

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño de elevador residencial modular de 2 niveles para
adultos mayores y personas con discapacidad de movilidad**

Trabajo de graduación presentado por César Antonio Saavedra
Monterroso para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala,
2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

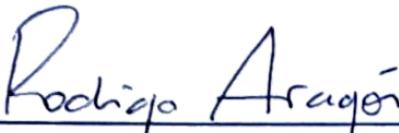


**Diseño de elevador residencial modular de 2 niveles para
adultos mayores y personas con discapacidad de movilidad**

Trabajo de graduación presentado por César Antonio Saavedra
Monterroso para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala,
2023

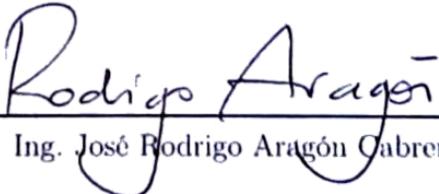
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. José Rodrigo Aragón Cabrera

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Victor Hugo Ayerdi Bardales

(f) 
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f) 
Ing. José Rodrigo Aragón Cabrera

Fecha de aprobación: Guatemala, 30 de mayo de 2023.

Lista de figuras	XI
Lista de cuadros	XIV
Resumen	XV
Abstract	XVII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Adultos mayores, escaleras y lesiones en el mundo	3
2.2. Adultos mayores y personas con discapacidad de movilidad a nivel regional y en Guatemala	4
2.3. Elevadores residenciales en el mundo y en Guatemala	4
2.4. Normas de diseño para elevadores	5
2.5. Tesis: diseño de elevadores residenciales	5
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Marco teórico	11
5.1. Personas con movilidad reducida	11
5.1.1. Discapacidad de movilidad: normas y manuales	11
5.2. Partes básicas del elevador	13
5.2.1. Cubo y foso	13
5.2.2. Cabina	13
5.2.3. Sistema de amortiguamiento	13
5.2.4. Guías	14
5.2.5. Grupo de elevación	14

5.2.6. Sistemas de seguridad	14
5.2.7. Elementos de interfase y accesibilidad	15
5.3. Tipos de ascensores según el sistema de elevación	15
5.3.1. Ascensores eléctricos	15
5.3.2. Ascensores hidráulicos	16
5.3.3. Otros tipos de elevadores	18
5.3.4. Cuadro comparativo entre tecnologías	19
5.4. Normas y criterios de diseño	20
5.5. Dimensionamiento sísmico	20
5.5.1. Espectros sísmicos generales según la NSE 2	21
6. Marco metodológico	27
6.1. Descripción de metodología	27
6.1.1. Componentes mecánicos	27
6.1.2. Componentes de accesibilidad	29
6.2. Identificación de necesidades	29
6.3. Definición de requisitos	39
6.4. Diseño preliminar	41
6.5. Cálculos y diseño	44
6.5.1. Marco del carro	45
6.5.2. Estructura	49
6.5.3. Uniones pernadas	58
6.5.4. Sistema hidráulico	60
6.5.5. Sistema de tracción	61
6.5.6. Espectro de respuesta sísmica	64
6.5.7. Amortiguador de emergencia	65
6.6. Simulaciones	66
6.6.1. Elementos del modelo	67
6.6.2. Simulación estructural estática de la estructura y carro	70
6.6.3. Simulación de análisis modal de la estructura y carro	72
6.6.4. Simulación de respuesta espectral de la estructura y carro	72
6.6.5. Simulación de sistema hidráulico	72
7. Resultados	77
7.1. Simulaciones	78
7.1.1. Simulación estructural estática de la estructura y carro	78
7.1.2. Simulación de análisis modal de la estructura y carro	82
7.1.3. Simulación de respuesta espectral de la estructura y carro	86
7.1.4. Simulación de sistema hidráulico	87
7.2. Diseño final	90
8. Discusión de resultados	95
8.1. Simulaciones estructurales, modales y de respuesta sísmica	95
8.2. Simulaciones hidráulicas y de control electrónico	97
8.3. Diseño final, costo de materiales y cumplimiento de requisitos	97
9. Conclusiones	99
10.Recomendaciones	101

11. Bibliografía	103
12. Anexos	107
12.1. Formato de encuesta para criterios clave de un elevador residencial	107
12.2. Planos de construcción	107

Lista de figuras

1. Antropometría de la persona ciega con perro guía	12
2. Antropometría de la persona con bastón	12
3. Antropometría de la persona en silla de ruedas	13
4. Esquema de las tecnologías de tracción (izquierda) e hidráulica (derecha)	16
5. Comparación entre sistemas hidráulicos con y sin pozo	17
6. Elevador neumático	18
7. Elevador de piñón y cremallera	19
8. Espectro de amenaza uniforme, UHS (<i>Uniform Hazard Spectra</i>) del Proyecto RESIS II (Reducción del Riesgo Sísmico en Guatemala, El Salvador y Nicaragua con Cooperación Regional a Honduras, Costa Rica y Panamá) y espectro de diseño para el sismo frecuente, Norma (NR-2) de AGIES, en suelo firme en Ciudad de Guatemala	23
9. Mapa de zonificación sísmica de Guatemala	24
10. Diagrama de marcos de la estructura y carro, con definición de planos XYZ.	28
11. Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué factores consideraría críticos para decidir si invertir en un elevador residencial o no?	29
12. Frecuencia de respuestas a: ¿Qué capacidad, en número de personas, consideraría razonable para un elevador residencial enfocado en personas con discapacidad de movilidad o de edad avanzada?	31
13. Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué cambiaría o mantendría con respecto a los botones y señales dentro y fuera de la cabina de los elevadores que ha utilizado?	31
14. Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué cambiaría o mantendría de las puertas de los elevadores que ha utilizado?	33
15. Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué cambiaría o mantendría de los pisos, superficies o iluminación de los elevadores que ha utilizado?	34
16. Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué medidas de alarma o seguridad desearía que tuviera un elevador residencial, si usted decidiera adquirir uno?	35
17. Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Preferiría usted una puerta de tipo abatible o una corrediza en un elevador residencial, si usted decidiera adquirir uno?	36

18. Tormenta de palabras de respuestas a: ¿Qué características considera positivas de los elevadores que usted ha utilizado?	37
19. Tormenta de palabras de respuestas a: ¿Qué características considera negativas de los elevadores que usted ha utilizado?	38
20. Concepción inicial del soporte del carro, con elemento actuando a compresión.	42
21. Concepción inicial del anclaje del cilindro, con dependencia directa de la loza del pozo.	43
22. DCL para vigas secundarias del carro.	46
23. DCL para marco del carro bajo condición crítica.	47
24. Descomposición de elementos del marco.	47
25. DCL para el marco XY de la estructura.	50
26. Descomposición de elementos del marco XY de la estructura.	50
27. Condición de carga en carro para análisis del marco ZY.	53
28. DCL para el marco ZY de la estructura.	54
29. Descomposición de elementos del marco ZY de la estructura.	54
30. Junta riel-patín, con uniones al carro y estructura.	57
31. DCL de riel guía ante carga de reacción R_A o R_B del carro.	58
32. DCL para la unión pernada del riel guía.	59
33. DCL para la unión pernada de la sujeción del riel guía.	59
34. Geometría de polea de tracción.	62
35. Geometría de la sujeción del cilindro.	63
36. Diagrama de sujeción de poleas superiores.	64
37. Curva de respuesta espectral ante sismo en Ciudad de Guatemala.	65
38. Construcción del análisis concatenado en ANSYS Workbench.	66
39. Obtención de coordenadas de nodos para modelo simplificado.	67
40. Modelo simplificado del carro y estructura en posición crítica.	68
41. Histograma de criterio <i>Element Quality</i> para la malla del modelo.	69
42. Juntas para la interacción carro-estructura.	69
43. Contactos para la interacción vigas secundarias-piso.	70
44. Condiciones frontera: caso de carga crítica cruzada.	71
45. Condiciones frontera: caso de carga crítica alineada.	71
46. Esquemático del sistema hidráulico para la simulación.	73
47. Esquemático de las conexiones eléctricas del sistema hidráulico.	74
48. Programa GRAFCET del sistema hidráulico.	75
49. Deformación total por cargas gravitacionales, primera iteración.	78
50. Deformación total por cargas cruzadas, primera iteración.	79
51. Esfuerzos combinados en elementos lineales, cargas cruzadas, primera iteración.	79
52. Deformación total por cargas alineadas, primera iteración.	80
53. Esfuerzos combinados en elementos lineales, cargas alineadas, primera iteración.	80
54. Deformación total por cargas gravitacionales, segunda iteración.	81
55. Deformación total por cargas cruzadas, segunda iteración.	81
56. Esfuerzos combinados en elementos lineales, cargas cruzadas, segunda iteración.	82
57. Histograma de frecuencias para modos normales bajo cargas gravitacionales, primera iteración.	82
58. Fracción de masa efectiva trasladada vs. modos normales bajo cargas gravitacionales, primera iteración.	83

59.	Representación visual de principales modos normales con respecto a su fracción de masa efectiva trasladada, primera iteración.	83
60.	Histograma de frecuencias para modos normales bajo cargas gravitacionales, segunda iteración.	84
61.	Fracción de masa efectiva trasladada vs. modos normales bajo cargas gravitacionales, segunda iteración.	84
62.	Representación visual de principales modos normales con respecto a su fracción de masa efectiva trasladada, segunda iteración.	85
63.	Deformación direccional por respuesta espectral aplicada en eje Z, cargas gravitacionales, primera iteración.	86
64.	Deformación direccional por respuesta espectral aplicada en eje X, cargas gravitacionales, primera iteración.	86
65.	Deformación direccional por respuesta espectral aplicada en eje Z, cargas gravitacionales, segunda iteración.	87
66.	[1] Arranque del sistema en posición elevada: indicación de seguridad, puerta desbloqueada.	87
67.	[2] Inicio de descenso: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.	88
68.	[3] Llegada a posición en planta baja: indicación de seguridad, puerta desbloqueada.	88
69.	[4] Inicio de ascenso: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.	88
70.	[5] Sistema detenido por uso de botón de emergencia: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.	89
71.	[6] Sistema desbloqueado por presión de botón de <i>reset</i> : indicación de seguridad, puerta desbloqueada.	89
72.	[7] Sistema detenido por detección de apertura de puerta: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.	89
73.	Vista isométrica del diseño final del elevador.	90
74.	Descomposición de subensambles del diseño final del elevador.	90

Lista de cuadros

1. Cuadro comparativo de las tecnologías de tracción e hidráulica en elevadores .	19
2. Tabla de ponderación de elevadores hidráulicos, de tracción y sin cuarto de máquinas según criterios de seguridad y costo	20
3. Tabla de nivel de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño	22
4. Coeficientes de sitio F_a	23
5. Coeficientes de sitio F_v	24
6. Factores de probabilidad K_d	24
7. Tipo de fuente sísmica	25
8. Factor para períodos cortos de vibración N_a	25
9. Factores para períodos largos de vibración N_v	25
10. Guía de codificación de requisitos.	39
11. Definición de requisitos.	39
11. Definición de requisitos.	40
11. Definición de requisitos.	41
12. Valores iniciales para dimensionamiento estructural del marco y estructura. .	44
13. Resistencia a la fluencia para aceros de diseño.	44
14. Ecuaciones para el cálculo de criterios de diseño, según la condición de carga.	45
15. Cargas resultantes en el marco principal del carro.	48
16. Dimensionamiento para elemento ACB, sujeto a flexión y tensión.	49
17. Dimensionamiento para elemento BD, sujeto a compresión, flexión y pandeo.	49
18. Dimensionamiento para elemento CD, sujeto a tensión.	49
19. Cargas resultantes en el marco XY de la estructura.	52
20. Dimensionamiento para elemento ABV, sujeto a flexión, compresión y pandeo.	52
21. Dimensionamiento para elemento BI, sujeto a compresión y pandeo.	53
22. Cargas en elementos del marco ZY.	56
23. Dimensionamiento de elemento crítico ABV, sujeto a compresión, flexión y pandeo.	57
24. Dimensionamiento de riel guía y patín.	58
25. Parámetros de diseño para sistema hidráulico.	60
26. Parámetros de diseño para sistema de tracción.	62
27. Parámetros de diseño para curva de respuesta sísmica.	65

28. Propiedades de materiales para simulaciones estructurales, modales y de res-	
puesta espectral.	67
29. Dimensiones de secciones para tubos del modelo simplificado.	68
30. Fracción de masa efectiva desplazada para los primeros 50 modos normales,	
cargas gravitacionales, primera iteración.	83
31. Fracción de masa efectiva desplazada para los primeros 50 modos normales,	
cargas gravitacionales, segunda iteración (<i>rev 1</i>).	85
32. Desgloce de costos aproximados para los materiales del diseño.	91
33. Verificación de cumplimiento de requisitos.	91
33. Verificación de cumplimiento de requisitos.	92
33. Verificación de cumplimiento de requisitos.	93

La locomoción a través de escaleras es una actividad retadora y peligrosa para el adulto mayor y personas con discapacidad de movilidad. Un elevador residencial ofrece una alternativa que mejora el sentimiento de independencia y control de decisiones del usuario. En este trabajo se propuso el diseño de un elevador modular para uso residencial de 2 niveles para adultos mayores o personas con discapacidad de movilidad, con un costo de materiales de Q48,763.15 que, además de incluir criterios de ingeniería y seguridad, añadiera noción sobre las necesidades específicas del usuario final guatemalteco. El diseño incluyó la selección del sistema de tracción, el dimensionamiento de los elementos estructurales (a modo de formar módulos fácilmente transportables) y el sistema de tracción hidráulica, y el diseño del sistema de control electro-hidráulico. Para obtener información sobre las necesidades de accesibilidad, se realizaron 71 encuestas sobre requisitos de elevadores y elevadores residenciales. Por último, se simuló la estructura bajo cargas estáticas, además de evaluar su desplazamiento por carga sísmica en la Ciudad de Guatemala. Las características del elevador diseñado son: diseño compuesta de 4 módulos transportables en camiones ligeros de 3.5 toneladas, carrera máxima de 3.25 m, capacidad máxima de 250 kg y exigencia de potencia durante la elevación de 2 HP. La amplitud de oscilación ante respuesta sísmica, al extremo superior de las columnas secundarias es de 18 mm. Para el diseño del cubo del carro, se recomienda utilizar pisos antideslizantes, puertas corredizas con ventanas, ventilación, botones grandes con notación en Braille, pasamanos de tubo a todo el rededor del cubo e iluminación adecuada, según la retroalimentación de las encuestas y criterios de *ADA*. Para mejorar la estabilidad durante el ingreso al carro, se sugiere la implementación de un sistema de compensación de posición PID o sistema de frenado electrónico.

Locomotion up and down stairs is a challenging and dangerous activity for the elderly and mobility impaired. A residential elevator offers an alternative that enhances the user's sense of independence and control over decisions. In this work a design of a modular elevator for residential use of 2 levels for the elderly or persons with mobility disabilities was proposed, with a material cost of Q48,763.15 that, in addition to including engineering and safety criteria, would add insight into the specific needs of the Guatemalan end user. The design included the selection of the traction system, the sizing of the structural elements (to form easily transportable modules) and the hydraulic traction system, and the design of the electro-hydraulic control system. To obtain information on accessibility needs, 71 surveys on elevator and residential elevator requirements were conducted. Finally, the structure was simulated under static loads, in addition to evaluating its displacement under seismic loads in Guatemala City. The characteristics of the designed elevator are: design composed of 4 modules transportable in light 3.5 tons trucks, maximum stroke of 3.25 m, maximum capacity of 250 kg and power requirement during the elevation of 2 HP. The seismic response oscillation amplitude at the top of the secondary columns is 18 mm. For the design of the car cube, it is recommended to use non-slip floors, sliding doors with windows, ventilation, large buttons with Braille notation, tube handrails all around the cube and adequate lighting, according to the feedback from the surveys and *ADA* criteria. To improve stability during car entry, the implementation of a PID position compensation system or electronic braking system is suggested.

Los adultos mayores enfrentan desafíos y peligros al moverse a través de escaleras, ya que las lesiones en escaleras se vuelven más frecuentes con la edad. Estas lesiones son hasta 13 veces más comunes en personas mayores de 75 años en comparación con niños menores de 9 años (Startzell y col., 2000). Además, el 48 % de los casos de lesiones accidentales en hogares estadounidenses involucran escaleras, y las mujeres presentan una mayor incidencia que los hombres. Los accidentes en escaleras afectan psicológicamente a las personas mayores, generando una sensación de discapacidad y dolor (Vladutiu y col., 2012).

Las personas mayores y las personas con discapacidad de movilidad enfrentan desafíos particulares a nivel regional y en Guatemala. El proceso de envejecimiento se acelera en personas con discapacidades, y en América Latina y el Caribe, aproximadamente el 33 % de la población mayor de 60 años vive sola o con su pareja (ONU, 2017). En Guatemala, el 5.6 % de la población tiene más de 65 años y se enfrenta a dificultades para caminar, ver y recordar (INE, 2019). Además, el 10.2 % de la población guatemalteca presenta algún tipo de discapacidad, con una mayor concentración en la región central (CONADI-UNICEF, 2016).

La implementación de elevadores residenciales es una medida preventiva para evitar lesiones en adultos mayores y personas con discapacidad de movilidad. Existen diferentes tipos de elevadores residenciales en el mercado, como los elevadores sin eje, sin cuarto de máquinas, hidráulicos, de tambor de bobinado, de cadenas y de vacío. Estos elevadores pueden tener un costo aproximado de \$15,000 a \$30,000 dólares en su rango más económico. En Guatemala, varias empresas ofrecen elevadores residenciales, aunque algunas de ellas no cumplen con las normas europeas y su complejidad es menor en comparación con otras opciones disponibles (Carmody, 2021), (HomeElevators, s.f.), (Mobility, s.f.), (Control, 2017).

En Guatemala, donde el ingreso medio es relativamente bajo, se necesita una solución segura y económica. Se busca un sistema que brinde autonomía y control al usuario, cumpla con estándares de seguridad y accesibilidad universal, y sea adaptable a estructuras existentes. Aunque existen propuestas y empresas especializadas en elevadores residenciales, su costo y enfoque limitado dificultan su aplicación en Guatemala. Por lo tanto, se plantea

el diseño de un elevador modular para dos niveles, que pueda ser transportado y adaptado a estructuras existentes, a un costo máximo de Q40,000.00 en materiales. Los objetivos específicos incluyen definir los requisitos de diseño, seleccionar el sistema de elevación, diseñar el elevador para dos personas y cumplir con los criterios de accesibilidad y seguridad establecidos por la ley.

Por lo tanto, se propone el diseño de un elevador residencial de dos niveles que pueda ser trasladado en módulos al lugar de instalación y adaptado a estructuras existentes. Para lograr un diseño adecuado, se deben abordar dos aspectos principales. En primer lugar, se debe realizar la selección y dimensionamiento de los componentes de la máquina para facilitar su traslado, garantizar su uso seguro y asegurar su estabilidad mecánica. En segundo lugar, es crucial obtener retroalimentación directa de los usuarios guatemaltecos objetivo, a fin de complementar los requisitos de accesibilidad y adaptar el diseño a las necesidades específicas del contexto nacional.

La investigación se centrará en describir los elementos críticos de un elevador, seleccionar el sistema de elevación, definir la disposición de los elementos estructurales y establecer criterios para el dimensionamiento sísmico de la máquina. Estos serán los fundamentos para el análisis estático de los componentes y ensamblajes, la selección de los componentes y la realización de simulaciones para validar el dimensionamiento estático y la respuesta sísmica.

La retroalimentación de los usuarios objetivo se recopilará mediante encuestas, con el objetivo de identificar los criterios más relevantes para el diseño accesible de elevadores residenciales. Estos criterios servirán como base para el dimensionamiento básico, el diseño del sistema de control y el punto de partida para el desarrollo futuro del diseño interior del carro del elevador.

Algunos trabajos anteriores en el tema han abordado el diseño de elevadores residenciales, centrándose en aspectos técnicos como la selección de componentes, el análisis estructural y la eficiencia energética. Sin embargo, se ha observado una falta de enfoque en la accesibilidad y las necesidades específicas de la población guatemalteca, así como en la adaptación de los diseños a estructuras existentes y al contexto sísmico del país. No obstante, a pesar de los esfuerzos realizados en investigaciones anteriores, aún existe una brecha en el conocimiento en cuanto al diseño de elevadores residenciales accesibles y adaptados a las necesidades de la población guatemalteca. Por lo tanto, el presente trabajo busca llenar ese vacío al enfocarse en la selección de componentes, el diseño estructural, la accesibilidad y la retroalimentación directa de los usuarios objetivo, con el objetivo de desarrollar un elevador residencial que sea seguro, accesible y adecuado para las condiciones de Guatemala.

2.1. Adultos mayores, escaleras y lesiones en el mundo

La locomoción a través de escaleras es de las actividades diarias más retadoras y peligrosas para el adulto mayor. La incidencia de lesiones en escaleras incrementa de forma monótona con la edad, al llegar a ser hasta 13 veces más frecuente para individuos de más de 75 años sufrir estos accidentes que niños menores a 9 años; y 5 veces más que para adolescentes en EE. UU (Startzell y col., 2000). Para el 2012, las lesiones accidentales en hogares estadounidenses llegaban al 48 % para personas mayores a 80 años, con posibilidad de incrementar hasta 3 veces al presentarse una o más discapacidades. Sin embargo, el 48 % de los casos presentaban algún tipo de gradas en el hogar (Vladutiu y col., 2012).

Del estudio de Hemenway y col. (1994), 147 de 55 000 residentes reportaron al menos una lesión por escaleras en el último año, con el 37 % de estas heridas correspondientes a hospitalización, lo que equivaldría a 7,500 hospitalizaciones entre toda la población austriaca para 1989. En particular, las mujeres presentaron mayor incidencia que los hombres. La misma tendencia se observó en el estudio de Sjögren y Björnstig (1991) en Suecia. En este caso, de las 600 personas mayores a 60 años entrevistadas, el 76 % presentaron heridas por caídas en sus hogares. En Australia (2007), 80 % de los accidentes en gradas ocurrieron mientras las personas mayores bajaban de piso. Esto, debido a la disminución de la fuerza en sus extremidades, menor capacidad de procesamiento visual, planificación motora y retroalimentación cenestésica para un movimiento controlado.

Los accidentes de personas mayores en gradas tienen un gran factor psicológico de sensación de discapacidad y presencia de dolor (Tiedemann y col., 2007). Este aspecto es clave, considerando que la sensación de control de las decisiones y eventos en las vidas de personas mayores reducen la sensación de aislamiento, baja satisfacción y dependencia bajo condiciones restrictivas y reglamentadas. El autocontrol de los aspectos sociales y físicos del ambiente es una base fundamental para la adaptación social (Pynoos & Regnier, 1991). Más aún, las poblaciones mayores hacen énfasis en factores específicos a la hora de elegir un hogar: la importancia de un elevador (o residencias de un nivel) y un buen diseño para la

vida independiente (Andersson y col., 2018).

2.2. Adultos mayores y personas con discapacidad de movilidad a nivel regional y en Guatemala

El proceso de envejecimiento comienza antes de lo habitual en personas que presentan alguna discapacidad. En particular, las discapacidades de desarrollo pueden presentar envejecimiento prematuro entre los 40 y 50 años. Esta situación agrava el estado de la funcionalidad motora con la edad (OMS, 2011). Además, 217 millones de personas del mundo que viven con algún tipo de impedimento visual parcial, a pesar de tener visión funcional, presentan retos a la hora de navegar por superficies cambiantes (Zhao y col., 2018a).

