. Page, *Conceptual Cost Estimating Manual*, Burlington: Elsevier, 1995.
- [67] M. Peters, K. Timmerhaus y R. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Mc Graw Hill, 2003.
- [68] M. Ben-Daya, S. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic y D. Ait-Kadi, «Handbook of Maintenance Management and Engineering,» Springer , 2009.
- [69] American National Standards Institute ANSI, «ANSI B20.1: Safety Code for Conveyors, Cableways, and Related Equipment,» 1974.
- [70] P. Wypych, «Dust explosion hazard considerations for materials handling plants,» de *Handbook of Powder Technology*, Elsevier, 2001, pp. 745-752.
- [71] M. Fayed, «Fugitive and non-fugitive dust generation and control in conveying of powders: reality, technology and human attitude,» de *Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids*, Elsevier, 2001, pp. 727-738.