A nivel regional, en América Latina y el Caribe, el 33 % de la población mayor a 60 años vivía sola o con su pareja (ONU, 2017). En Guatemala, para el 2018, la población mayor a 65 años representaba el 5.6 %. De esta, 223 615 personas presentaban alguna dificultad para caminar, 287 463 para ver y 123 881 para recordar (INE, 2019). El 10.2 % de la población presentó algún tipo de discapacidad, con una concentración del 16 % de la población de la región central. A nivel nacional se vuelve a reflejar la relación entre la edad y prevalencia de la discapacidad, con un incremento del 5 % al 26 % entre grupos de 2 a 17 años en comparación a 50 años y más (CONADI-UNICEF, 2016).

2.3. Elevadores residenciales en el mundo y en Guatemala

Una de las formas de prevenir lesiones en adultos mayores y personas con discapacidad de movilidad es la implementación de elevadores residenciales. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran los elevadores sin eje, elevadores sin cuarto de máquinas, hidráulicos, de tambor de bobinado, de cadenas y de vacío (HomeElevators, s.f.). De forma aproximada estos, en su gama baja, rondan entre los \$15,000 y \$30,000 dólares (Carmody, 2021), (Mobility, s.f.), (R. Elevators, s.f.), (Lift, s.f.).

En Guatemala, las siguientes empresas ofrecen elevadores de tipo residencial: ECA Elevadores y Gradas Eléctricas, ASCENSA Ascensores, S.A. (elevadores Mitsubishi), OTIS, MOTION CONTROL Engineering and Sercom (Autors Elevators, importación china), ALEVO Equipos (elevadores Cibes, suecos), TK Elevator (elevadores Synergy) y Stiltz Homelifts (ECA, 2017), (Ascensa, 2016) (OTIS, s.f.) (Control, 2017) (Equipos, 2019) (T. Elevators, 2021) (Stiltz, 2020). Entre estos, únicamente ECA Elevadores reporta el seguimiento de la directiva 2006/42/EC para máquinas europeas y ALEVO indica una capacidad de 500 kg y 12 m de recorrido como parámetros generales de su equipo residencial (ECA, 2017) (Equipos, 2019). Algunas empresas locales han comenzado a vender equipos fabricados localmente, pero su grado de complejidad es mucho menor que los anteriores.

2.4. Normas de diseño para elevadores

Entre las normas, estándares y guías de seguridad que existen relacionadas con elevadores, se encuentran las siguientes: La ASME A17.1-2016/CSA B44-16 incluye los requerimientos de seguridad de diseño, construcción, operación, inspección, pruebas, mantenimiento y reparación para elevadores y escaleras. Contiene una sección específica para elevadores residenciales privados (ASME, 2016). The Americans with Disabilities Act especifica las dimensiones del carro, puertas, señalización y espacios libres necesarios para la implementación de elevadores. También detalla específicamente los criterios para elevadores residenciales (Board, s.f.).

La NFPA 5000-2018 incluye criterios tanto de la ASME A17.1 como de ADA (NFPA, 2020). UNE-EN 81-1 es la norma europea de reglas de seguridad para la construcción e instalación de ascensores. Enlista las disposiciones para la cabina, puertas, contrapeso, cuarto de máquinas, el hueco del ascensor, suspensión, guías, holguras, entre otros criterios (CEN, 2001). Otras normas de construcción que incluyen datos con respecto a la implementación de elevadores son la IBC-2018 y la NFPA 101-2018 (Council, 2018).

2.5. Tesis: diseño de elevadores residenciales

Muñoz (2016) detalla en su tesis de grado de licenciatura en Ingeniería el proceso de diseño del sistema de tracción de un ascensor residencial, mediante el uso de poleas y contrapesos. El trabajo se basa en criterios de la norma EN 81-1 para el frenado (electromagnético y mecánico). Además, cita que la norma incluye criterios para el dimensionamiento de la cabina. El funcionamiento es corroborado mediante «Solidworks Motion» (Muñoz, 2016).

Acosta y Delgado (2013) proponen un diseño de ascensor doméstico para personas con capacidades especiales y adultos mayores (máximo de 250 kg), para dos pisos. Según sus criterios de calificación, considerando costos de fabricación, facilidad de instalación y facilidad de mantenimiento, la implementación de un elevador de rodillo y cable sería atractiva. Bajo los mismos criterios, más uno de diseño estructural, optaron por el desarrollo de un elevador de media cabina en vez de una completa. Utilizaron análisis por el método de Elementos Finitos para el estudio estructural de la cabina y el pandeo en las columnas (Acosta & Delgado, 2013). El trabajo cierra su alcance con los aspectos mecánicos, pero no incluye los criterios de diseño según las necesidades del usuario final.

La movilización entre plantas de un hogar de dos o más niveles representa un riesgo particularmente alto para personas mayores o quienes presentan discapacidades de movilidad. La incorrecta iluminación de las escaleras, la presencia de obstáculos, la ausencia de elementos auxiliares de sujeción, además de los efectos físicos y psicológicos de la discapacidad pueden promover accidentes graves (Tiedemann y col., 2007). En Guatemala prevalece la necesidad de brindar una solución segura y económicamente factible, dada la media de ingreso mensual de técnicos y profesionales de nivel medio de Q4,524 en contraste con un costo medio de \$15,000 para soluciones residenciales profesionales (INE, 2019) (Carmody, 2021).

El 33% de la población latinoamericana mayor a 60 años vive sola o con su pareja (ONU, 2017). Por lo tanto, es necesario un sistema que provea de autonomía y sensación de control del usuario, mediante el cumplimiento de estándares de seguridad y medidas de accesibilidad universal (Car & para la Atención de las Personas con Discapacidad, 2020). La solución debe ser capaz de ser ensamblada en el sitio, a modo de adaptarse a estructuras existentes, además de ser modular para trasladarse en calles de la Ciudad de Guatemala y ubicaciones aledañas con camiones ligeros de 3.5 T.

Existen propuestas de elevadores residenciales enfocados en personas mayores y con discapacidad de movilidad y empresas especializadas en el tema (Acosta & Delgado, 2013). Sin embargo, las soluciones son costosas (con precios que superan los Q 100,000) o son enfocadas únicamente en criterios de ingeniería como la ASME A17.1-2016/CSA B44-16 o UNE-EN 81-1/2, pero sin un desarrollo enfocado en las necesidades específicas de la población guatemalteca objetivo. Por lo tanto, se propone el diseño de un elevador de uso residencial de 2 niveles para adultos mayores o personas con discapacidad de movilidad guatemaltecas, que permita ser trasladada en módulos al lugar de instalación y adaptada a estructuras existentes.

4.1. Objetivo general

Diseñar un elevador modular para uso residencial de 2 niveles para adultos mayores o personas con discapacidad de movilidad, a un costo de materiales no mayor a Q40,000.

4.2. Objetivos específicos

1. Especificar los requisitos de diseño de un elevador para personas mayores o con discapacidad de movilidad
2. Seleccionar el sistema de elevación del carro según el nivel de ruido, consumo de potencia, frecuencia de mantenimiento preventivo, factibilidad de implementación de controles y costo.
3. Diseñar un elevador residencial para 2 personas, con módulos transportables en camiones ligeros de 3.5 toneladas o menos.
4. Diseñar un elevador residencial bajo los criterios de accesibilidad de The Americans with Disabilities Act (ADA) y requerimientos de seguridad.

5.1. Personas con movilidad reducida

La discapacidad de movilidad es una categoría de discapacidad que limita la movilidad independiente e intencional del cuerpo, de una o varias extremidades de la persona. Esta incluye tanto la pérdida de extremidades, pérdida de destreza manual, discapacidad de coordinación con múltiples órganos del cuerpo y fracturas. La alteración a la movilidad puede ser temporal o permanente; congénita o desarrollada con la edad (Disabled World, 2019).

Si bien las limitaciones se manifiestan en el ámbito de la movilidad, el origen de las limitantes de desplazamiento puede provenir de otros factores: discapacidad auditiva, discapacidad visual total o parcial, parálisis cerebral, spina bífida, distrofia muscular, hemiplejía, paraplejía, cuadriplejía y defectos cardíacos (Disabled World, 2019) (Instituto Guatemalteco de Turismo, 2016). El desempeño y participación de estas personas puede verse afectado por factores físicos y culturales. Por un lado, la falta de equipo e instalaciones adecuados. Por el otro, prácticas culturales diferentes, limitantes de edad, sentido de comunidad, accesibilidad en el hogar y ruralidad (Wee & Lysaght, 2009).

Las limitantes de movilidad se agravan particularmente con personas de visión reducida. A diferencia de los individuos ciegos, la visibilidad parcial hace más susceptibles a los distintos niveles de condiciones lumínicas y aprovecha las características visuales distintivas (Zhao y col., 2018b). También deben considerarse los elementos de asistencia para la movilidad, como bastones (trípode, de mano o inglés), muletas, sillas de ruedas, bastón blanco y perro guía al incluir tales características al entorno (Instituto Guatemalteco de Turismo, 2016).

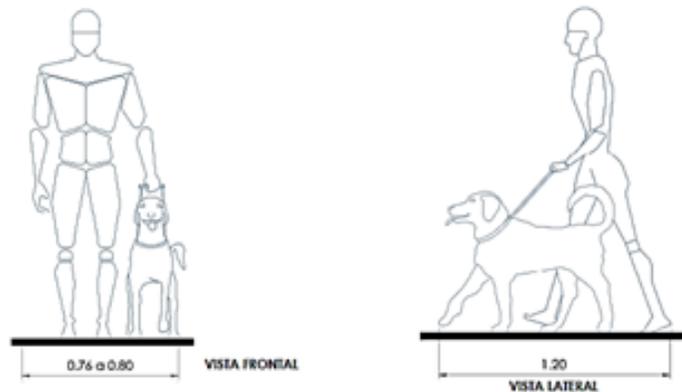
5.1.1. Discapacidad de movilidad: normas y manuales

Para aplicaciones de elevadores domésticos, la norma «Americans with Disabilities Act» considera los espacios necesarios en los pasillos, puertas y carros de elevador para el des-

plazamiento adecuado mediante los elementos de asistencia para la movilidad, además de las señales táctiles, auditivas y visuales. Específicamente, el espacio mínimo del carro de un elevador residencial debe ser de 36 plg x 48 plg. Las puertas de acceso deben tener una vía libre de al menos 32 plg (United States Access Board, 2015).

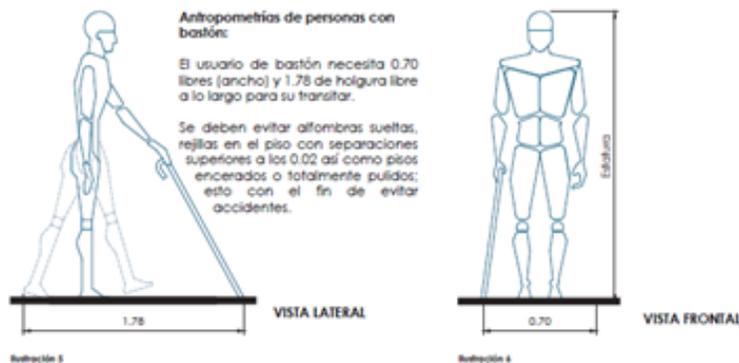
El Manual técnico de accesibilidad turística universal indaga más profundamente en las características antropométricas, según cada herramienta de apoyo para movilidad. A diferencia de la norma ADA, en este se detallan explícitamente los rangos de alcance de las extremidades, en vez de solo mostrar la ubicación de los elementos del espacio (ver Figuras 1, 2 y 3) (Instituto Guatemalteco de Turismo, 2016).

Figura 1: Antropometría de la persona ciega con perro guía



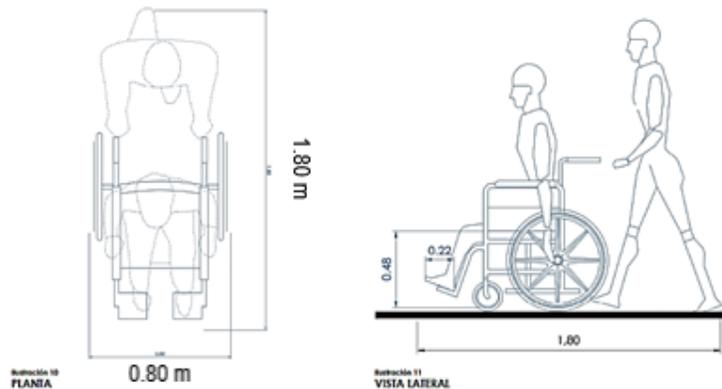
Fuente: Instituto Guatemalteco de Turismo, 2016.

Figura 2: Antropometría de la persona con bastón



Fuente: Instituto Guatemalteco de Turismo, 2016.

Figura 3: Antropometría de la persona en silla de ruedas



Fuente: Instituto Guatemalteco de Turismo, [2016](#).

5.2. Partes básicas del elevador

5.2.1. Cubo y foso

El cubo es la estructura metálica u obra civil a través de la cual se mueve el carro. En esta se instalan los elementos mecánicos y eléctricos del sistema. Únicamente se debe permitir el acceso a personal calificado y el espacio debe ser exclusivo para los sistemas del elevador (Acosta & Delgado, [2013](#)).

Al fondo del cubo se encuentra el foso. Este es un espacio de al menos 0.5 m de alto, que provee la holgura suficiente para que los cilindros de suspensión se compriman. Además, provee un área de seguridad en caso una persona quede atrapada. Debe incluir una lámpara protegida y siempre debe mantenerse encendida (Maldonado, [2013](#)).

5.2.2. Cabina

La cabina es el elemento más importante del elevador, puesto que es donde se transportan las personas hacia los distintos niveles de la edificación. Está compuesta de dos partes: el chasis, que forma el marco estructural; y la cabina, que incluye las puertas interiores, el tablero de control, iluminación y demás características de accesibilidad. El chasis debe ser dimensionado para resistir tanto las cargas de operación normal, como las inducidas por el sistema de paracaídas y cargas sísmicas (Maldonado, [2013](#)).

5.2.3. Sistema de amortiguamiento

El sistema de amortiguación es una de las medidas de seguridad. Se sitúa al fondo del pozo, para detener la cabina y el contrapeso, si lo hubiera. Existen de tres tipos, según la velocidad nominal del carro: amortiguadores elastoméricos (máximo 0.63 m/s), de resorte

(máximo 1 m/s) e hidráulicos (cualquier velocidad) (Acosta & Delgado, 2013).

5.2.4. Guías

Las guías son comúnmente perfiles T de acero extruido o formado. Se emplean para guiar la trayectoria del elevador y el contrapeso, además de servir de medida de seguridad para cargas sísmicas. El carro se ancla a las superficies del perfil mediante zapatas, que pueden ser de rodillos o de deslizamiento (Division of Capital Asset Management and Maintenance, 2017).

5.2.5. Grupo de elevación

El sistema de elevación puede ser eléctrico (de tracción), hidráulico o tipos especiales. Los eléctricos pueden operar con motores de una velocidad, dos o múltiples mediante un variador de frecuencia (Shrestha, 2019). Las características de estos sistemas se detallarán en el siguiente capítulo.

5.2.6. Sistemas de seguridad

Los sistemas de seguridad abarcan todos los elementos que deberían activarse en caso de falla o que previenen lesiones. A continuación, se enlistan los generales (Strakosch & Caporale, 2010):

- Freno de cables
- Freno de motor
- Controlador
- Paracaídas
- Gobernador de velocidad
- Final de carrera
- Contrapeso
- Operador de puertas
- Marco del carro
- Batería de respaldo
- Bomba manual
- Amortiguadores
- Sensores de cierre de puerta
- Seguro de puerta

5.2.7. Elementos de interfase y accesibilidad

Los elementos de interfase son las piezas con las que las personas interactuarán con el elevador. Estas comprenden tanto los botones y señalizaciones del interior de carro, como las del pasillo y los controles del operario de mantenimiento (Strakosch & Caporale, 2010):

- Puertas del carro
- Panel del controlador
- Panel de operación del carro
- Protección de cierre de puertas
- Botones de llamada en piso
- Seguro de puertas
- Indicadores de llegada en piso
- Indicadores de posición en piso
- Comunicador de emergencia

5.3. Tipos de ascensores según el sistema de elevación

En general, los elevadores se pueden catalogar en tres grupos, según su sistema de elevación (Shrestha, 2019):

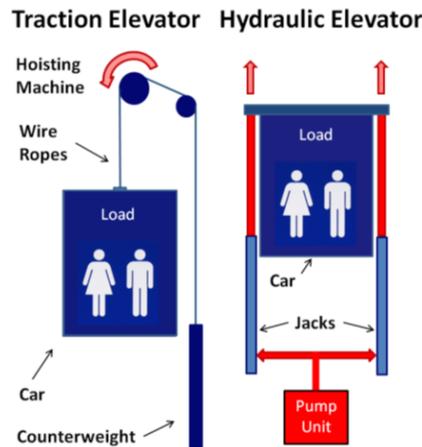
5.3.1. Ascensores eléctricos

Son los elevadores de uso más frecuente para el traslado vertical. Si bien la potencia de entrada la provee el motor eléctrico, estos comprenden de un sistema de tracción completo. Se compone del motor, un freno de seguridad, un sistema de reducción, contrapeso; y poleas de tracción y desvío. La polea arrastra los cables por adherencia e impulsa al conjunto carro-contrapeso (Muñoz, 2016).

Los ascensores eléctricos tienen, a su vez, tres subdivisiones. Según la configuración del grupo de tracción, estos se clasifican en elevadores de tracción (con y sin caja reductora), de tambor (conducción positiva) y de motor de inducción lineal (LIM) (Shrestha, 2019):

- **Elevadores de tracción:** Estos utilizan cables que pasan sobre la polea, para unir al carro con el contrapeso. La tracción funciona únicamente por fricción. El uso de una caja reductora depende, principalmente, de la velocidad máxima deseada del carro (Shrestha, 2019). En edificaciones altas, es común encontrar un sistema de transmisión con engranes, mientras que las instalaciones de vivienda bajas manejan velocidades de hasta 0.7 m/s (Muñoz, 2016).

Figura 4: Esquema de las tecnologías de tracción (izquierda) e hidráulica (derecha)



Fuente: Bos y col., [2014](#).

Según la ubicación del conjunto de tracción, también pueden subdividirse en elevadores de tracción con o sin cuarto de máquinas. Existe una tendencia por no implementar cuarto de máquinas en edificaciones pequeñas, puesto que ahorran espacio y energía con misma confiabilidad de operación (Shrestha, [2019](#)).

- **Elevadores de tambor:** Los ascensores de tambor también emplean cables para suspender el carro, pero la transmisión de potencia no depende de la fricción. Más bien, los cables se embobinan alrededor del tambor. Estos han caído en desuso casi en su totalidad, con excepción de aplicaciones de bajos desplazamientos, por la tendencia de falla de la tracción entre el cable y el tambor (Shrestha, [2019](#)).
- **Elevadores de motor de inducción lineal:** La tecnología de inducción lineal LIM genera la transmisión de potencia directamente sobre el carro o contrapeso del elevador. Es de los sistemas más modernos, eficientes y confiables. Además, la instalación del motor directamente en el carro elimina la necesidad de un cuarto de máquinas. En combinación con estos, es posible utilizar cables o levitación magnética para la guía del carro (Shrestha, [2019](#)).

5.3.2. Ascensores hidráulicos

Los elevadores hidráulicos propulsan el carro, directa o indirectamente, con un cilindro y bomba hidráulica. Generalmente se aplican para casos de baja velocidad, de hasta 150 ft/min (0.76 m/s) y altura de hasta 7 pisos o 60 ft (18 m) (Division of Capital Asset Management and Maintenance, [2017](#)). No requieren contrapesos, lo que los vuelve más compactos, pero pueden implementarse para mejorar eficiencia. Si bien la configuración más común es la de un único cilindro central, es posible utilizarlos en pares a los costados del carro (Celik & Korbahiti, [2006](#)).

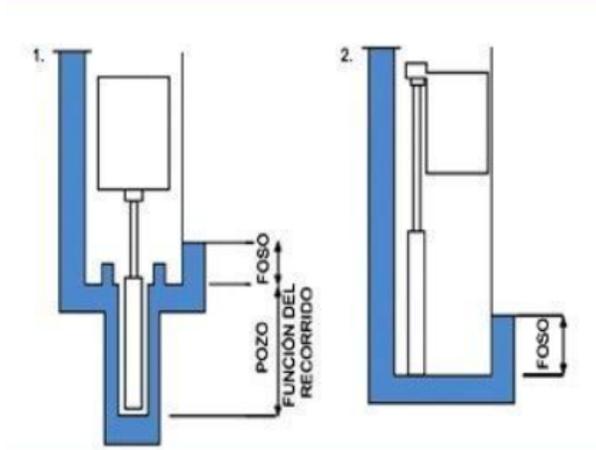
La popularidad de esta tecnología en EE. UU. es notoria, considerando que forman más del 70 por ciento de las instalaciones de ascensores, a un costo de instalación 23 por ciento

menor (Bos y col., 2014). Para conseguir más altura, existen los cilindros telescópicos, la instalación de cilindros largos bajo tierra o la combinación del sistema hidráulico con una serie de poleas y cables. Como medida de seguridad, pueden contar con una bomba manual de emergencia (Celik & Korbahti, 2006).

Una de las grandes ventajas de los elevadores hidráulicos es que son menos complejos que los mecanismos de tracción eléctricos. Esto los hace más económicos de construir, instalar y mantener. En particular, cuentan con la ventaja de ser más estables al exponerse a cargas sísmicas, puesto que la masa del sistema hidráulico se instala en la planta baja. Además, la carga del elevador se traslada directamente a los cimientos, en vez de dirigirse a la estructura de la edificación. (Celik, 2005).

Sin embargo, debe considerarse que los sistemas hidráulicos son propensos a pérdidas de energía por calor, con lo que enfrentan retos de eficiencia (Bos y col., 2014). Usualmente, la metodología de regulación de velocidad y aceleración es la implementación de válvulas de derivación y reguladoras. Las soluciones para estas deficiencias es el uso de una bomba de velocidad variable, en conjunto con electroválvulas (Murthy & Taylor, 2018).

Figura 5: Comparación entre sistemas hidráulicos con y sin pozo



Fuente: «Ascensor Hidráulico», 2020.

Elevador hidráulico sin pozo

Tienen la ventaja de no requerir perforar el alojamiento del cilindro en el piso del foso (ver Figura 5, (2)). Se dividen en elevadores de una etapa, de múltiples etapas (telescópico) y de tracción.

- Única etapa: Emplea cilindros debajo o al lado del carro y permite elevaciones de hasta 20 pies o tres niveles (Division of Capital Asset Management and Maintenance, 2017).
- Telescópico: Se instalan dos o tres cilindros de múltiples etapas. Consiguen un máximo de cuatro niveles (44 pies) (Division of Capital Asset Management and Maintenance, 2017).

- De tracción: Combina el uso de cilindros hidráulicos con cables para incrementar el alcance. Estos tienen una limitante de carga máxima, de 3500 lbs y 60 pies de altura (7 paradas) (Division of Capital Asset Management and Maintenance, [2017](#)).

Elevador hidráulico con pozo

Para reducir el espacio necesario, es posible instalar el cilindro de elevación principal en un agujero directamente por debajo del carro (ver Figura [5](#), (1)). De esta manera, se pueden conseguir carreras de hasta 60 pies (7 niveles) con una configuración más simple (Division of Capital Asset Management and Maintenance, [2017](#)).

5.3.3. Otros tipos de elevadores

Existen otras tecnologías de elevación del carro de un ascensor. Una de estas es la neumática, en donde el carro recorre en el interior de un cilindro y turbinas succionan el aire por el lado superior para moverlo. No son muy comunes, por su dificultad para cumplir con normas de seguridad; y su aplicación está limitada a residencias de pocos niveles (Shrestha, [2019](#)).

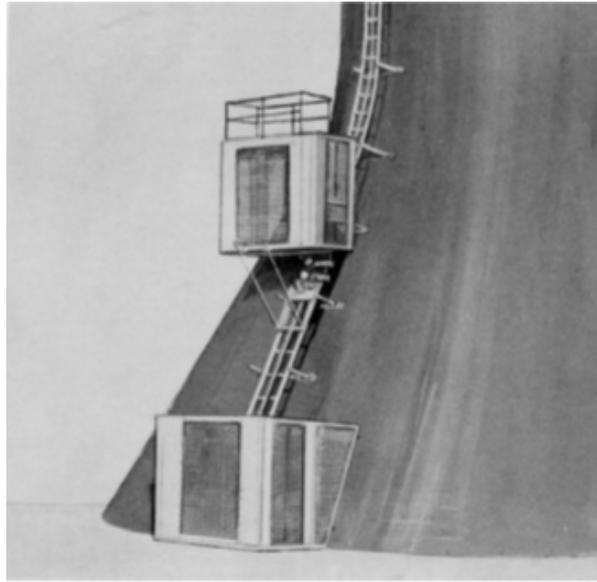
Figura 6: Elevador neumático



Fuente: Shrestha, [2019](#).

Otros elevadores utilizan un sistema piñón-cremallera, donde la cremallera es estacionaria. Tienen la ventaja de contener todo el sistema de potencia en el carro, por lo que son útiles en minas y edificios particularmente altos. También cuentan con la ventaja de no restringir el movimiento del elevador a una orientación vertical. Existen aplicaciones comerciales, pero la mayoría se limita a una solución temporal para sitios de construcción (Strakosch & Caporale, [2010](#)).

Figura 7: Elevador de piñón y cremallera



Fuente: Strakosch y Caporale, [2010](#).

5.3.4. Cuadro comparativo entre tecnologías

Ambas tecnologías convencionales, la tracción electromecánica como la hidráulica, tienen sus beneficios y costos. En la Figura [1](#) se realizó una recopilación de las ventajas y desventajas generales para ambos casos.

Cuadro 1: Cuadro comparativo de las tecnologías de tracción e hidráulica en elevadores

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Elevador hidráulico	Precisión, Reducción de consumo eléctrico, Ascenso de hasta 50 toneladas, Reducción de vibraciones, Sin necesidad de cuarto de máquinas, Menor desgaste en componentes, Menor sobrecarga de estructura del edificio, Sin necesidad de paracaídas, Centro de masa más bajo.	Bajas velocidades y aceleraciones, Aumento económico por fluido de trabajo, Espacio para depósito, Aumento de tiempo de mantenimiento, Mayor potencia instalada con respecto a un equivalente eléctrico, Altura de edificio limitada, Dependencia de la temperatura del aceite, Desprendimiento de olor a aceite en la edificación. Aumento de costo por fluido de trabajo.
Elevador eléctrico	Sin limitación de recorrido, Mantenimiento económico, Eficiente, Mayores velocidades.	Alto desgaste en cables y componentes de tracción, Mayor sobrecarga al edificio, Instalación menos flexible, Necesidad de un contrapeso, Centro de masa más alto, Vibraciones notorias a altas velocidades.

Fuente: Celik, [2005](#).

Celik, [2005](#) llevó a cabo un análisis de la viabilidad de las tecnologías hidráulica, de tracción y sin cuarto de máquinas. Considerando criterios de seguridad ante incendios y sismos, además de los costos de mantenimiento, instalación y consumo energético, las ponderó sobre un total de 39 puntos (ver Figura [2](#)). Según el estudio, la tecnología más conveniente para edificaciones de tamaño moderado es la hidráulica, con una ponderación de 18.5 / 39.

Cuadro 2: Tabla de ponderación de elevadores hidráulicos, de tracción y sin cuarto de máquinas según criterios de seguridad y costo

	Criteria	Hydraulic	Traction	MRL	Notes
Safety	Speed	0	2	1	
	Rescue	2.5	0.5	0	Easy-rescue of trapped passengers
	Safety-maintenance	2	1	0	
	Safety-running	1.5	1	0.5	
	Resistance to quakes	3	0	0	
	Safety Points %	9	2.5	0.5	= 12 points
		75	21	4	100
Total	Energy consumption	0	1	2	In operation
	Installation cost	2	0	1	
	Service cost	2	1	0	
	Client dependency	1.5	1.5	0	
	Service requirement	2	0	1	
	Environment friendliness	0	1	2	Oil leakage
	Cost points %	7.5	4.5	6	= 18 points
		42	25	33	100
Others	Noise in the shaft	1	1	1	
	Machine room dependency	1	0	2	Location + necessity
	Total points %	18.5	10	10.5	= 39 points
		47	26	27	100

Donde MRL: *machine room less elevator*, o elevadores sin cuarto de máquina.

Fuente: Celik, [2005](#).

5.4. Normas y criterios de diseño

Las normas abordan las especificaciones de los elevadores residenciales según dos enfoques principales: criterios de ingeniería y criterios de accesibilidad. Para el dimensionamiento y elección de factores de seguridad está la norma estadounidense ASME A17.1/CSA B44, que abarca tanto elevadores eléctricos como hidráulicos; y las normas europeas UNE-EN81-1 y UNE-EN81-2, donde ambas tecnologías de tracción se consideran por separado (The American Society of Mechanical Engineers, [2016](#)); (Comité Europeo de Normalización, [1998](#)).

Para asegurar la accesibilidad a personas con discapacidad, están el Acta Americana de la Discapacidad y el Manual de normas técnicas de accesibilidad universal. En estos documentos, se especifican las dimensiones y características que deben tener las instalaciones para permitir la movilización autónoma y digna de las personas con discapacidad de movilidad (United States Access Board, [2015](#)); (Car & para la Atención de las Personas con Discapacidad, [2020](#)).

5.5. Dimensionamiento sísmico

Según la disposición de la estructura de un elevador y su dependencia mecánica con respecto a la edificación en la que se instala, es posible que deba considerarse su respuesta ante cargas sísmicas.

Existen dos tipos generales de ondas sísmicas. La onda más rápida, que llega primero a la ubicación de interés, es la onda P. Esta comprime el medio en el mismo sentido en el que viaja. La segunda onda, la más lenta, es la tipo S. Su dirección de oscilación es perpendicular al sentido con el cual viaja. La propagación de estas ondas resulta en movimientos inducidos

en las estructuras (Strakosch & Caporale, 2010).

La norma ASME A17.1/CSA B44 establece criterios de diseño para contrarrestarlos. Los carros y contrapesos libres son particularmente peligrosos bajo tales condiciones. La norma establece algunos criterios para la mitigación de fallas. Tanto el carro como el contrapeso deben estar restringidos con rieles. Para el contrapeso se sugieren rieles tipo C, para mitigar el vaivén del contrapeso contra el carro. Se sugiere la implementación de sensores para detener el elevador al detectar desplazamientos del contrapeso (Strakosch & Caporale, 2010).

Para evitar la oscilación arriba-abajo del carro y el contrapeso, deben implementarse cables de refuerzo desde el inferior de la estructura. Todo elemento que pueda deslizarse de su posición debe tener guardas o seguros. Además, la estructura y rieles deben poder soportar cargas de choque horizontales (Strakosch & Caporale, 2010).

Si el elevador cuenta con sensores para ondas S y P, este puede detenerse automáticamente previo a la llegada del sismo (Strakosch & Caporale, 2010). Para caracterizar adecuadamente la respuesta dinámica de una estructura esbelta y alta, como la de un elevador, se puede llevar a cabo un análisis modal y de análisis espectral mediante el método de Elementos Finitos (Ji y col., 2012). Con respecto a las cargas de aceleraciones, la norma ASME A17.1/CSA B44 ha definido magnitudes según cinco zonas en EE.UU (The American Society of Mechanical Engineers, 2016).

La información más crítica para el dimensionamiento de estructuras ante cargas sísmicas es la respuesta espectral de aceleraciones. La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica presenta una serie de ecuaciones y factores para estimarlas. A continuación se definen tales parámetros (AGIES, 2018b).

5.5.1. Espectros sísmicos generales según la NSE 2

Definiciones

Según la NSE (Normas de Seguridad Estructural) 2, se definen los siguientes términos básicos (AGIES, 2018b):

- Índice de Sismicidad (I_o): Indica el nivel de protección sísmica necesario para el diseño y selección de espectro sísmico. Para Guatemala, sus niveles se distribuyen en macrozonas que varían entre $I_o = [2, 4]$.
- Nivel de Protección Sísmica (NPS): Nivel necesario para proteger adecuadamente la vida e integridad física de los usuarios, proveer una calidad mínima estructural y protección contra daños. Se establece con respecto al I_o y la Clasificación de Obra (ver Figura 3).
- Clasificación de Obra: Divide las obras según sus características ocupacionales (AGIES, 2018a):
 - Obras utilitarias: Albergan personas de manera incidental. No están diseñadas para ser habitables.

- Obras ordinarias: Obras que no entren en las demás categorías o con carga de ocupación por debajo de 300 personas.
 - Obras importantes: Albergan o pueden afectar a una gran cantidad de personas, donde sus ocupantes estén restringidos a desplazarse.
 - Obras esenciales: Deben permanecer en operación continua durante y después de un siniestro.
- Clasificación del sitio: Clasificación según las características del perfil de suelo bajo los cimientos. Se dividen en las categorías AB, C, D, E o F. Su definición es crítica para la configuración del espectro de diseño.

Cuadro 3: Tabla de nivel de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño

Índice de Sismicidad [b]	Clase de Obra [a]			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
Io = 4	E	D	D	C
Io = 3	D	C	C	B
Io = 2	C	B	B	A
Probabilidad de exceder el sismo de diseño [c]	5% en 50 años [d]	5% en 50 años [d]	10% en 50 años	Sismo mínimo [e]

[a] Ver clasificación de obra en NSE 1, Capítulo 3.

[b] Ver índice de sismicidad en NSE 2, Sección, 4.2.1.

[c] Ver NSE 2, Sección 4.4 para selección de espectro sísmico de diseño según probabilidad de excederlo.

[d] A las obras “Esenciales” e “Importantes” les corresponde un sismo con la misma probabilidad de excedencia – se diferencian en detalles del Nivel de Protección y en las deformaciones laterales permitidas.

[e] Ver NSE 2, Sección 4.4.2 (d).

Fuente: AGIES, 2018b

Espectros genéricos de diseño

Para el diseño sísmico, se aplican espectros de respuesta sísmica simplificados. Estos están basados en estructuras con 5 por ciento de amortiguamiento y se describen mediante una función por partes de aceleración $S_a(T)$ con respecto al período T (AGIES, 2018b):

La curva de la respuesta espectral probabilística de diseño se estima mediante la siguiente ecuación:

$$S_a(T) = \begin{cases} S_{cd} & T_0 \leq T \leq T_s, \\ S_{1d}/T & T > T_s, \\ S_{cd}[0.4 + 0.6T/T_0] & T < T_0 \end{cases}$$

Donde:

$S_{cd} = K_d S_{cs}$... parámetro calibrado a la probabilidad,

$S_{1d} = K_d S_{1s}$... parámetro calibrado a la probabilidad,

$S_{cs} = S_{cr} F_a N_a \dots S_{cr}$ = parámetro de función espectral, (ver Figura 9)

$S_{1s} = S_{1r} F_v N_v \dots S_{1r}$ = parámetro de función espectral, (ver Figura 9)

K_d ... Factor de probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño, (ver Cuadro 6)

F_a ... Coeficiente de sitio para períodos de vibración cortos, (ver Cuadro 4)

F_v ... Coeficiente de sitio para períodos de vibración largos, (ver Cuadro 5)

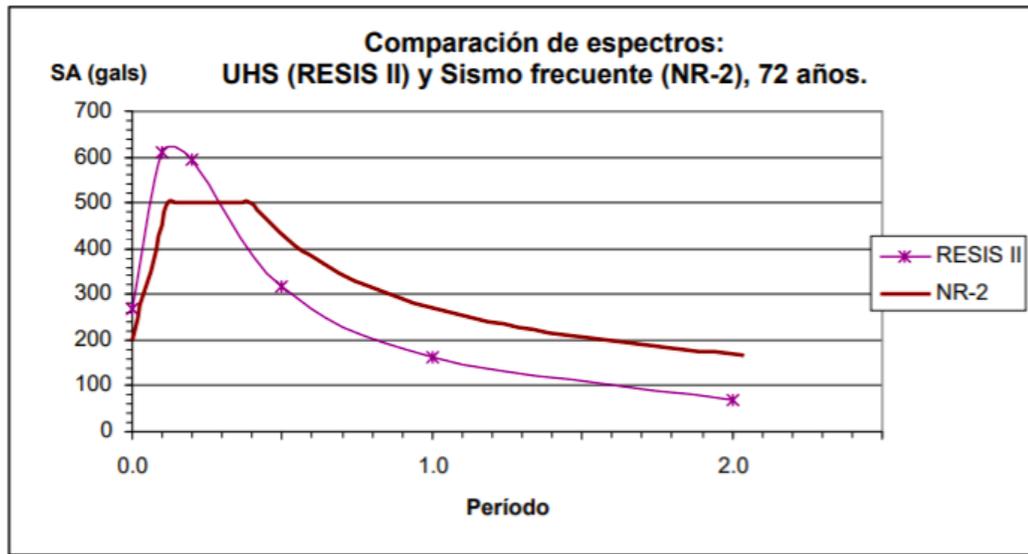
N_a ... Factor proximidad de amenazas especiales, (ver Cuadro 8)

N_v ... Factor proximidad de amenazas especiales, (ver Cuadro 9)

$T_0 = 0.2T_s$... Periodo de inicio de meseta de períodos cortos,

$T_s = S_{1s}/S_{cs}$... Periodo de separación entre períodos cortos y largos,

Figura 8: Espectro de amenaza uniforme, UHS (*Uniform Hazard Spectra*) del Proyecto RESIS II (Reducción del Riesgo Sísmico en Guatemala, El Salvador y Nicaragua con Cooperación Regional a Honduras, Costa Rica y Panamá) y espectro de diseño para el sismo frecuente, Norma (NR-2) de AGIES, en suelo firme en Ciudad de Guatemala



Fuente: Oterino y et.al., 2009.

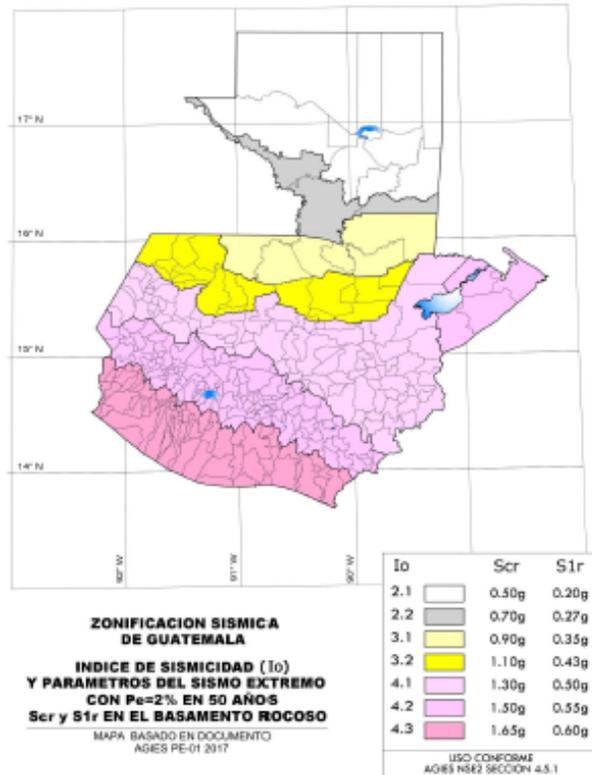
Cuadro 4: Coeficientes de sitio F_a

Clases de Sitio	Índice de Sismicidad					
	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2 4.3
AB	1	1	1	1	1	
C [1]	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	
D	1.4	1.2	1.1	1	1	
E	1.7	1.3	1.1	1	0.9	
F	Se requiere evaluación específica – ver Sección 4.4					

[1] En los casos en que la investigación de suelos abreviada no especifique si un suelo firme clasifica como C o como D, el factor F_a se tomará del suelo C.

Fuente: AGIES, 2018b

Figura 9: Mapa de zonificación sísmica de Guatemala



Fuente: AGIES, [2018b](#).

Cuadro 5: Coeficientes de sitio F_v

Clases de Sitio	Índice de Sismicidad						
	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3
AB	1	1	1	1	1		
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4		
D [1]	2.2	2	1.9	1.8	1.7		
E	3.3	2.8	2.6	2.4	2.2		
F	Se requiere evaluación específica – ver Sección 4.4						

[1] En los casos en que la investigación de suelos abreviada no especifique si un suelo firme clasifica como C o como D, el factor F_v se tomará del suelo D.

Fuente: AGIES, [2018b](#).

Cuadro 6: Factores de probabilidad K_d

Nivel de Sismo	Factor K_d
Sismo ordinario – 10 % probabilidad de ser excedido en 50 años	0.66
Sismo severo – 5 % probabilidad de ser excedido en 50 años	0.8
Sismo extremo – 2 % probabilidad de ser excedido en 50 años	1
Sismo mínimo – condición de excepción	0.55

Fuente: AGIES, [2018b](#).

Cuadro 7: Tipo de fuente sísmica

Tipo de Fuente	Descripción	Máxima magnitud-momento	Tasa de Corrimiento (mm por año)
A	Fallas geológicas capaces de generar eventos de gran magnitud y con alta tasa de sismicidad [1]	$Mo \geq 7.0$	$TC \geq 5$
B	Fallas geológicas que no son A o C	$Mo < 7.0$ $Mo \geq 6.5$	$TC < 5$ $TC > 2$ $TC < 2$
C	Fallas geológicas incapaces de generar eventos de gran magnitud y que tienen baja tasa de sismicidad	$Mo < 6.5$	$TC \leq 2$

[1] La zona de subducción del territorio de Guatemala no debe considerarse en esta clasificación debido a la distancia de la fuente.

Fuente: AGIES, [2018b](#)

Cuadro 8: Factor para períodos cortos de vibración N_a

Tipo de Fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica [1] [2]		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1.25	1.12	1
B	1.12	1	1
C	1	1	1

[1] Tomar distancia horizontal a la proyección horizontal de la fuente sísmica sobre la superficie; no considerar las porciones del plano de falla cuya profundidad exceda 10 km.

[2] Utilizar el mayor factor N_a obtenido al cotejar todas las fuentes relevantes.

Fuente: AGIES, [2018b](#)

Cuadro 9: Factores para períodos largos de vibración N_v

Tipo de Fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica [1] [2]			
	≤ 2 km	5 km	10 km	≥ 15 km
A	1.4	1.2	1.1	1
B	1.2	1.1	1	1
C	1	1	1	1

[1] Tomar distancia horizontal a la proyección horizontal de la fuente sísmica sobre la superficie; no considerar las porciones del plano de falla cuya profundidad exceda 10 km.

[2] Utilizar el mayor factor N_v obtenido al cotejar todas las fuentes relevantes.

Fuente: AGIES, [2018b](#)

6.1. Descripción de metodología

El diseño se dividió en dos partes generales: el dimensionamiento mecánico de las componentes estructurales y el estudio relacionado a los componentes de accesibilidad (de interacción con el usuario) para definir los parámetros de un estudio de seguimiento:

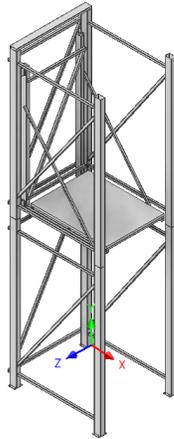
6.1.1. Componentes mecánicos

Marco del carro y estructura

Se inició con el dimensionamiento del marco del carro, para obtener las fuerzas de reacción ejercidas por la estructura y rieles guía y esfuerzos ejercidos en los perfiles. Se utilizó un diseño con guías laterales para reducir los componentes de acero inoxidable, con acabado superficial, además de simplificar el modelo. Se seleccionaron perfiles de tubo rectangular de acero, debido a su facilidad de acceso en Guatemala.

Para la estructura, se consideraron dos escenarios críticos de carga para cada marco: marco frontal (en el plano XY) y marco lateral (en el plano YZ). Se utilizaron las cargas de reacción que ejercería el carro en cada uno. Un caso, cuando el carro esté siendo sostenido únicamente por una de las dos guías por medio del freno de emergencia y el apoyo inferior (marco frontal). El segundo, en el que se esté aplicando el total de la carga en solo uno de los marcos laterales, simulando una distribución asimétrica de la carga hacia uno de los extremos del carro (en el plano YZ) (ver Figura 10). El marco completo de la estructura cumple con la función de reducir las cargas por momento flexionante y proveer un ensamble de protección para las piezas móviles.

Figura 10: Diagrama de marcos de la estructura y carro, con definición de planos XYZ.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Riel guía y elementos de sujeción

El riel guía y zapatas deben ser capaces de soportar la carga de deflexión por la carga excéntrica que ejerce el carro. Además, el riel debe soportar la carga de frenado. Puesto que son componentes sujetos a desgaste, se dimensionaron considerando su facilidad de reemplazo y uniones no permanentes.

Sistema hidráulico

El sistema hidráulico se dimensionó considerando una multiplicación de desplazamiento ejercida por el juego de poleas, por lo que se utilizó el doble de la carga de diseño calculada del carro. Se consideró el cilindro actuando a tensión, a modo de eliminar el riesgo por pandeo y reducir el desgaste por posibles desalineamientos. Debido a las restricciones de cilindros existentes y la necesidad de caudal de diseño, se seleccionó un cilindro sobredimensionado a la carga. Con los datos obtenidos, se estimó el volumen del reservorio, el caudal de la bomba y la potencia al eje del motor eléctrico.

Sistema de tracción

El sistema de tracción se compone de los cables, poleas y subensambles de acople al cilindro y estructura del elevador. Para el cable, se consideró la dimensión mínima por requerimiento de diseño y su resistencia a la ruptura. La polea se dimensionó con base a razones comunes de diámetro polea-cable. La sujeción del cilindro y poleas se calcularon con base en la carga de trabajo y la resistencia de soldadura y pernos.

Espectro de respuesta sísmica

El espectro de respuesta sísmica de diseño se estimó según las Normas de Seguridad para la República de Guatemala al año 2018 (AGIES, 2018b). Considerando que el proyecto tiene como alcance su instalación en cualquier ubicación aledaña a la Ciudad de Guatemala, se utilizaron factores conservadores y generalizaciones.

Amortiguador de emergencia

Se calculó la constante de resorte necesaria, según el caso crítico de caída libre desde el segundo nivel a carga máxima. Se utilizó un análisis de balance de energía y un criterio de carrera mínima del resorte.

6.1.2. Componentes de accesibilidad

Se llevó a cabo una encuesta, para ponderar la relevancia de la ubicación y tipo de componentes de accesibilidad ante los usuarios de interés. Se recopilaron respuestas con respecto a las puertas del carro, ubicación de botones, elementos de alerta, seguridad, barandas y espacio dentro del cubo.

6.2. Identificación de necesidades

Se utilizó una encuesta para evaluar los componentes críticos para los usuarios objetivo. Se utilizó la herramienta de Google Forms, para compartirla a personas mayores, con impedimentos de movilidad o quienes les asistieran en sus actividades diarias. Se obtuvo 71 respuestas y se identificaron las necesidades preliminares, base para un estudio de seguimiento del diseño del interior del carro, puertas y pasillos de entrada.

Figura 11: Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué factores consideraría críticos para decidir si invertir en un elevador residencial o no?



Fuente: Elaboración propia.

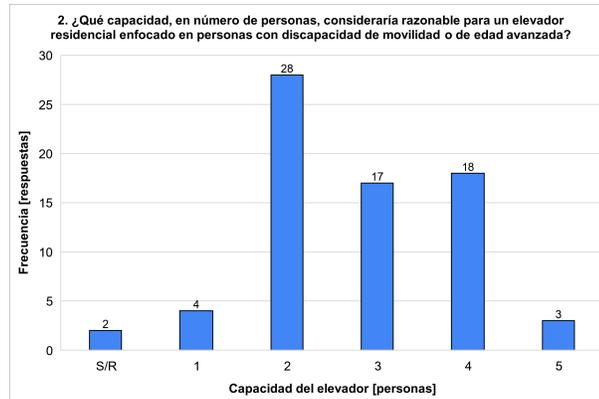
Donde (ver Figura 11):

- A:** El espacio que ocupe en la residencia.
- B:** Estabilidad al subirse o bajarse.
- C:** Tamaño del cubículo del elevador.
- D:** Consumo de potencia.
- E:** Apertura automática de las puertas.
- F:** Existencia de una baranda.
- G:** Nivel de ruido.
- H:** Capacidad de carga.
- I:** Botones y señales accesibles.
- J:** Tamaño de la puerta.
- K:** Frenado y aceleración bajos.
- L:** Velocidad de ascenso o descenso baja.
- M:** Rejillas.
- N:** Visibilidad al interior del carro (paredes del elevador con vidrio).
- Ñ:** Velocidad de ascenso o descenso sea alta.
- O:** Acabados interiores.
- P:** Costo.
- Q:** Sin respuesta.
- R:** Apoyadores dentro.
- S:** Con mención: sube/baja.
- T:** Costo - beneficio.
- U:** La inversión.
- V:** Requerimientos básicos de obra civil para poder instalarlo.

La Figura 11 muestra las frecuencias absolutas y relativas acumuladas de las respuestas a los factores críticos para decidir si invertir, o no, en un elevador residencial. El 80 % de las respuestas se enfocan en restricciones por el espacio de instalación (dimensiones, potencia, ruido y capacidad) y criterios básicos de accesibilidad (estabilidad del carro, apertura de las puertas, barandas y señalizaciones). Los dos factores más relevantes fueron el espacio que ocupe en la residencia y la estabilidad del carro al subirse.

La optimización del tamaño de estructura de soporte podría reducir el espacio de instalación, maximizando el espacio de carga. El uso de tracción hidráulica indirecta, con uso de cables sobredimensionados, podría reducir la oscilación del carro en condiciones de carga/descarga. El nivel de ruido podría reducirse disminuyendo el requerimiento de potencia de los equipos y manteniendo las velocidades moderadas.

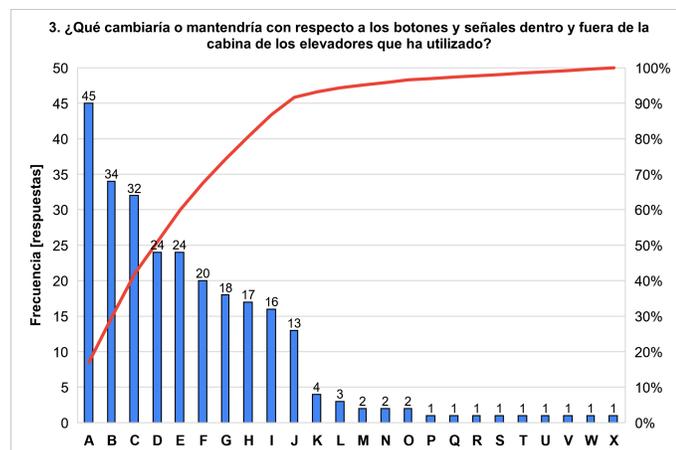
Figura 12: Frecuencia de respuestas a: ¿Qué capacidad, en número de personas, consideraría razonable para un elevador residencial enfocado en personas con discapacidad de movilidad o de edad avanzada?



Donde: **S/R** corresponde a "Sin Respuestas"
 Fuente: Elaboración propia.

Las respuestas con respecto a la capacidad de carga requerida se resumen en la Figura 12. El 38.9 % indicó preferiría un elevador residencial con capacidad para dos personas. Esto respalda el balance entre un diseño con mínimo espacio de instalación necesario y espacio dentro del carro para los criterios de movilidad.

Figura 13: Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué cambiaría o mantendría con respecto a los botones y señales dentro y fuera de la cabina de los elevadores que ha utilizado?



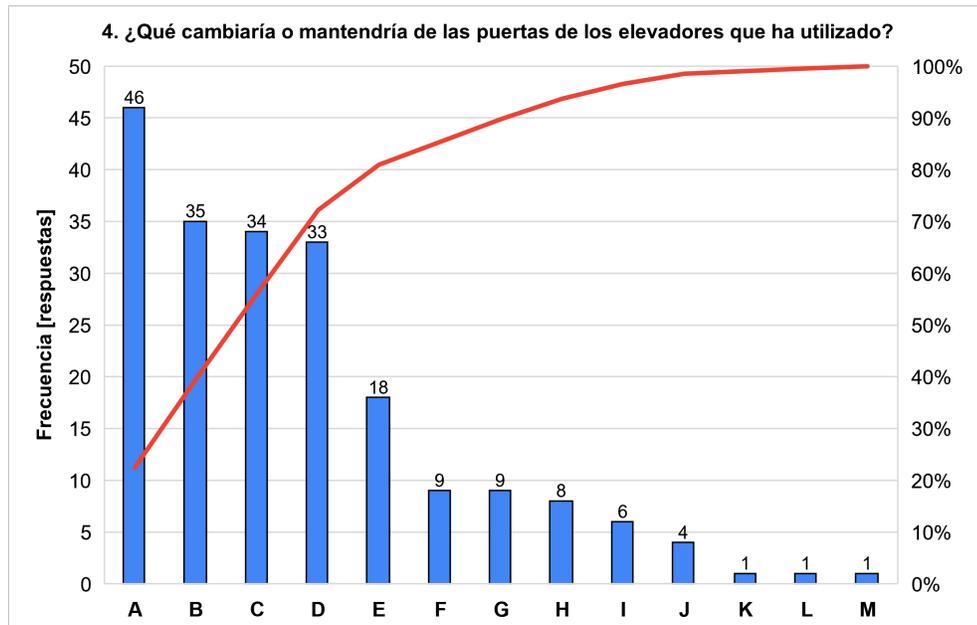
Fuente: Elaboración propia.

Donde (ver Figura 13):

- A:** Mayor señalización luminosa.
- B:** Señalización en Braille más grande.
- C:** Botones más grandes.
- D:** Botones en el interior del elevador más cercanos a las puertas.
- E:** Uso de señales luminosa con códigos de colores.
- F:** Botones más cercanos al piso del elevador.
- G:** Sonidos y alarmas más intensos.
- H:** Distribución de los botones en las paredes interiores del elevador más espaciada.
- I:** Botones en el interior del elevador.
- J:** Sonidos y alarmas más atenuados.
- K:** Señalización en Braille más compacta.
- L:** Botones más alejados al piso del elevador.
- M:** Sin respuesta.
- N:** Distribución de los botones en las paredes interiores del elevador más compacta.
- Ñ:** Menor señalización luminosa.
- O:** Botones de ayuda.
- P:** Botones en el piso.
- Q:** Botones no tan pegados a la puerta ni tan cerca del piso pero accesibles para gente con silla de ruedas.
- R:** Fechas de mantenimiento efectivos.
- S:** Para no estar teniendo que descifrar cómo es el sistema de distribución de botones en cada uno.
- T:** **U:** Que hubiera una forma universal para todos los elevadores.
- U:** Sensor de puerta más eficiente.
- V:** Sensor de voz para activarlo o desactivarlo.

En la Figura 13 se favorece a la mayor iluminación, al nivel de alarmas sonoras y al tamaño de los botones (respuestas A a H, 80% acumulado). Se resalta la necesidad de una altura adecuada de los botones para personas en sillas de ruedas. Entre las respuestas adicionales destaca la propuesta de estandarización en el diseño de los elevadores, con enfoque específico en la distribución de los botones.

Figura 14: Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué cambiaría o mantendría de las puertas de los elevadores que ha utilizado?



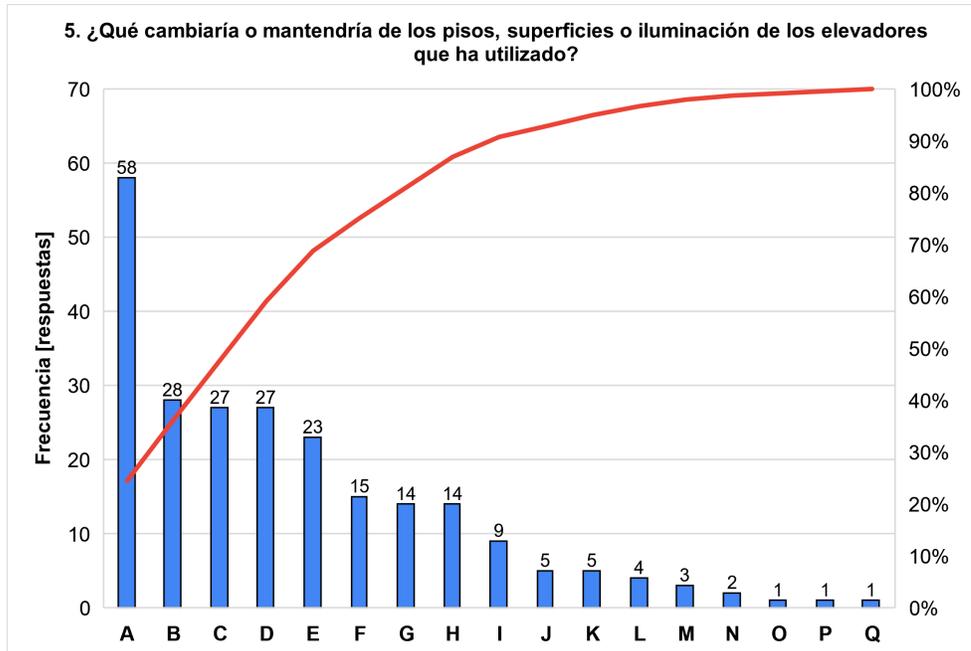
Fuente: Elaboración propia.

Donde (ver Figura 14):

- A:** Puertas de apertura y cierre automáticos.
- B:** Apertura de entrada más grande.
- C:** Tiempo de espera más prolongado antes del cierre automático.
- D:** Puerta con ventana o transparente.
- E:** Puertas deslizantes.
- F:** Puerta no transparente.
- G:** Tiempo de espera más corto antes del cierre automático.
- H:** Puertas de accionamiento manual.
- I:** Puertas abatibles.
- J:** Sin respuesta.
- K:** Apertura de entrada más pequeña.
- L:** Más sensores para evitar de las puertas golpeen a las personas que están entrando justo cuando se activa el cierre automático.
- M:** Nada.

Con respecto a las puertas, en la Figura 14, se favorecen las puertas de acción automática, deslizantes, con ventana hacia el pasillo. Nuevamente se destaca el tamaño de la apertura del carro, que coincide con los requerimientos de accesibilidad. Se destaca la necesidad de tiempo suficiente para abordar y salir del carro. Para este trabajo, se abordó la dimensión de la apertura, pero quedó fuera del alcance el diseño del mecanismo automático de la puerta.

Figura 15: Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué cambiaría o mantendría de los pisos, superficies o iluminación de los elevadores que ha utilizado?



Fuente: Elaboración propia.

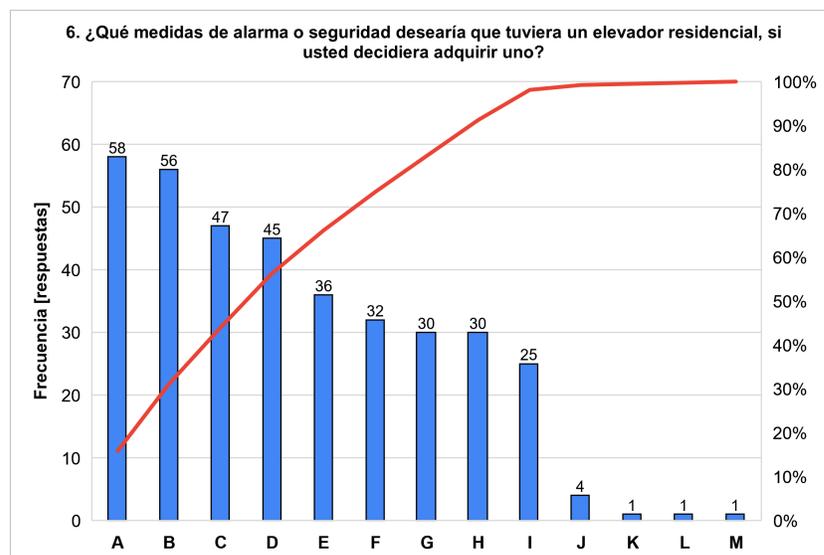
Donde (ver Figura 15):

- A: Pisos antideslizantes.
- B: Iluminación más cálida.
- C: Mayor intensidad de la iluminación.
- D: Paredes con rejillas de ventilación más grandes.
- E: Implementar iluminación a la entrada del elevador.
- F: Paredes completamente transparentes.
- G: Paredes con ventanas.
- H: Paredes metálicas sólidas.
- I: Iluminación más fría.

- J:** Menor intensidad de la iluminación.
- K:** Piso cerámico.
- L:** Sin respuesta.
- M:** Piso metálico.
- N:** Paredes con rejillas de ventilación más pequeñas.
- Ñ:** Me es indiferente.
- O:** Paredes con espejos.
- P:** Piso alfombrado.

Las respuestas A a G de la Figura 15 responden al 80 % de las respuestas ante necesidades relacionadas con pisos, superficies e iluminación en elevadores residenciales. Los niveles de iluminación solicitados coinciden con los lineamientos generales de accesibilidad y datos históricos, donde mayores niveles de iluminación ayudan a reducir el riesgo de caídas. Se promueve la seguridad sobre la estética en los pisos, con 58 respuestas a favor de pisos antideslizantes y únicamente 9 indicando pisos alfombrados, cerámicos o metálicos. La visibilidad desde y hacia el interior del carro vuelve a mencionarse.

Figura 16: Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Qué medidas de alarma o seguridad desearía que tuviera un elevador residencial, si usted decidiera adquirir uno?

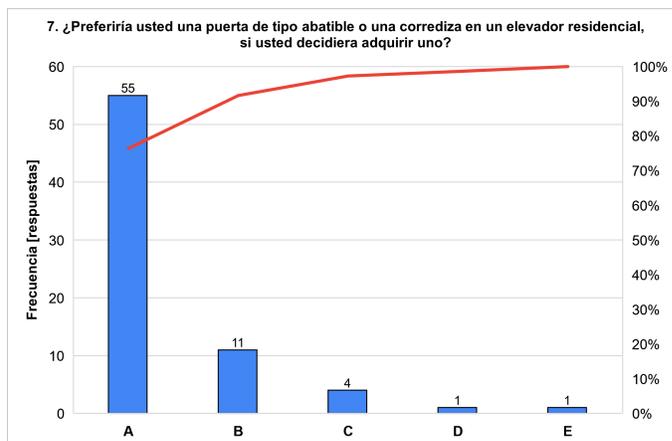


Fuente: Elaboración propia.

Donde (ver Figura 16):

- A:** Botón de alarma de emergencia.
- B:** Frenos de emergencia.
- C:** Alarmas auditivas y visuales.
- D:** Alarma de sobrecarga.
- E:** Prevención de movimiento con puertas abiertas.
- F:** Iluminación con energía de respaldo.
- G:** Accionado desde el exterior.
- H:** Descenso manual del elevador.
- I:** Visibilidad al exterior del carro del elevador.
- J:** Sin respuesta.
- K:** Alarma de mal cierre de puerta.
- L:** Botón de emergencia y dispositivo para hacer llamadas.
- M:** Intercomunicador.

Figura 17: Frecuencia de respuestas (múltiples) a: ¿Preferiría usted una puerta de tipo abatible o una corrediza en un elevador residencial, si usted decidiera adquirir uno?



Donde:

A: Puerta corrediza. **B:** Puerta abatible. **C:** Sin respuesta. **D:** Automática. **E:** Dependería del espacio donde estuviera.

Fuente: Elaboración propia.

Referente a las medidas de alarma y seguridad deseadas en un elevador residencial (Figura 16), se observa una necesidad general por medidas de seguridad y redundancias ante

emergencias, pérdida de tracción, prevención de movimiento ante mal funcionamiento y alerta contra sobrecarga. Esto destaca al contrastarse contra las adaptaciones de cabrestantes industriales y elevadores de carga en el contexto nacional. También resalta que un intercomunicador o dispositivo de llamadas no sean los mayores requerimientos, puesto que tales podrían elevar significativamente el costo y complejidad del dispositivo, de implementarse.

En elevadores residenciales o de escala pequeña, pueden encontrarse tanto puertas corredizas como abatibles manuales. En unidades de mayor gama, pueden incluso incluir accionamiento automático. Las respuestas a la pregunta sobre qué tipo de puerta se preferiría se presentan en la Figura 17, donde el 76.4% de las personas prefirieron una corrediza. La elección de este tipo de puerta garantizaría facilidad de apertura, cierre y movilidad por no requerir espacio adicional dentro del cubo o en el pasillo del nivel.

Adicional a las preguntas de selección múltiple, se incluyeron dos de respuesta abierta. El objetivo de estas fue adquirir información adicional. Debido al alto volumen de respuestas, se utilizó un análisis cualitativo mediante su resumen en gráficos de tormenta de palabras. Tanto para las respuestas con respecto a las características consideradas positivas (Figura 18), como las negativas (Figura 19), se filtraron las conjunciones y se limitó la aparición de palabras según un mínimo de frecuencia de dos.

Figura 18: Tormenta de palabras de respuestas a: ¿Qué características considera positivas de los elevadores que usted ha utilizado?



Conjunciones filtradas. Límite mínimo de frecuencia: 2 veces.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 18 vuelve a destacar la importancia del tamaño del elevador, considerando el espacio que ocupe en la residencia. Además, destaca la importancia de las barandas/elementos de apoyo en el cubo. Destaca la importancia de los acabados interiores, incluyendo la accesibilidad de los botones, señalización y visibilidad. Adicional a la información previamente recopilada, se introduce la relevancia del bajo consumo de potencia y el balance costo-beneficio de la unidad.

6.3. Definición de requisitos

Cuadro 10: Guía de codificación de requisitos.

Módulo	
GEN	General
CAR	Carro
STR	Estructura
NIV	Nivel
AUX	Equipos auxiliares
POT	Equipos de potencia
HID	Sistema hidráulico
TRA	Sistema de tracción
GUI	Rieles guía
Tipo	
ACC	Accesibilidad
CMP	Cumplimiento de norma («compliance»)
MEC	Dimensionamiento mecánico
ELE	Dimensionamiento Eléctrico
MTO	Mantenimiento
ENS	Ensamblaje
HOL	Holgura

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 11: Definición de requisitos.

Código	Descripción
AUX-CMP-001	Ambos extremos de los elementos de suspensión deben ser sujetos de manera tal, que las partes sean fácilmente visibles, con excepción de las partes dentro de las protecciones contra descarrilamiento del cable.
AUX-CMP-002	La carrera mínima de los resortes de seguridad debe ser de 63 mm para elevadores de velocidad nominal entre 0.51 m/s y 0.75 m/s.
AUX-CMP-003	Cuando el carro esté descansado sobre el sistema de amortiguamiento comprimido, ningún elemento puede entrar en contacto con los elementos del foso.
AUX-MEC-001	El sistema debe tener sistemas mecánicos redundantes en las partes críticas del sistema de tracción, amortiguamiento y frenado.
CAR-ACC-001	Las puertas deben encontrarse en la sección más angosta del carro.
CAR-ACC-002	El carro debe medir como mínimo 1.07 m (42 in) de ancho y 1.37 m (54 in) de largo.
CAR-ACC-003	Las puertas deben tener una vía de entrada mínima de 0.81 m (32 in) de ancho.
CAR-ACC-004	El piso de la cabina debe ser antideslizante.
CAR-ACC-005	Debe contemplarse un espacio de 1.20 m de profundidad para una silla de ruedas más 0.50 m de profundidad para una persona de pie en el interior del carro (1.70 m en total).

Cuadro 11: Definición de requisitos.

Código	Descripción
CAR-CMP-001	El bloqueo de la cabina por el cierre de sus puertas debe comprender un dispositivo eléctrico de seguridad.
CAR-CMP-002	El piso de la cabina debe consistir de una superficie no perforada, que se extienda a lo largo de todo el interior del carro; y soportada por el marco del carro.
CAR-HOL-001	La holgura entre el carro y el nivel debe ser de máximo 32 mm (1 1/4 in).
CAR-HOL-002	El carro debe contar con un pasamanos de máximo 40 mm de diámetro alrededor de la cabina, a 900 mm de altura desde el piso y separado 50 mm de la pared.
CAR-MEC-001	Los marcos de los carros deben ser guiados en cada riel guía por medio de miembros guía superiores e inferiores.
CAR-MEC-002	El marco del carro y los elementos exteriores de la plataforma deben ser de acero u otro metal.
GEN-ACC-001	Los indicadores auditivos deben ir acompañados de indicadores visuales, sin posibilidad de ser desactivados.
GEN-ACC-002	Las rampas deben tener una relación altura/longitud de máximo 8 %.
GEN-CMP-001	Todo esfuerzo debe considerar un factor de seguridad al esfuerzo último de al menos 5.
GEN-ENS-001	El elevador debe ser modular: los módulos preensamblados deben poder ser unidos en el sitio de instalación.
GEN-ENS-002	Los módulos del elevador deberán poder ser transportados en un camión ligero de 3.5 toneladas, con volumen de carga de 4.00 m x 1.90 m x 1.90 m.
GEN-HOL-001	El espacio de refugio en el foso debe ser no mayor a 600 mm x 1,200 mm horizontales, por 600 mm de altura.
GEN-MEC-001	El elevador debe poder soportar las cargas de operación sin depender estructuralmente de la edificación.
GEN-MEC-002	El elevador debe ser capaz de transportar a dos personas; una de ellas en silla de ruedas, bastón, andador o con perro guía.
GEN-MEC-003	El elevador debe ser capaz de elevar una carga de hasta 250 kg.
GEN-MEC-004	El elevador debe poder cubrir hasta 2 niveles de altura 3.00 m de altura.
GEN-MEC-005	El sistema debe ser diseñado con materiales accesibles en Guatemala.
GEN-MEC-006	Todo elemento que limite el movimiento del carro debe tener un factor de seguridad mínimo de 5.
GEN-MEC-007	La estructura y los rieles guía deben soportar las cargas de diseño e instalación.
GEN-MEC-008	Pernos y tuercas montadas en biseles mayores a 5° de elementos estructurales deben asentarse sobre roldanas cónicas.
GUI-CMP-001	Los extremos de los rieles deben ser unidos por pernos y placas tipo <i>fish-plate</i> con no menos de cuatro pernos.
GUI-MEC-001	Los miembros guía deben soportar las cargas nominales de operación, cargas de emergencia, fuerzas durante carga y descarga; y la aplicación de cargas de los sistemas de seguridad.
HID-CMP-001	La válvula de alivio debe ser sellada luego de ajustarse su presión de trabajo.

Cuadro 11: Definición de requisitos.

Código	Descripción
POT-ACC-001	La velocidad de subida y bajada del carro debe ser menor o igual a 0.75 m/s.
POT-ELE-001	El voltaje de alimentación del elevador debe ser de máximo 220 V.
STR-HOL-001	La holgura entre la superficie inferior del foso y el carro no debe ser mayor de 600 mm.
STR-HOL-002	La holgura entre la superficie superior máxima de la estructura y el carro no debe ser menor de 1100 mm.
STR-HOL-003	Todo equipo montado sobre la superficie superior del carro debe guardar una holgura no mayor a 600 mm.
STR-HOL-004	La holgura entre el carro y la estructura no debe ser menor de 20 mm, exceptuando los costados de carga y descarga.
STR-MEC-001	El elevador debe poder resistir cargas sísmicas estándar para una región como Guatemala, validada con base en una simulación dinámica y datos históricos de cargas sísmicas.
TRA-CMP-001	Las poleas en partes que viajen deben estar unidas con sujeción con un factor de seguridad de al menos 4.
TRA-MEC-001	El factor de seguridad mínimo de los miembros del sistema de tracción es de 8.25 para velocidades de carro nominales de 0.75 m/s.
TRA-MEC-002	El diámetro mínimo del cable de tracción debe ser de 4.0 mm.
TRA-MEC-003	Los diámetros de tambor de las poleas de tracción no deben ser menores a 40 veces el diámetro del cable de acero.

6.4. Diseño preliminar

El diseño se basó en una configuración de tracción hidráulica indirecta y rieles laterales. La tracción indirecta provee la ventaja de seguridad del sistema hidráulico, reduce el costo al permitir utilizar un cilindro de largo menor a la carrera total del elevador, de dimensiones comúnmente disponibles. Los rieles guía laterales reducen la cantidad de elementos de acero inoxidable rectificadas, además de proveer un ensamble compacto y facilitar la implementación de un solo cilindro hidráulico.

Los criterios básicos de diseño fueron:

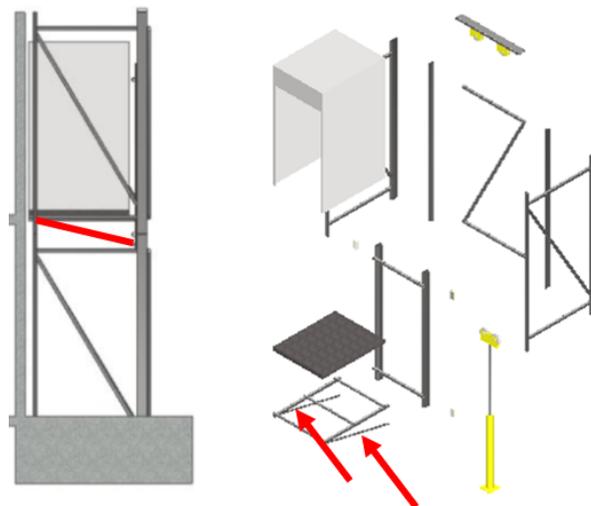
- Diseño modular: para ser preensamblado previo al envío y completado en el sitio de instalación.
- Diseño compacto: para poder ser instalado en residencias con el menor impacto en la distribución de espacios posible.
- Diseño estructuralmente independiente del inmueble: para no inducir cargas no consideradas previamente en el dimensionamiento del hogar de instalación.
- Diseño con consideraciones de accesibilidad: las dimensiones del carro sobrepasan las sugeridas por normas, a favor de las dimensiones de accesibilidad para personas en sillas

de ruedas, que requieran el uso de bastones o andadores; o que sean acompañadas de un perro guía.

A continuación se enlistan las modificaciones a partir del diseño preliminar:

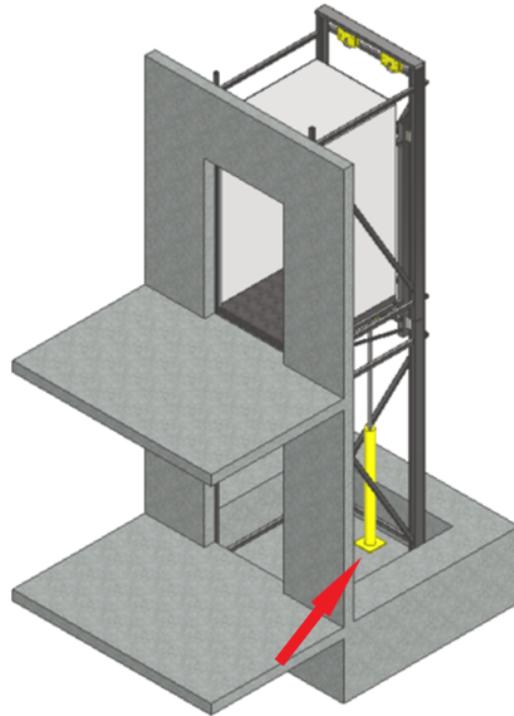
- En un principio se planificó un cilindro actuando a compresión. Se modificó para que actuara a tracción y, así, reducir riesgos de desalineamiento y pandeo.
- En su momento, se ideó el ensamble con perfiles W. Mediante cálculos se demostró que no sería necesaria su rigidez, por lo que se reemplazaron por tubos rectangulares para reducir costo.
- Inicialmente se planteó una configuración de soporte inferior a compresión para el piso del carro, a modo de flexibilizar la ubicación de las puertas a tres potenciales caras del cubo (ver Figura 20). El ensamble reveló problemas de interferencia con el fondo del pozo, además de amplificar significativamente las cargas de reacción sobre los rieles, por lo que se cambió el elemento de soporte del piso a una posición a tensión.
- El anclaje del cilindro de elevación se modificó durante las iteraciones de diseño. En un inicio, se propuso un anclaje directo a la fundación del pozo. Esto involucraría un proceso de preparación a la instalación más complejo, además de involucrar riesgo de falla de las uniones por rajaduras en el concreto (ver Figura 21). Se añadió un elemento horizontal a la estructura, a modo de transmitir la carga del cilindro directamente hacia las columnas principales.

Figura 20: Concepción inicial del soporte del carro, con elemento actuando a compresión.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 21: Concepción inicial del anclaje del cilindro, con dependencia directa de la loza del pozo.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

6.5. Cálculos y diseño

Criterios de diseño y supuestos generales:

- Para el dimensionamiento del marco del carro y la estructura, se utilizaron las siguientes condiciones (ver Cuadro 12):

Cuadro 12: Valores iniciales para dimensionamiento estructural del marco y estructura.

Magnitud	Variable	Valor
Densidad de losa de concreto	ρ [kg/m^3]	2,400
Gravedad	g_t [m/s^2]	9.81
Espesor de piso del carro	e_p [m]	0.050
Espesor de carro	x [m]	1.300
Ancho de carro	b [m]	1.700
Altura soporte piso de carro	a [m]	2.000
Altura entre soportes de carro	L_{ab} [m]	2.600
Altura entre refuerzos horizontales de estructura	g [m]	0.250
Distancia entre columna principal y auxiliar de estructura	w [m]	1.900
Distancia entre marcos de estructura	t [m]	1.600
Masa nominal	m_{nom} [kg]	250
Carga nominal	F_{nom} [N]	2,453
Carga de diseño	F_{dis} [N]	4,905
Carga distribuida por piso	P_d [N]	2,602
Factor de seguridad a la fluencia	f_{s_y} [-]	5
Factor de seguridad al esfuerzo último	$f_{s_{ut}}$ [-]	5

Fuente: Elaboración propia.

- Para los casos de esfuerzo cortante, se utilizó la Teoría de Energía de Distorsión para relacionar la resistencia a la cortante a partir del esfuerzo a la fluencia por tracción. De esta manera, se tiene que: $\tau_y = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_y$ y, con esto, las magnitudes de resistencia mostradas en el Cuadro 13:

Cuadro 13: Resistencia a la fluencia para aceros de diseño.

Magnitud	Variable	Acero	Acero
		1018 CD	Inox 304L
Resistencia a la fluencia	σ_y [MPa]	370	210
Esfuerzo normal admisible	σ_{adm} [MPa]	74	42
Esfuerzo cortante admisible	τ_{adm} [MPa]	42.7	24.2
Módulo de Young para el acero	E ; [GPa]	200	200
Factor de pandeo (articulado-articulado)	k_{pandeo} ; [-]		1

(MatWeb, s.f.-a), (MatWeb, s.f.-b)

Fuente: Elaboración propia.

- Para la selección de perfiles, se describirán en sus dimensionales originales inglesas (*in*), por su mayor disponibilidad en Guatemala.
- Para estandarizar el diseño, todos los perfiles con un requerimiento de resistencia menor al tubo cuadrado de acero 1018 CD de $2\text{ in} \times 2\text{ in} \times \text{chapa } 11$, se reemplazarán por éste.
- Para el cálculo del marco del carro y secciones de la estructura, se utilizó el método estático de análisis de marcos con juntas de pasador. Si bien este representa una simplificación de la combinación de juntas soldadas y pernadas reales del diseño, significó eficiencia en su tiempo de aplicación, reducción de fuentes de error metodológico por su facilidad de uso y tiene buen alcance de predicción para el factor de seguridad elevado por utilizar:
 - Los elementos están sujetos únicamente a (ver Cuadro 14):

Cuadro 14: Ecuaciones para el cálculo de criterios de diseño, según la condición de carga.

Condición de carga	Ecuación para criterio de diseño	Variables
Flexión	$\sigma_{fl} = \frac{Mh}{I}$ o $\sigma_{fl} = \frac{M}{S}$	<i>M...momento</i> <i>h...distancia al eje</i> <i>I...momento de inercia</i> <i>S...modulo de seccion</i>
Tensión o compresión sobre el eje de centro de los elementos	$\sigma_{puro} = \frac{F}{A_t}$	<i>F...carga axial</i> <i>A_t...area transversal</i>
Pandeo (para los elementos bajo compresión)	$I_{crit,pandeo} = \frac{P(kL)^2}{\pi^2 E}$	<i>P...carga</i> <i>L...longitud.</i>
Combinación de flexión y tensión/compresión	$\sigma_{total} = \sigma_{puro} + \sigma_{fl}$ y pandeo	

- Se despreció el efecto de flexión o torsión por elementos unidos excéntricamente con respecto al eje de centro de la unión.
- Toda unión entre elementos se simplificó a juntas simples de pasador, donde el momento en la junta es cero.
- Se simplificaron los análisis a casos 2D, descomponiendo los escenarios tridimensionales en condiciones bidimensionales críticas.

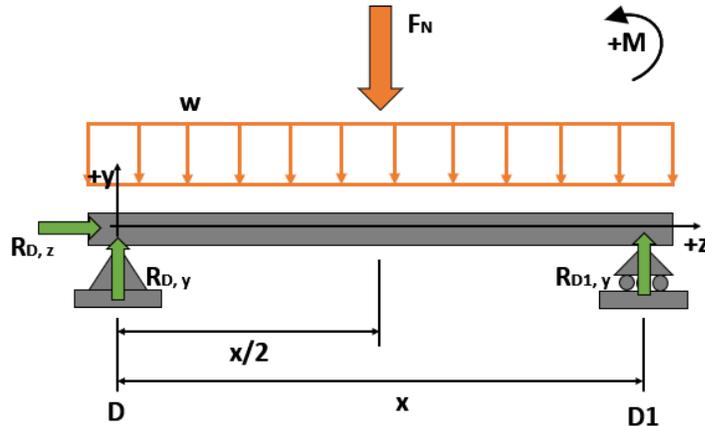
6.5.1. Marco del carro

Vigas secundarias de piso

Iniciando por la carga ejercida por la losa sobre las vigas secundarias, se tiene que:

Asumiendo $N = 3$ vigas secundarias, donde cada una carga con $\frac{1}{3}$ de la carga distribuida del piso más la capacidad de soportar la carga de diseño, se tiene una superposición de vigas a flexión por carga distribuida y carga puntual al centro (ver Figura 22).

Figura 22: DCL para vigas secundarias del carro.



Fuente: Elaboración propia.

Considerando la resistencia a la fluencia del acero 1018 CD, el factor de seguridad de diseño y una luz x , se tiene que:

$$\sigma_{crit} = \frac{Px}{4I} + \frac{wx^2h}{16I} \leq \sigma_{adm}$$

Donde:

σ_{crit} ... esfuerzo normal critico

σ_{adm} ... esfuerzo normal admisible

P ... carga puntual

w ... carga uniformemente distribuida

x ... luz entre soportes

h ... altura del perfil

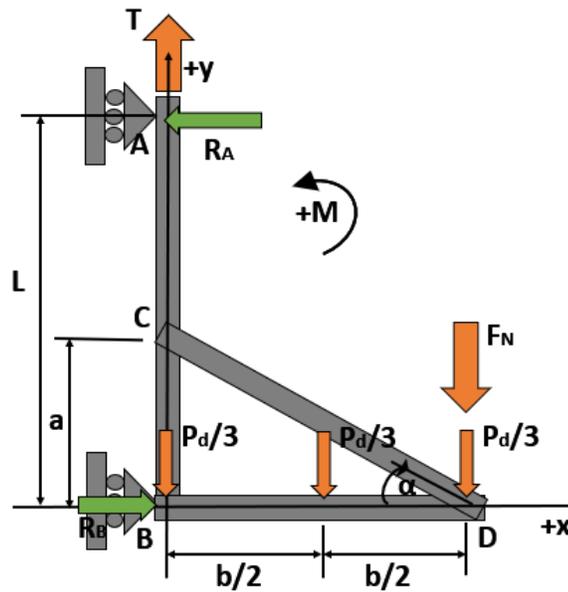
I ... inercia del perfil

Asumiendo una altura del perfil de $h = 4.00 \text{ in}$, se obtiene un módulo de sección de $S_{min} = 1.43 \text{ in}^3$. Considerando un tubo $deb = 4.00 \text{ in} \times h = 4.00 \text{ in} \times \text{chapa 11}$ se obtiene que $S_{real} = 2.31 \text{ in}^3$, por lo que se acepta el componente.

Marcos principales

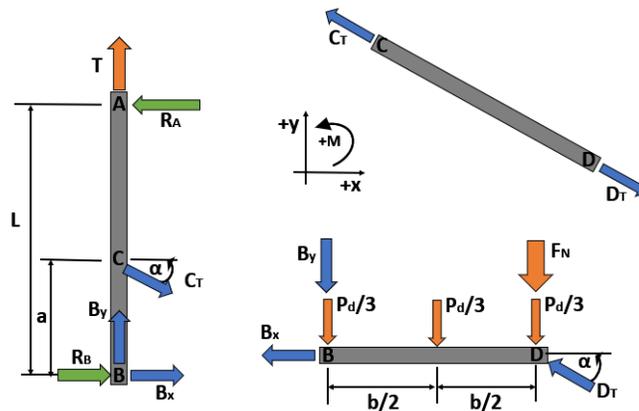
Se tomaron tres cargas puntuales de igual magnitud, correspondientes a las tres vigas secundarias soportando $1/3$ de la losa cada una, más la condición crítica donde la carga puntual de diseño está siendo aplicada en uno de los extremos del carro. Se asumen soportes de rodadura, puesto que las zapatas restringen el movimiento al eje vertical de los rieles y las holguras permitirían rotaciones ligeras. Se obtiene el DCL bajo condición crítica (Figura 23):

Figura 23: DCL para marco del carro bajo condición crítica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Descomposición de elementos del marco.



Fuente: Elaboración propia.

Descomponiendo los elementos del marco en sus DCL independientes, se llega a la Figura 24. De los DCLs se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio (donde $\tan(\alpha) = a/b$):

DCL_{marco} :

$$\sum F_x = 0 = -R_a + R_b$$

$$\sum F_y = 0 = T - P_d - F_n$$

$$\sum M_B = 0 = -R_a L + 1/2 P_d b + F_n b$$

DCL_{ACB} :

$$\sum F_x = 0 = B_x + R_b - R_a + C_t \cos(\alpha)$$

$$\sum F_y = 0 = T + B_y - C_t \sin(\alpha)$$

$$\sum M_B = 0 = R_a L - C_t \cos(\alpha) a$$

DCL_{BD} :

$$\sum F_x = 0 = -B_x - D_t \cos(\alpha)$$

$$\sum F_y = 0 = D_t \sin(\alpha) - B_y - F_n - P_d$$

$$\sum M_B = 0 = [D_t \cos(\alpha) - 1/3 P_d - F_n] - 1/3 P_d b/2$$

DCL_{CD} :

$$\sum F_t = 0 = D_t - C_t$$

La solución del sistema de ecuaciones resulta en (ver Cuadro 15):

Cuadro 15: Cargas resultantes en el marco principal del carro.

Carga	Magnitud [N]
R_A	4,058
R_B	4,058
T	7,507
C_t	8,145
B_x	- 5,275
B_y	- 1,301
D_t	8,145

Donde: (+) tensión, (-) compresión.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 16: Dimensionamiento para elemento ACB, sujeto a flexión y tensión.

Magnitud	Variable	Valor
Momento máximo	$M [Nm]$	2,434.59
Módulo de sección	$S_{real} [in^3]$	2.54
Área transversal	$A_{t,real} [in^2]$	1.80
Esfuerzo aplicado	$\sigma_{real} [MPa]$	70.3
Diferencia en esfuerzo	$\sigma_{dis} - \sigma_{real} [MPa]$	3.7

Donde: tubo rectangular de acero 1018 CD de $5 in \times 3; in \times chapa 11$
 Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 17: Dimensionamiento para elemento BD, sujeto a compresión, flexión y pandeo.

Magnitud	Variable	Valor
Momento máximo	$M [Nm]$	369
Base	$b [in]$	2.00
Altura	$h [in]$	2.00
Espesor	$t [mm]$	3.00
Módulo de sección	$S_{real} [in^3]$	0.53
Inercia crítica por pandeo	$I_{crit,pandeo} [in^4]$	0.0257
Área transversal real	$A_{t,real} [in^2]$	0.89
Inercia real	$I_{real} [in^4]$	0.53
Esfuerzo aplicado	$\sigma_{real} [MPa]$	33.5
Diferencia en esfuerzo	$\sigma_{dis} - \sigma_{real} [MPa]$	40.5

Donde: tubo rectangular de acero 1018 CD de $2 in \times 2; in \times chapa 11$
 Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 18: Dimensionamiento para elemento CD, sujeto a tensión.

Magnitud	Variable	Valor
Área transversal mínima	$A_{t,min} [in^2]$	0.17
Base	$b [in]$	2.00
Altura	$h [in]$	2.00
Espesor	$t [mm]$	3.00
Área transversal real	$A_{t,real} [in^2]$	0.89

Donde: tubo rectangular de acero 1018 CD de $2 in \times 2; in \times chapa 11$
 Fuente: Elaboración propia.

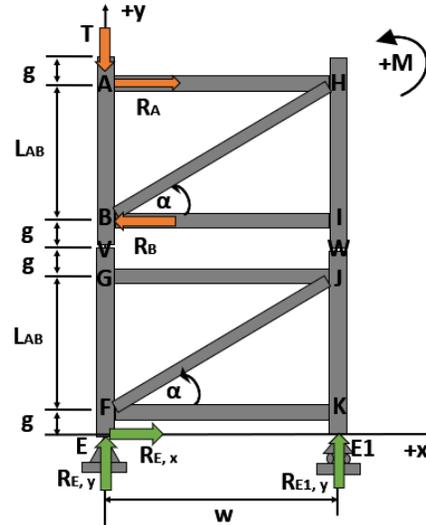
6.5.2. Estructura

Para los marcos XY y ZY de la estructura, se identificaron los elementos críticos y se evaluó su requerimiento de resistencia. Para los demás, se seleccionó el perfil mediante análisis comparativo a los elementos críticos.

Marco XY

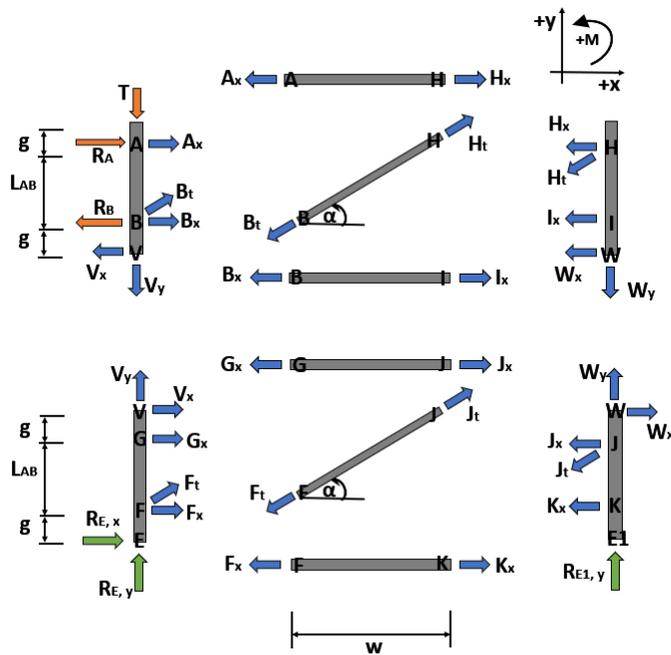
Asumiendo el caso en el que el carro apoye toda su carga en uno de los marcos laterales XY, se tiene el siguiente DCL (ver Figura 25):

Figura 25: DCL para el marco XY de la estructura.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Descomposición de elementos del marco XY de la estructura.



Fuente: Elaboración propia.

Descomponiendo los elementos del marco en sus DCL independientes, se llega a la Figura 26. De los DCLs se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio (donde $\tan(\alpha) = L_{AB}/w$):

DCL_{marco} :

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 &= R_a - R_b + R_{ex} + R_{e1x} \\ \sum F_y = 0 &= R_{ey} + R_{e1y} - T \\ \sum M_A = 0 &= -LR_b + (2L + 3g)(R_{ex} + R_{e1x}) + wR_{e1y}\end{aligned}$$

DCL_{ABV} :

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 &= A_x + B_x + B_t \cos(\alpha) - V_x + R_a - R_b \\ \sum F_y = 0 &= B_t \sin(\alpha) - V_y - T \\ \sum M_V = 0 &= g(R_b - B_x - B_t \cos(\alpha)) + (g + L)(-R_a - A_x)\end{aligned}$$

DCL_{VGFE} :

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 &= V_x + G_x + F_x + F_t \cos(\alpha) + R_{ex} \\ \sum F_y = 0 &= V_y + F_t \sin(\alpha) + R_{ey} \\ \sum M_B = 0 &= g(-F_x - F_t \cos(\alpha)) + (g + L)(-G_x) + (2g + L)(-V_x)\end{aligned}$$

DCL_{HIW} :

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 &= -H_x - H_t \cos(\alpha) - I_x - W_x \\ \sum F_y = 0 &= -H_t \sin(\alpha) - W_y \\ \sum M_W = 0 &= gI_x + (g + L)(H_x + H_t \cos(\alpha))\end{aligned}$$

DCL_{WJKE₁} :

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 &= W_x - J_x - J_t \cos(\alpha) - K_x \\ \sum F_y = 0 &= W_y - J_t \sin(\alpha) + K_{e1y} \\ \sum M_{E1} = 0 &= gK_x + (g + L)(J_x + J_t \cos(\alpha)) + (2g + L)(-W_x)\end{aligned}$$

DCL_{uniones} :

$$\begin{aligned}A_x &= H_x, \\ B_t &= H_t, \\ B_x &= I_x, \\ G_x &= J_x, \\ F_t &= J_t, \\ F_x &= K_x\end{aligned}$$

El sistema de ecuaciones se resuelve a:

Cuadro 19: Cargas resultantes en el marco XY de la estructura.

Carga	Valor [N]
T	7,507
R_A	4,058
R_B	4,058
R_{E1x}	0
R_{Ex}	0
R_{Ey}	1,954
R_{E1y}	5,553
A_x	0
B_x	-46,257
B_t	6,877
G_x	46,257
F_x	-4,058
F_t	0
H_x	0
H_t	6,877
I_x	-46,257
J_x	46,257
J_t	0
K_x	-4,058
V_x	-42,199
V_y	-1,954
W_x	42,199
W_y	-5,553

Donde: (+) tensión, (-) compresión.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 20: Dimensionamiento para elemento ABV, sujeto a flexión, compresión y pandeo.

Magnitud	Variable	Valor
Momento máximo	M [Nm]	3,062.00
Inercia crítica al pandeo	$I_{crit,pandeo}$ [in^4]	0.13
Inercia real	I_{real} [in^4]	13.49
Módulo de sección real	S_{real} [in^3]	4.50
Área transversal real	A_{treal} [in^2]	2.29
Esfuerzo aplicado	σ_{real} [MPa]	46.6
Diferencia en esfuerzo	$\sigma_{dis} - \sigma_{real}$ [MPa]	27.4

Donde: tubo rectangular de acero 1018 CD de 6 $in \times 4; in \times chapa$ 10

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 21: Dimensionamiento para elemento BI, sujeto a compresión y pandeo.

Magnitud	Variable	Valor
Inercia crítica al pandeo	$I_{crit, \text{pandeo}}$	0.20
Área transversal mínima	$A_{t \text{ min}}$	0.97
Base	b	2.00
Altura	h	2.00
Espesor	t	3.00
Inercia real	I_{real}	0.53
Área transversal real	$A_{t \text{ real}}$	0.89

Donde: tubo rectangular de acero 1018 CD de $2 \text{ in} \times 2 \text{ in} \times \text{chapa } 11$.

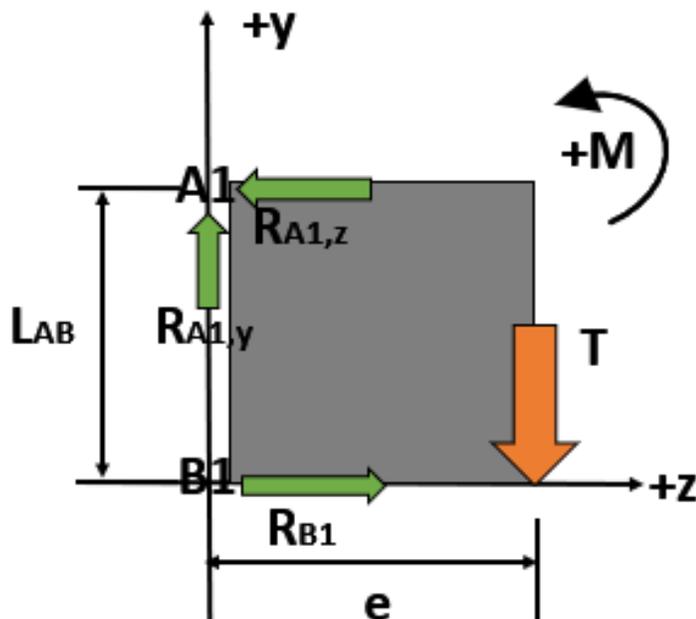
Notar que el elemento está subdimensionado, pero se acepta por el factor de seguridad superior a 5 y el caso extremo de carga supuesto.

Fuente: Elaboración propia.

Marco ZY

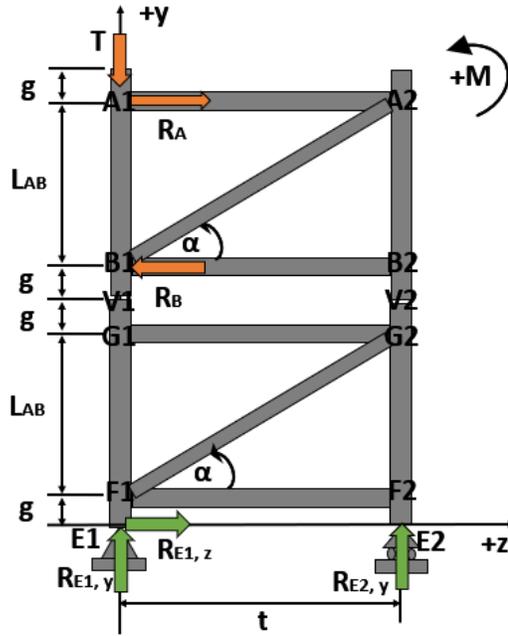
Asumiendo el caso en el que el carro frene sobre uno de los rieles laterales, causando que aplique carga de separación entre ambos marcos laterales XY (ver Figura 27), se tiene el DCL para el marco medular ZY (ver Figura 28):

Figura 27: Condición de carga en carro para análisis del marco ZY.



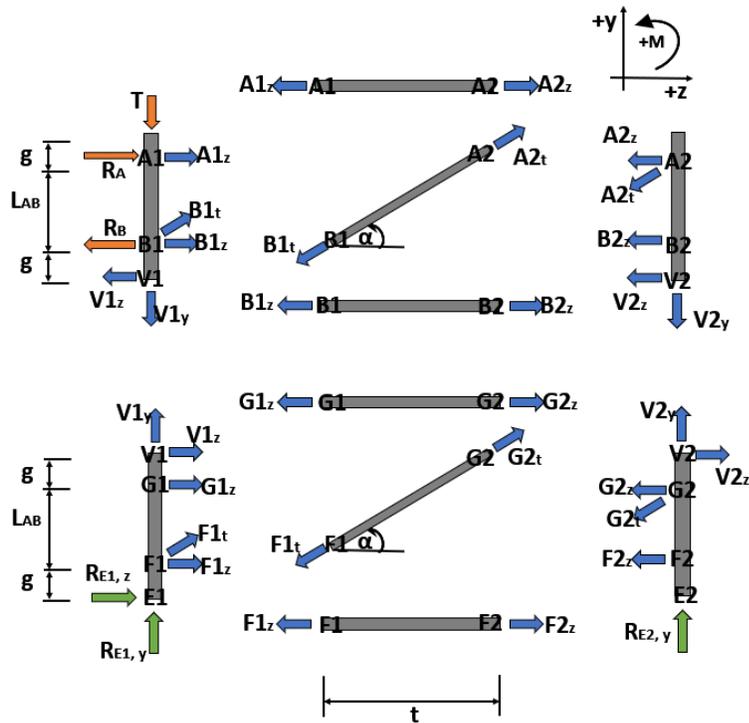
Fuente: Elaboración propia.

Figura 28: DCL para el marco ZY de la estructura.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29: Descomposición de elementos del marco ZY de la estructura.



Fuente: Elaboración propia.

Descomponiendo los elementos del marco en sus DCL independientes, se llega a la Figura 29. De los DCLs se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio (donde $\tan(\alpha) = L_{AB}/t$:

DCL_{carro} :

$$\begin{aligned}\sum F_z = 0 &= -R_{b1z} + R_{b1z1} \\ \sum F_y = 0 &= R_{a1y} - T \\ \sum M_A = 0 &= e(-T) + LR_{b1z}\end{aligned}$$

DCL_{marco} :

$$\begin{aligned}\sum F_z = 0 &= R_{e1z} + R_{e2z} + R_{az} - R_{bz} \\ \sum F_y = 0 &= -T + R_{e1y} + R_{e2y} \\ \sum M_{V1} = 0 &= tR_{e2y} + R_{bz} (L + 3g) - R_{az} (2L + 3g)\end{aligned}$$

$DCL_{A_1B_1V_1}$:

$$\begin{aligned}\sum F_z = 0 &= -V_{1z} + B_{1z} - R_{bz} - R_{az} + A_{1z} + B_1t \cos(\alpha) \\ \sum F_y = 0 &= -T - V_{1y} + B_2t \sin(\alpha) \\ \sum M_{E1} = 0 &= g(R_{bz} - R_{1z} - B_t \cos(\alpha)) + (g + L)(-R_{az} - A_{1z})\end{aligned}$$

$DCL_{V_1G_1F_1E_1}$:

$$\begin{aligned}\sum F_z = 0 &= V_{1z} + G_{1z} + F_{1z} + R_{e1z} + F_1t \cos(\alpha) \\ \sum F_y = 0 &= R_{e1y} + V_{1y} + F_1t \sin(\alpha) \\ \sum M_{E1} = 0 &= g(-F_{1z} - F_t \cos(\alpha)) + (g + L)(-G_{1z}) + (2g + L)(-V_{1z})\end{aligned}$$

$DCL_{A_2B_2V_2}$:

$$\begin{aligned}\sum F_z = 0 &= -A_{2z} - B_{2z} - V_{2z} - A_t \cos(\alpha) \\ \sum F_y = 0 &= -V_{2y} - A_t \sin(\alpha) \\ \sum M_{V2} = 0 &= gB_{2z} + (g + L)(A_{2z} + A_t \cos(\alpha))\end{aligned}$$

$DCL_{V_2G_2F_2E_2}$:

$$\begin{aligned}\sum F_z = 0 &= R_{e2z} - F_{2z} - G_{2z} + V_{2z} - G_t \cos(\alpha) \\ \sum F_y = 0 &= R_{e2y} + V_{2y} - G_t \sin(\alpha) \\ \sum M_{E2} = 0 &= gF_{2z} + (g + L)(G_{2z} + G_t \cos(\alpha)) + (2g + L)(-V_{2z})\end{aligned}$$

$DCL_{uniones}$:

$$A_{1z} = A_{2z},$$

$$B_{1z} = B_{2z},$$

$$G_{1z} = G_{2z},$$

$$F_{1z} = F_{2z},$$

$$A_{2t} = B_{1t},$$

$$F_{1t} = G_{2t}$$

Cuadro 22: Cargas en elementos del marco ZY.

Carga	Valor [N]
R_{A1z}	3,753
R_{A1y}	7,507
R_{B1z}	3,753
R_{E1y}	1,407
R_{E1z}	0
R_{E2y}	6,099
R_{E2z}	0
A_{1z}	0
B_{1z}	-42,788
V_{1y}	-1,407
V_{1z}	-39,034
G_{1z}	42,788
F_{1z}	-3,753
A_{2z}	0
B_{2z}	-42,788
V_{2y}	-6,099
V_{2z}	39,034
G_{2z}	42,788
F_{2z}	-3,753
B_{1t}	7,161
A_{2t}	7,161
F_{1t}	0
G_{2t}	0

Las cargas en los elementos diagonales y horizontales son de magnitud similar a los del marco XY. Para verificar que la inercia de los perfiles horizontales, de tubo rectangular de acero 1018 CD de $6 \text{ in} \times 4; \text{in} \times \text{chapa } 10$, es suficiente en su eje secundario, se estudió su condición de carga crítica (ver Cuadro 23):

Cuadro 23: Dimensionamiento de elemento crítico ABV, sujeto a compresión, flexión y pandeo.

Magnitud	Variable	Valor
Momento crítico	M [Nm]	4,032.00
Inercia crítica al pandeo	$I_{crit,pandeo}$ [in^4]	0.13
Inercia real	I_{real} [in^4]	7.20
Módulo de sección real	S_{real} [in^3]	3.60
Área transversal real	$A_{t,real}$ [in^2]	2.57
Esfuerzo aplicado	σ_{real} [MPa]	72.9
Diferencia en esfuerzo	$\sigma_{dis} - \sigma_{real}$ [MPa]	1.13

Donde: tubo rectangular de acero 1018 CD de $6\text{ in} \times 4\text{ in} \times \text{chapa } 10$.

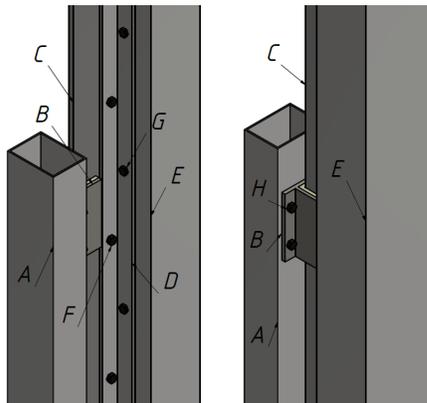
Fuente: Elaboración propia.

Riel guía

El riel guía estará expuesto a contacto y desgaste continuo, por lo que se utilizará acero inoxidable 304 grado L (por su mayor resistencia a la corrosión, gracias al menor contenido de carbono que el 304). Si bien el riel se sujeta a la estructura en todo el largo del tubo vertical, el área de contacto con el patín constará de $h = 150\text{ mm}$.

En esta región se concentran las cargas de reacción R_A y R_B , que ejercerán flexión sobre la platina (ver Figura 30). Para los cálculos, se desprecia la resistencia del material polimérico del patín, asumiendo que la carga se transmite directamente al soporte de acero 1018 CD. Se dimensionará considerando ambos rieles guía laterales (izquierdo y derecho).

Figura 30: Junta riel-patín, con uniones al carro y estructura.



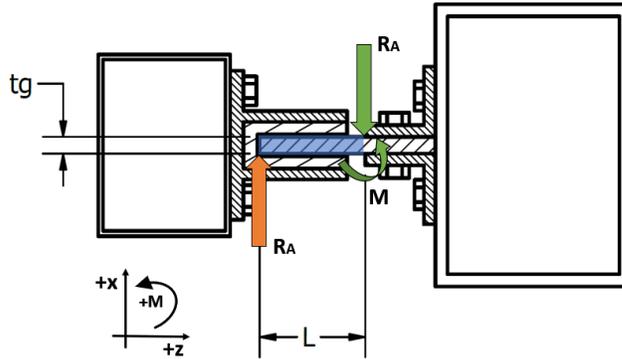
Donde: [A]: marco del carro, [B]: patín, [C]: riel guía, [D]: sujeción de riel guía, [E]: estructura, [F, G, H]: uniones pernadas.

Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

Asumiendo que las cargas de reacción R_A y R_B se aplican al extremo de cada uno de los dos rieles guía C (ver Figura 31), con el brazo de palanca $L = 1.50\text{ in}$ se obtiene un momento máximo de 77 Nm .

Figura 31: DCL de riel guía ante carga de reacción R_A o R_B del carro.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 24: Dimensionamiento de riel guía y patín.

Magnitud	Variable	Riel Guía	Patín
Base	h	5.91	5.91
Altura	tg	0.38	0.50
Módulo de sección	S real	0.14	0.25
Esfuerzo aplicado	sigma real	34.1	19.2
Diferencia en esfuerzo	sigma dis - sigma real	7.9	54.8

Donde:

Riel guía de acero inoxidable 304L de espesor $t_g = 3/8 \text{ in}$ y voladizo de $L = 1.5 \text{ in}$.

Soporte de patín de acero 1018 CD de espesor $t_g = 1/2 \text{ in}$, voladizo de $L = 1.5 \text{ in}$ y longitud $h = 150 \text{ mm}$.

Fuente: Elaboración propia.

6.5.3. Uniones pernadas

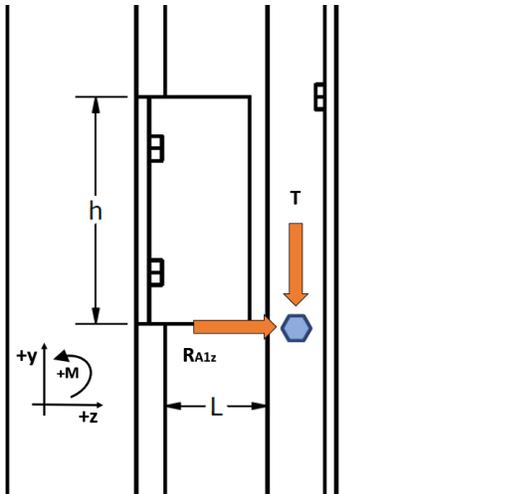
Se utilizaron pernos clase 4.6 para todos los cálculos. Se asumió una resistencia del perno de $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$. Tomando el factor de seguridad global de $f_{s_y} = 5$ y $\tau = 1/\sqrt{3}\sigma$ por teoría de Energía de Distorsión, los esfuerzos admisibles son: $\sigma_{adm} = 48 \text{ MPa}$ y $\tau_{adm} = 27.7 \text{ MPa}$.

Sujeción pernada de rieles guía

Los pernos que sujetan el riel guía de acero inoxidable a sus perfiles de fijación están expuestos a cortante puro (ver Figura 32). Este esfuerzo se debe a la carga horizontal R_{a1z} y la vertical T . La fuerza cortante equivalente es de $V_e = 8,393 \text{ N}$. Tomando 4 pernos a la región de carga y un área mínima de pernos $1/2 \text{ in UNC}$ de $A_{min} = 0.1257 \text{ in}^2$ o $A_{min} = 81.1 \text{ mm}^2$, se obtiene un esfuerzo cortante real de $\tau_{real} = 25.9 \text{ MPa}$, o 93.4% del

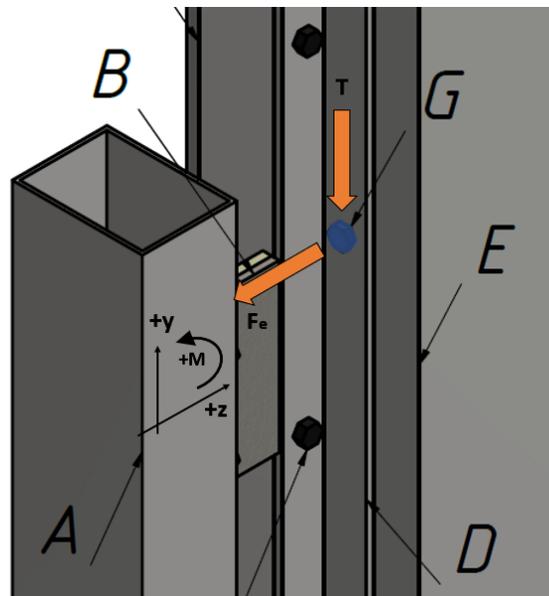
esfuerzo cortante admisible. Considerando que se trata de una unión permanente, con una $K \approx 0.20$, se deben precargar con $M_{precarga} = 44.49 \text{ Nm}$.

Figura 32: DCL para la unión pernada del riel guía.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33: DCL para la unión pernada de la sujeción del riel guía.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Los pernos de los perfiles de sujeción del riel guía están expuestos a tensión por la flexión del riel guía y a cortante por la carga del carro T (ver Figuras 31 y 32). Debido a que los pernos están ubicados al centro del perfil L de longitudes iguales, la carga de R_{a1z} se duplica

a $F_e = 8,115 \text{ N}$ (ver Figura 33). Considerando 4 pernos 1/2 in UNC con área mínima $A_{min} = 0.1257 \text{ in}^2$ o $A_{min} = 81.1 \text{ mm}^2$, se tiene un esfuerzo normal $\sigma_{real} = 25.0 \text{ MPa}$ y un esfuerzo cortante puro de $\tau_{real} = 23.1 \text{ MPa}$.

La combinación de esfuerzos biaxiales se puede analizar mediante los esfuerzos principales, tal que $\sigma_1 = 38.8 \text{ MPa}$ y $\sigma_2 = -13.8 \text{ MPa}$. Estos equivalen a un esfuerzo de Von Mises de $\sigma_{VM} = 47.2 \text{ MPa}$ o un 63.8% del esfuerzo normal admisible. Los pernos requerirán una precarga de $M_{precarga} = 44.49 \text{ Nm}$ para una unión permanente y $K \approx 0.20$.

Sujeción pernada crítica del marco del carro y estructura

La fuerza máxima del marco se da en el elemento diagonal de soporte del piso CD. Considerando 4 pernos de 1/2 in UNC con un área mínima de $A_{min} = 0.1257 \text{ in}^2$ o $A_{min} = 81.1 \text{ mm}^2$ se obtiene una carga cortante real de $\tau_{real} = 25.1 \text{ MPa}$ o 89.3% del esfuerzo cortante admisible. Esta unión requiere una precarga de $M_{precarga} = 44.49 \text{ Nm}$.

Cada módulo de la estructura podrán ensamblarse en el sitio, a modo de unir dos marcos XY mediante perfiles de unión en ZY. La fuerza máxima de estas uniones se da en el elemento diagonal de soporte B_1B_2 . Considerando platinas de unión con 8 pernos de 3/4 in UNC con un área mínima de $A_{min} = 0.3020 \text{ in}^2$ o $A_{min} = 194.8 \text{ mm}^2$ se obtiene una carga cortante real de $\tau_{real} = 27.5 \text{ MPa}$ o 98.9% del esfuerzo cortante admisible. Esta unión requiere una precarga de $M_{precarga} = 160.3 \text{ Nm}$.

6.5.4. Sistema hidráulico

Se partió de los supuestos del Cuadro 25. Estos consideran los criterios de diseño, el uso de una bomba de paletas y la restricción de potencia de una residencia a un máximo de 2 HP. Se utilizó eficiencias volumétrica e hidromecánica de 0.90, como un supuesto general. En la práctica, esto afectará únicamente a la velocidad de ascenso, puesto que la presión de trabajo es inferior a las presiones máximas admisibles del cilindro y bombas de esta potencia.

Cuadro 25: Parámetros de diseño para sistema hidráulico.

Magnitud	Variable	Riel Guía
Factor de seguridad a la fluencia	f_{sy}	5
Factor de ventaja mecánica de tracción	f_{vm}	2
Eficiencia volumétrica	η_v	0.90
Eficiencia hidromecánica	η_{hm}	0.90
Eficiencia total	η_t	0.81
Carga de diseño	$P_t [N]$	7,507
Carga al cilindro	$P_c [N]$	15,013
Velocidad de trabajo	$v_t [m/s]$	0.16
Velocidad del cilindro	$v_c [m/s]$	0.08
Desplazamiento de bomba	$D [cc/rev]$	8.0

Fuente: Elaboración propia.

■ **Cilindro:**

● *Vástago:*

Considerando la resistencia del acero 1018 CD, el factor de seguridad global de $f_{s_y} = 5$ y la carga de tracción al cilindro de P_c , se requiere un área mínima de $A_{t,min} = 2.03 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Con un vástago de 1.25 in o 31.8 mm , se obtiene un área efectiva de $A_{t,dis} = 7.92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

● *Camisa:*

Para el cálculo de la camisa, se evaluó el caso de presión por contracción del cilindro, ya que este trabajará a tensión. Tomando un diámetro de camisa disponible de 2.50 in o 63.5 mm y la carga de tracción al cilindro de P_c , el área de presión a contracción es de $A_c = 2.38 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, con lo que el cilindro exigirá $\Delta p = 63.21 \text{ bar}$ de presión de trabajo.

Por lo tanto, se selecciona un cilindro de diámetro de camisa $D_c = 2.50 \text{ in}$, diámetro del vástago $d_v = 1.25 \text{ in}$, largo de extensión de $l_{ext} = 60 \text{ in}$ y presión de trabajo de $\Delta p = 63.21 \text{ bar}$.

■ **Caudal y volumen del reservorio:**

Para conseguir la velocidad v_t , se requerirán $\dot{V}_c = A_e v_c = 1.90 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ o $11.40 \text{ L}/\text{min}$ de caudal a la contracción. Considerando el volumen del cilindro de $V_{cilindro} = 4.83 \text{ L}$, se requerirá un reservorio de $V_{reservorio} = (3 \times V_{cilindro}) \times 1.1 = 15.93 \text{ L}$.

■ **Motor eléctrico:**

Con base en los parámetros de diseño del Cuadro [25](#):

$$RPM = \frac{1,000 \dot{V}_c [L/min]}{D [cc/rev] \eta_v} = 1,583 \text{ rpm}$$

$$M = \frac{D [cc/rev] \Delta p [bar]}{63 \eta_{hm}} = 22.30 \text{ Nm}$$

$$W = \frac{\Delta p [bar] \dot{V}_c [L/min]}{600 \eta_{hm} \eta_v} = 1.99 \text{ HP}$$

Por lo tanto, se selecciona un motor monofásico de $2; \text{HP}$ y $1,800 \text{ rpm}$ nominal.

6.5.5. Sistema de tracción

Partiendo de los siguientes parámetros de diseño (ver Cuadro [26](#)):

Cuadro 26: Parámetros de diseño para sistema de tracción.

Magnitud	Variable	Magnitud
Factor de ventaja mecánica de tracción	fvm	2
Factor de seguridad general	fs	8.25
Carga de diseño	Pt	7,507
	Pt	0.77
Diámetro mínimo del cable	d min	4
Diámetro mínimo de la polea	D min	160

Fuente: Elaboración propia.

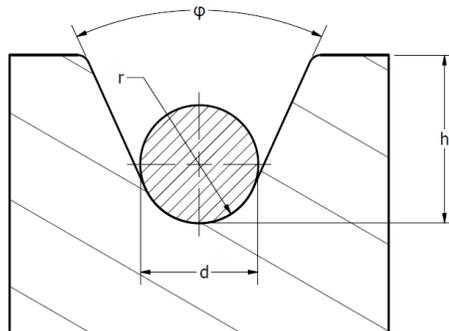
Cables

Se utilizará un cable de tipo *CB0312* 6×19 de núcleo de acero, grado $1,770 \text{ N/mm}^2$ (IPH Global, 2017), disponible en Guatemala en diámetro nominal de $5/16 \text{ in}$ (Herramientas Industriales, s.f.). Este tiene una carga mínima a la rotura de 40.3 kN , 5.4 veces superior a la carga de diseño (IPH Global, 2017). Se utilizarán dos cables independientes, por requisito y redundancia. Según el criterio de resistencia del grado de cable y el factor de seguridad de $f_{sc} = 8.25$, el cable cumple con un área efectiva mínima de $A_{e,min} = 0.19 \text{ in}^2$.

Polea

Por requisito, la polea debe ser 40 veces del diámetro del cable. Esto resultaría en una polea de $D_p = 317.5 \text{ mm}$. Sin embargo, por disponibilidad de material en Guatemala y considerando la baja velocidad del cable de $v_t = 0.16 \text{ m/s}$, se redujo el diámetro efectivo a $D_p = 276 \text{ mm}$. Para las características de la polea, se utilizaron los siguientes criterios (Unirop Ltd, 2012):

Figura 34: Geometría de polea de tracción.



Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

$$r_{ranura} = 0.535d_{cable} = 4.25 \text{ mm}$$

$$h_{ranura} = 1.5d_{cable} = 12 \text{ mm}$$

$$\phi_{apertura} = 45^\circ$$

$$D_{max} = D_p + 2h_{ranura} = 300 \text{ mm}$$

Esto resulta en una polea con velocidad angular máxima de $\omega = v_t/(\pi D_p) = 1.62 \text{ rpm}$. Considerando la baja velocidad de rotación, se asumió carga estática para el eje de las poleas. Debido al corto tamaño del eje con respecto a su diámetro, se despreció el efecto del momento a favor del dimensionamiento por cortante. Por lo tanto, se tiene que:

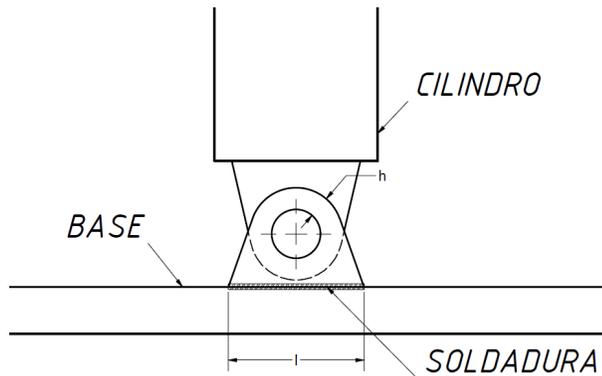
$$d_{eje,min} = \sqrt{4/\pi \frac{P_{cilindro}}{2\tau_a dm}} \approx 19.2 \text{ mm}$$

Por referencia de catálogos, estabilidad de los rodamientos, corta longitud y dimensionamiento de los elementos de sujeción de los ejes, se utilizó un diámetro al eje de $d_{eje} = 40 \text{ mm}$ y dos rodamientos de bola, ranura profunda, 6008 (DG Crane Wheel, [s.f.](#)).

Sujeción del cilindro

Utilizando $N = 2$ platinas de acero 1018 CD, con una carga neta de tracción $P_{cilindro} = 2T$ y un diámetro de agujero del acople del cilindro de $d_{acople} = 1 \text{ in}$, se dimensionó la oreja de sujeción ante compresión y corte, con anillo de ancho mínimo de:

Figura 35: Geometría de la sujeción del cilindro.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

$$h_{min,comp} = \frac{P_c}{N d_{acople} \sigma_{adm}} = 6.59 \text{ mm}$$

Utilizando $h_{real} = 3/8 \text{ in}$ por estabilidad durante la operación, transporte y ensamblaje, además de factor de seguridad incrementado, la longitud crítica al corte resulta en:

$$l_{min,corte} = \frac{P_c}{2 N h_{real} \tau_{adm}} = 22.8 \text{ mm}$$

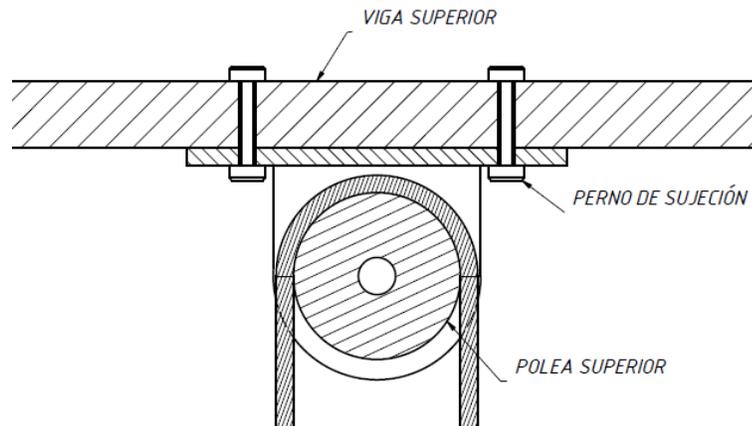
Las orejas se soldarán a una platina base mediante un electrodo *AWS E6013*, de resistencia a la fluencia $\sigma_y = 345 \text{ MPa}$, equivalente a un esfuerzo admisible de $\sigma_{adm} = 41.8 \text{ MPa}$ dado el factor de seguridad para los componentes de tracción; y un $\tau_{adm} = 24.1 \text{ MPa}$ por Energía de Distorsión. Considerando $N = 2$ cordones de soldadura, $h = 1/4 \text{ in}$ de altura del bisel de soldadura y la carga efectiva P_c , se requiere un cordón a 45° de largo:

$$l_{min} = \frac{P_c}{\sin(45^\circ) N h} = 60.7 \text{ mm}$$

Sujeción de poleas superiores

Las poleas superiores se anclarán a la viga superior de los rieles guía mediante pernos a tensión pura. Con una resistencia a la fluencia de pernos *Clase 4.6* $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$ y un esfuerzo admisible de $\sigma_{adm} = 29.1 \text{ MPa}$ dado el factor de seguridad del sistema de tracción, se requerirán $N = 4$ pernos de al menos $d_{min} = 9.06 \text{ mm}$. Se seleccionaron pernos $d_{perno} = 3/8 \text{ in UNC}$.

Figura 36: Diagrama de sujeción de poleas superiores.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

6.5.6. Espectro de respuesta sísmica

Considerando la ubicación de la *Ciudad de Guatemala*, un tipo de sitio sísmico *C*, una fuente tipo *A* a menos de 2 km y una probabilidad de 5% de que los parámetros de la curva sean excedidos en 50 años, se obtiene que:

Cuadro 27: Parámetros de diseño para curva de respuesta sísmica.

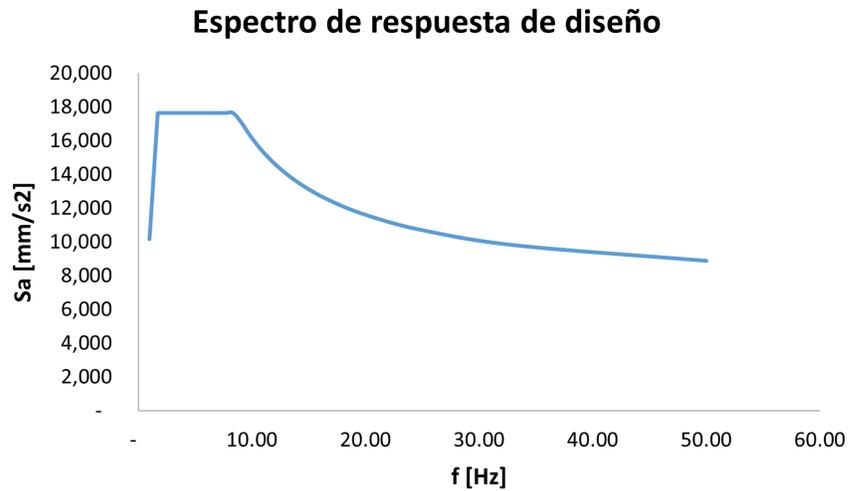
Factor	Valor
I_o	4.2
$S_{cr,nom}$ [$g's$]	1.5
$S_{1r,nom}$ [$g's$]	0.55
F_a	1.2
F_v	1.7
N_a	1.25
N_v	1.4
K_d	0.8

Fuente: Elaboración propia.

O bien:

$$S_a(T) = \begin{cases} 1.8 & 0.12 \text{ s} \leq T \leq 0.58 \text{ s}, \\ 1.0472/T & T > 0.58 \text{ s}, \\ 1.8[0.4 + 0.6T/0.12] & T < 0.12 \text{ s} \end{cases}$$

Figura 37: Curva de respuesta espectral ante sismo en Ciudad de Guatemala.



Fuente: Elaboración propia.

6.5.7. Amortiguador de emergencia

De la conservación de la energía, considerando un resorte ideal, se puede plantear que:

$$E_{potencial\ gravitacional} = E_{potencial\ resorte}$$

Para el caso en el que el carro del elevador sufra una caída libre, hasta comprimir una distancia determinada de carrera de un resorte.

Asumiendo una altura de caída $h = 3.3 \text{ m}$, una carga de diseño de $F = 7,507 \text{ N}$, una carrera de resorte de 100 mm y dos resortes en total para el frenado de emergencia:

$$F_g h = N_{resortes} \times \frac{1}{2} k (\Delta x)^2 \rightarrow k = \frac{2F_g h}{N_r (\Delta x)^2} = 2,477 \text{ N/mm}$$

6.6. Simulaciones

Se utilizó ANSYS Workbench para el análisis estructural, modal y de respuesta espectral del conjunto estructura-carro en la posición elevada del carro. Se concatenaron los módulos, a modo de compartir la información de materiales, geometría, mallado, condiciones frontera y precarga a través del análisis. A partir de los resultados de la primera serie de simulaciones se modificó el modelo y se corrió una segunda iteración *rev 1*, únicamente bajo las condiciones más críticas de carga.

Figura 38: Construcción del análisis concatenado en ANSYS Workbench.



Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Para la simulación del sistema hidráulico se utilizó FluidSim en el ambiente hidráulico.

6.6.1. Elementos del modelo

- **Materiales:**

Se utilizó acero 1018 CD para los elementos de los marcos y concreto 1-4 seco para el piso del cubo del carro (ver Cuadro 28).

Cuadro 28: Propiedades de materiales para simulaciones estructurales, modales y de respuesta espectral.

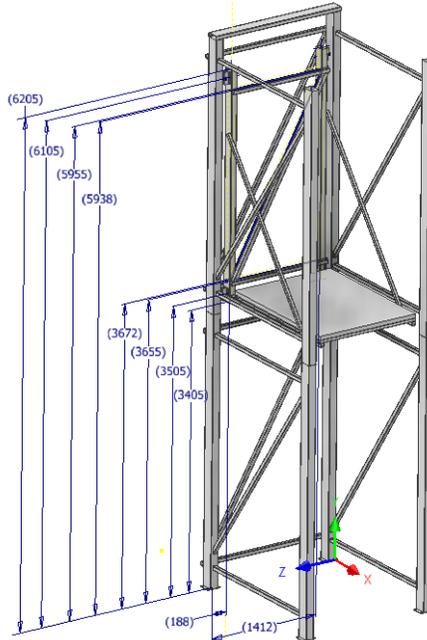
Magnitud	Variable	Acero 1018 CD	Concreto 1-4 Seco
Densidad	ρ [g/cm^3]	7.85	2.4
Módulo de Young para el acero	E ; [GPa]	200	21
Razón de Poisson	ν ; [-]	0.3	0.15
Resistencia a la fluencia	σ_y [MPa]	370	21

Fuente: (MatWeb, s.f.-a), (MatWeb, s.f.-c), Elaboración propia.

- **Geometría:**

A partir del modelo CAD generado en Autodesk Inventor® se tomaron mediciones a los puntos de unión (nodos) de los elementos de la estructura y carro (ver Figura 39).

Figura 39: Obtención de coordenadas de nodos para modelo simplificado.



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Con ellas se generó un cuadro de coordenadas, que se importó a ANSYS Design Modeler para construir el modelo simplificado por elementos lineales (ver Figura 40). Se simplificaron las secciones de los tubos rectangulares al quitar los redondeos (ver cuadro 29).

Cuadro 29: Dimensiones de secciones para tubos del modelo simplificado.

Magnitud	Var	Estructura principal	Secundario	Carro principal	Superior estructura	Piso carro
Altura	$W1 [m]$	0.1524	0.0508	0.1270	0.1524	0.1016
Base	$W2 [m]$	0.1016	0.0508	0.0762	0.0508	0.1016
Espesor	$t [m]$	0.00342	0.003	0.003	0.003	0.003

Fuente: Elaboración propia.

Por simplicidad del modelo y dado el alto factor de seguridad, se aceptó el uso de *shared topology*. Esto difiere del supuesto de los cálculos, puesto que restringe en 6 grados de libertad las uniones de los elementos, en vez de las juntas de pasador del análisis de marcos.

Figura 40: Modelo simplificado del carro y estructura en posición crítica.

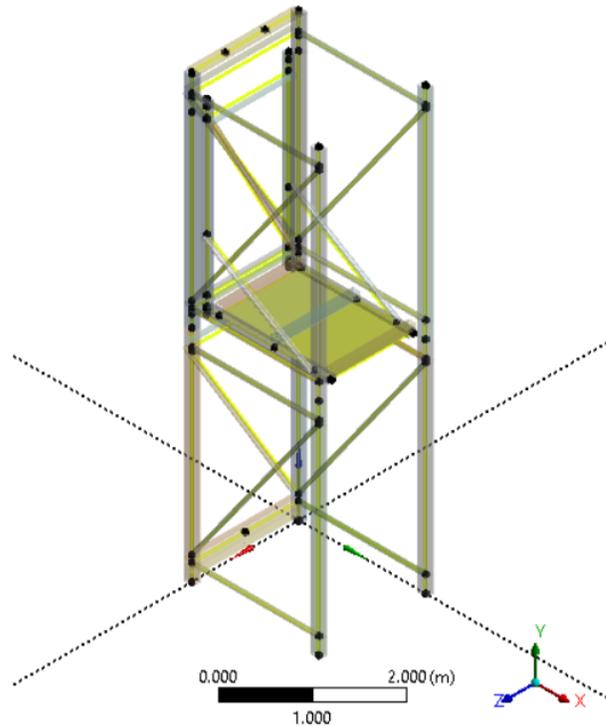


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

- **Mallado:**

El uso de elementos lineales (para los perfiles) y superficies (para la losa de concreto) permitió utilizar un tamaño de elemento de 25 mm para alcanzar buena calidad de malla. Bajo el criterio de *Element Quality* se obtuvo una media, desviación estándar y mínimo de: $\bar{x} = 0.9976$, $s = 7.10 \times 10^{-3}$, $min = 0.8008$ (ver 41). El modelo resultó en un tamaño de 10,751 nodos y 6,965 elementos.

Figura 41: Histograma de criterio *Element Quality* para la malla del modelo.

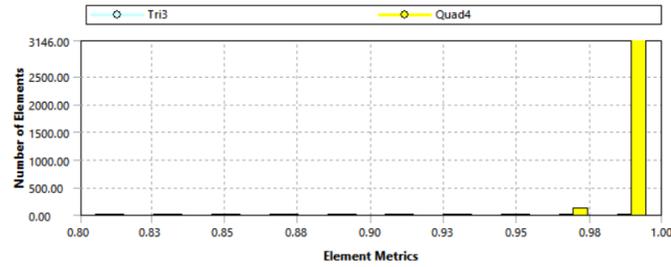


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

■ **Juntas y contactos:**

Para unir al carro con la estructura se utilizaron juntas cuerpo-cuerpo (*body-body joints*). Se favoreció este método contra el de contactos, puesto que es matemáticamente más simple. Además, es suficiente para trasladar las cargas de diseño del carro a la estructura. Para modelar el comportamiento de la interacción riel guía-patín, se restringieron únicamente 2 GDL: la traslación en X y la traslación en Z . Las rotaciones permanecieron libres, debido a la holgura entre el patín y el riel (ver Figura 42).

Figura 42: Juntas para la interacción carro-estructura.

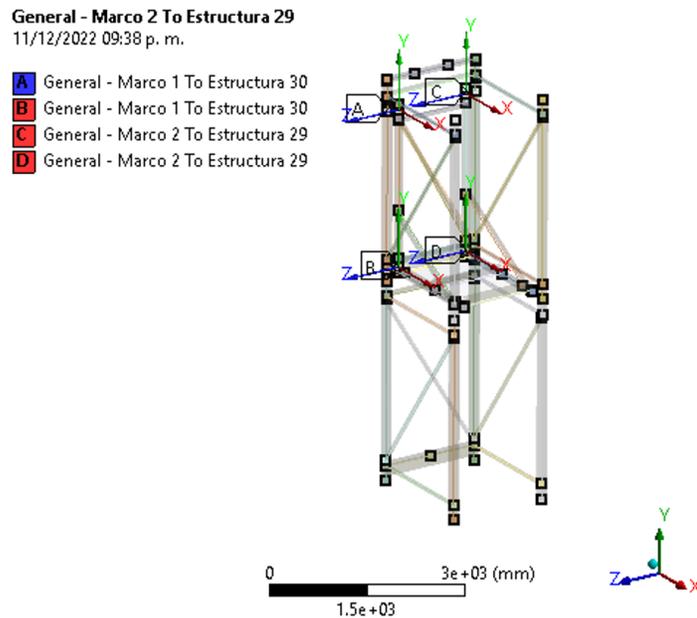


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

La interacción entre la losa de concreto y los elementos secundarios del piso se modeló mediante contactos de tipo *bonded* (ver Figura 43).

Figura 43: Contactos para la interacción vigas secundarias-piso.

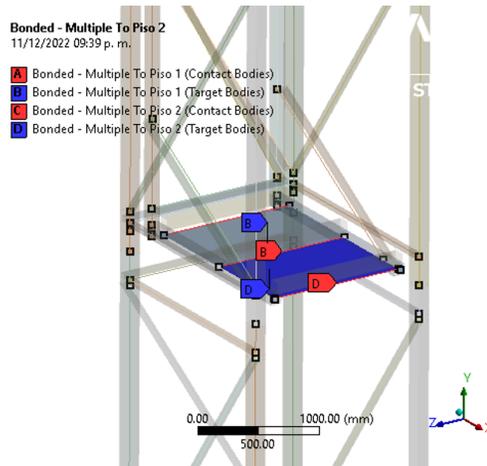


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

6.6.2. Simulación estructural estática de la estructura y carro

▪ Ajustes del análisis:

Debido a la linealidad del modelo, no fue necesario aplicar controles de *substepping*. La única fuente de no-linealidad implementada al análisis estático fue *Large Deflections*, para capturar adecuadamente la respuesta modal concatenada.

▪ Condiciones frontera:

- *Soportes*: Se seleccionaron soportes simples, sin restricción de rotación, para simular uniones pernadas simples de la estructura al piso.
- *Restricción de desplazamiento*: La sujeción de un único cable al carro se modeló mediante un desplazamiento remoto. Con este se mantuvieron libres 5 grados de libertad, restringiendo únicamente el eje *Y*.

Para la revisión *Rev 1* de las simulaciones, se reemplazó esta restricción fija por un resorte de unión cuerpo-tierra (*body-ground joint*). Se halló la constante de resorte equivalente a un cable de longitud $L = 12,000 \text{ mm}$, dada la sección transversal efectiva de $A = 49.5 \text{ mm}^2$ y la elasticidad del acero de $E = 190 \text{ GPa}$. Por lo tanto, se tiene que:

$$k = \frac{AE}{L} = 783 \text{ N/mm}$$

De esta manera, se podrá ponderar el efecto de la elasticidad del cable en la estabilidad del elevador al subirse y bajarse del carro.

- *Carga gravitacional*: Se utilizó la densidad del acero y el concreto para evaluar el efecto gravitacional en la estructura, cargas que se despreciaron durante los cálculos de las secciones de los marcos.

- *Cargas externas:* Se incluyeron 4 cargas: 3 a la estructura (reacciones del cilindro y poleas) y 1 al carro (carga de diseño). Con esta última se generaron dos análisis independientes: uno, con la fuerza opuesto al punto de soporte por el cable y otro, sobre el mismo marco en el que se aplicó la condición de soporte del cable.

Figura 44: Condiciones frontera: caso de carga crítica cruzada.

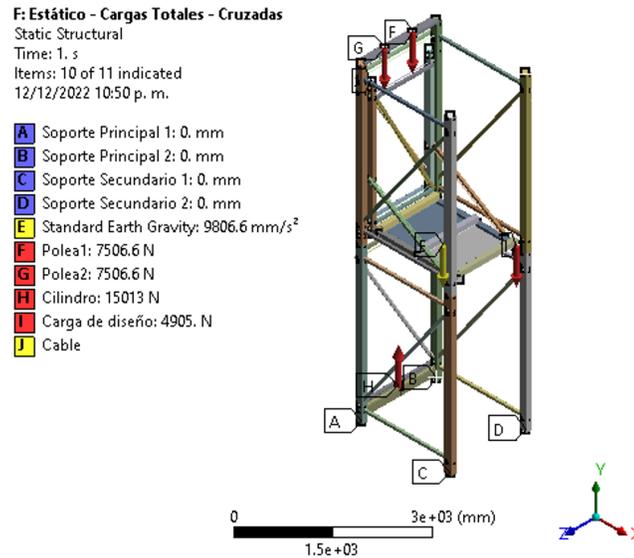


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

Figura 45: Condiciones frontera: caso de carga crítica alineada.

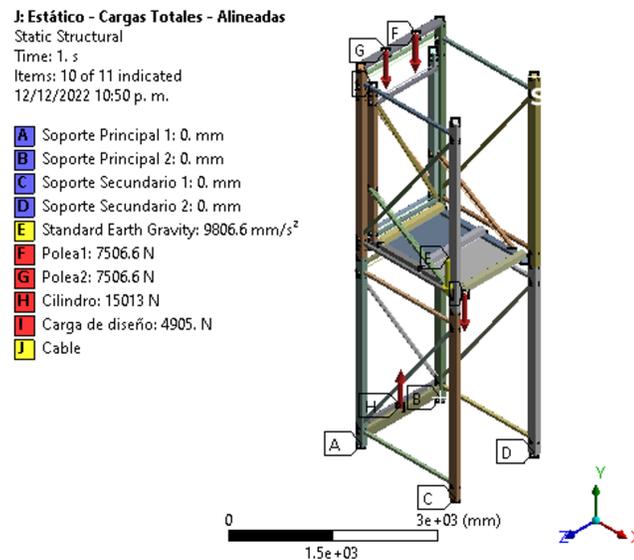


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

- **Resultados por generar:**

Se llamó a tres tipos de resultados: deformaciones totales, esfuerzo equivalente y herramientas de viga (*beam tools*). De estas últimas, se estudiaron los esfuerzos directos, mínimos y máximos de flexión; y mínimos y máximos combinados.

6.6.3. Simulación de análisis modal de la estructura y carro

- **Ajustes del análisis:**

Se solicitó la generación de 50 modos normales de vibración, a modo de superar el criterio de 90 % de fracción de masa desplazada en el plano de interés XZ , en el que se aplicará la carga sísmica. Además, se importaron los resultados del análisis estructural para incluir los efectos del preesfuerzo.

- **Resultados por generar:**

Se configuró la representación visual de los modos normales, además del histograma de frecuencias.

6.6.4. Simulación de respuesta espectral de la estructura y carro

- **Ajustes del análisis:**

Se utilizaron todos los modos normales generados previamente, combinados con el método *Complete Quadratic Combination* debido a la cercanía entre frecuencias de los modos normales (mediante el criterio de 10 % de diferencia entre frecuencias). El tipo de espectro utilizado fue *single point*. Se aplicó un coeficiente de amortiguamiento común para casos estructurales del $\xi = 2\%$, para representar el amortiguamiento intrínseco del material y por fricción de las juntas pernadas.

- **Condiciones frontera:**

Se aplicó el espectro de respuesta de la Figura 37, en dimensionales $[S_a] = mm/s^2$ y $[f] = Hz$. Se analizó tanto el caso de carga en el eje X como en el Z , debido a los efectos cortantes de la carga sísmica.

- **Resultados por generar:**

Debido al uso de elementos lineales, no fue posible estudiar las aproximaciones de esfuerzos. Sin embargo, a modo de estudiar los efectos de la carga sobre el comportamiento de la estructura, se llamó a los resultados de: deformación total y direccional.

6.6.5. Simulación de sistema hidráulico

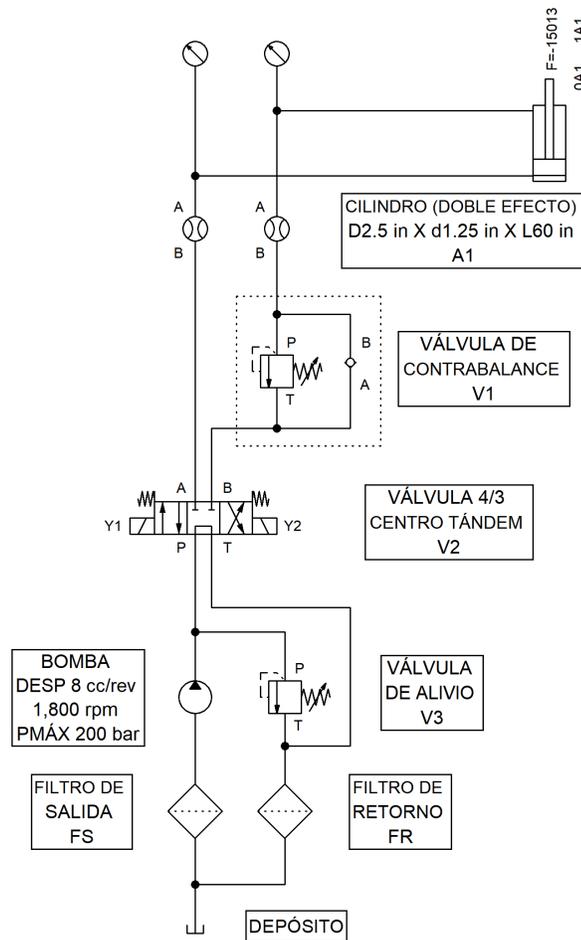
El sistema hidráulico y una versión simplificada de los controles del carro se simularon en FluidSim Hydraulics. Para el circuito hidráulico se utilizó (ver Figura 46):

- 1 depósito

- 2 filtros:
 - 1 a la entrada del depósito
 - 1 a la salida del depósito
- 1 bomba hidráulica de 8 cc/rev, 1,800 rpm y presión máxima 200 bar.
- 1 válvula reguladora de presión, ajustada a 63.21 bar.
- 1 electroválvula 4/3, centro tándem.
- 1 válvula de contrabalance, a la extensión del cilindro, calibrada a 90 bar.
- 1 cilindro de doble efecto, de dimensiones $D = 2.50 \text{ in}$, $d = 1.25 \text{ in}$ y $L = 60 \text{ in}$.

Se midió la presión y el caudal en ambas líneas del cilindro, puntos de control que no serán implementados en el diseño final. Para efectos del análisis, se despreció la caída de presión de los filtros, válvulas y mangueras.

Figura 46: Esquemático del sistema hidráulico para la simulación.

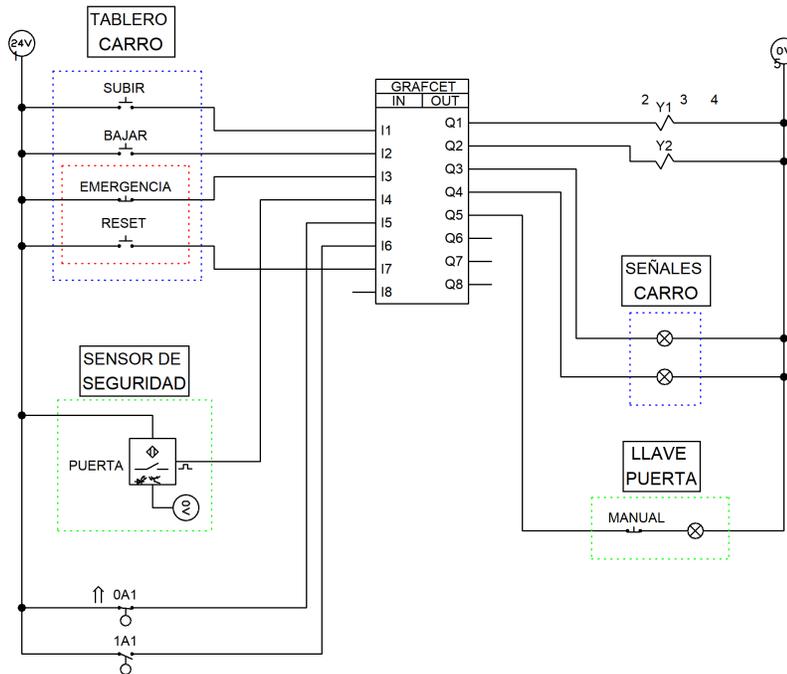


Fuente: Elaboración propia.

Para la representación del controlador del sistema, se configuró el cableado de los siguientes componentes para su programación mediante GRAFCET (ver Figura 47):

- Tablero de control en carro:
 - Botón para subir.
 - Botón para bajar.
 - Botón de emergencia.
 - Botón de *reset*.
- Controles para puerta del carro y piso:
 - Sensor de proximidad para cierre de puertas.
 - Candado actuado por solenoide para puertas.
 - Botón de apertura manual para puertas.
- Señales lumínicas y auditivas:
 - Señal de ascenso.
 - Señal de descenso.
- Finales de carrera para el cilindro.
- Solenoides de válvula direccional.

Figura 47: Esquemático de las conexiones eléctricas del sistema hidráulico.

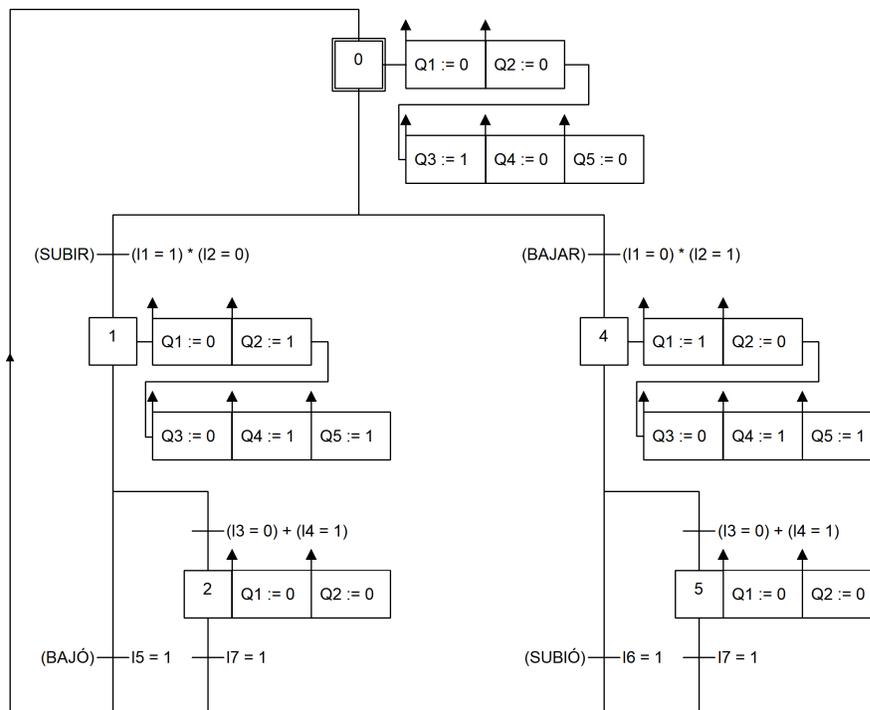


Fuente: Elaboración propia.

Se programó en GRAFCET el control del sistema (ver 48), con el objetivo de:

- Controlar la extensión y contracción del cilindro mediante botones.
- Notificar al usuario, mediante alarmas lumínicas y auditivas de las acciones del elevador.
- Bloquear la apertura de la puerta durante el ascenso o descenso.
- Detener el movimiento del carro ante accionamiento del botón de emergencia o la apertura imprevista de las puertas.

Figura 48: Programa GRAFCET del sistema hidráulico.



Fuente: Elaboración propia.

7.1. Simulaciones

7.1.1. Simulación estructural estática de la estructura y carro

Primera iteración

Figura 49: Deformación total por cargas gravitacionales, primera iteración.

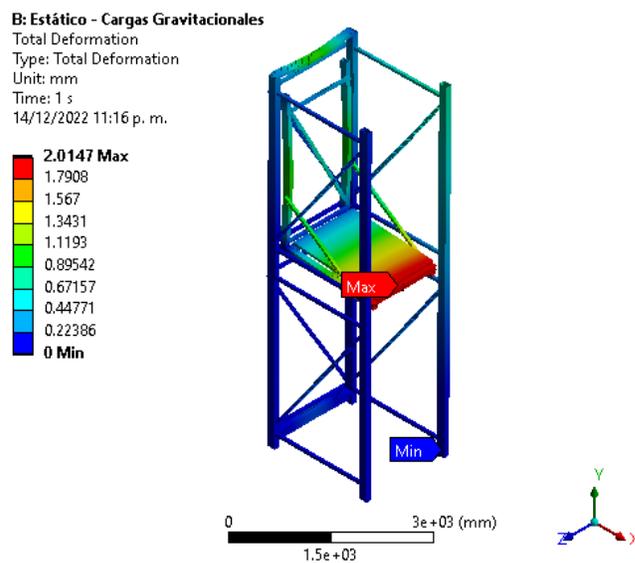


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

Figura 50: Deformación total por cargas cruzadas, primera iteración.

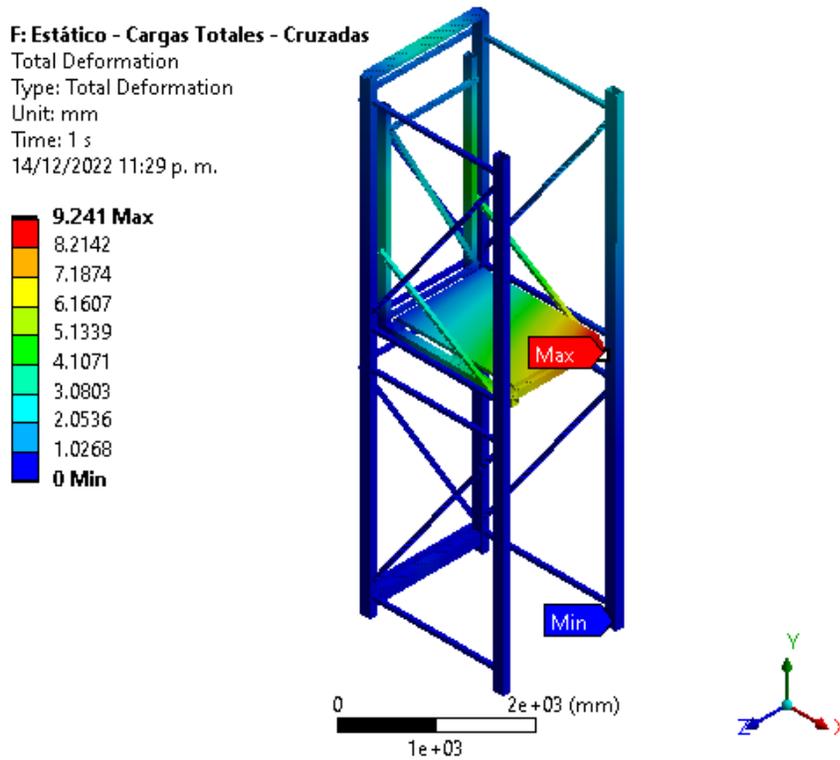
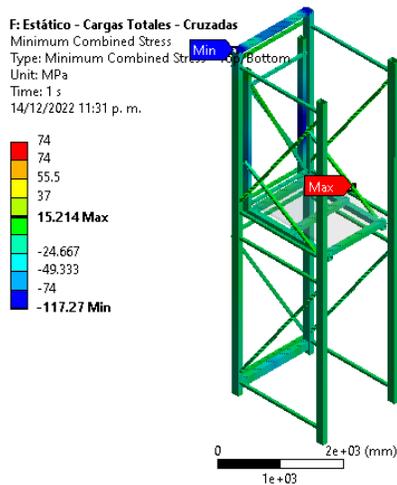


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

Figura 51: Esfuerzos combinados en elementos lineales, cargas cruzadas, primera iteración.

(a) Esfuerzos mínimos combinados.



(b) Esfuerzos máximos combinados.

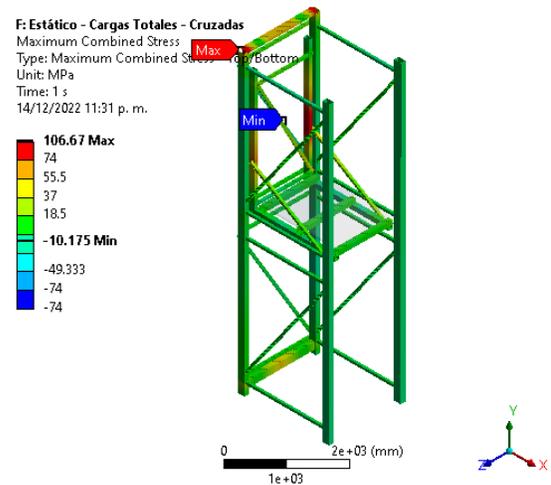


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

Figura 52: Deformación total por cargas alineadas, primera iteración.

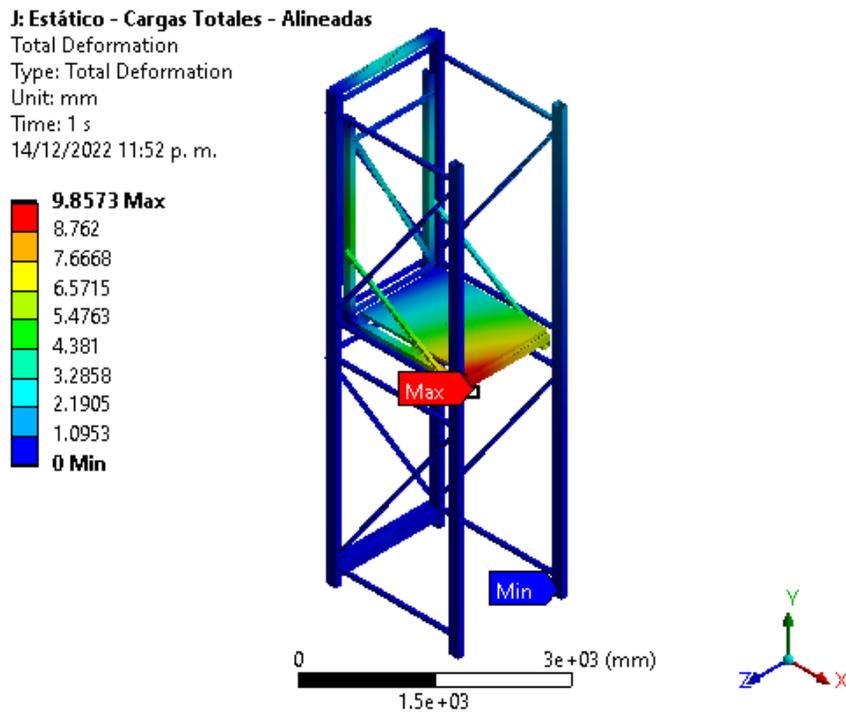


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

Figura 53: Esfuerzos combinados en elementos lineales, cargas alineadas, primera iteración.

(a) Esfuerzos mínimos combinados.

(b) Esfuerzos máximos combinados.



Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

Segunda iteración

Figura 54: Deformación total por cargas gravitacionales, segunda iteración.

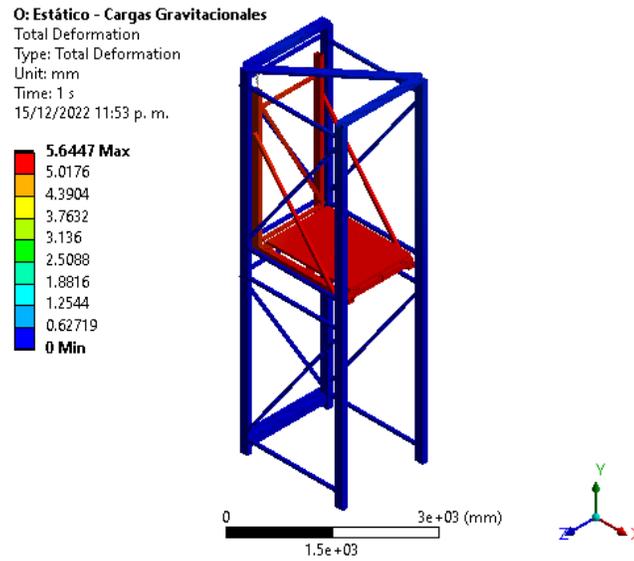


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 55: Deformación total por cargas cruzadas, segunda iteración.

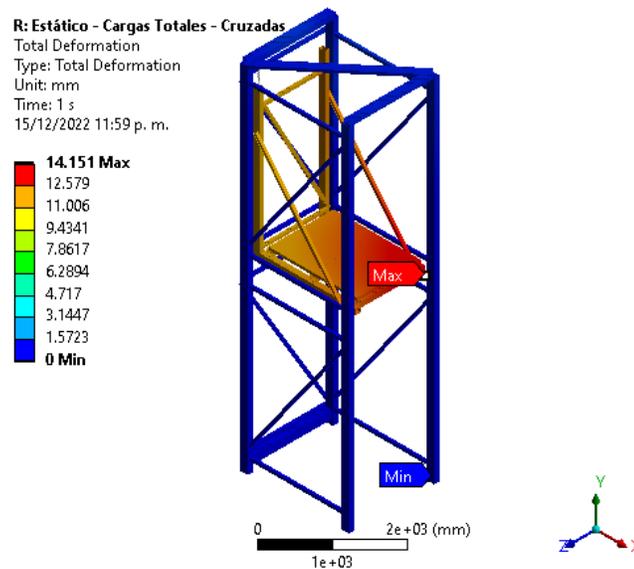


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 56: Esfuerzos combinados en elementos lineales, cargas cruzadas, segunda iteración.

(a) Esfuerzos mínimos combinados.

(b) Esfuerzos máximos combinados.

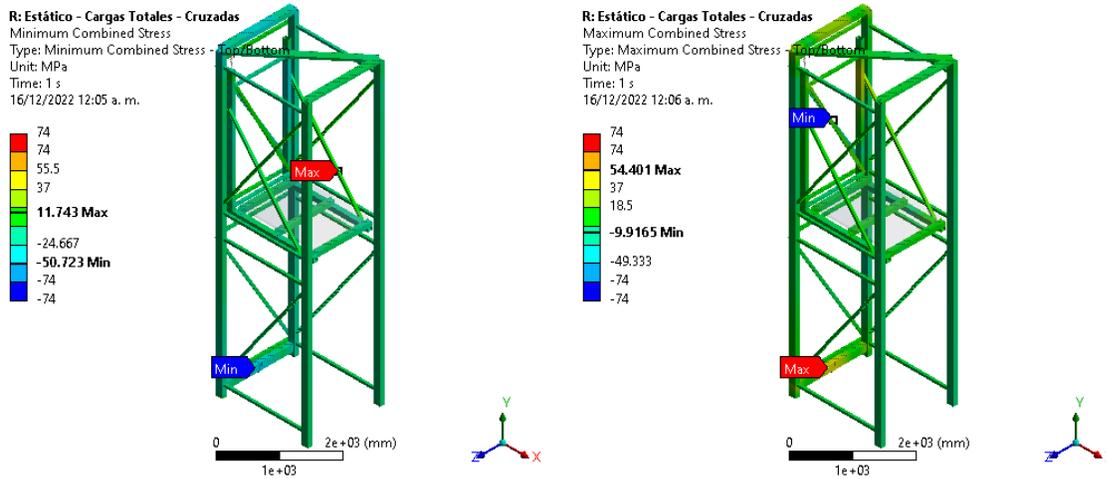


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

7.1.2. Simulación de análisis modal de la estructura y carro

Primera iteración

Figura 57: Histograma de frecuencias para modos normales bajo cargas gravitacionales, primera iteración.

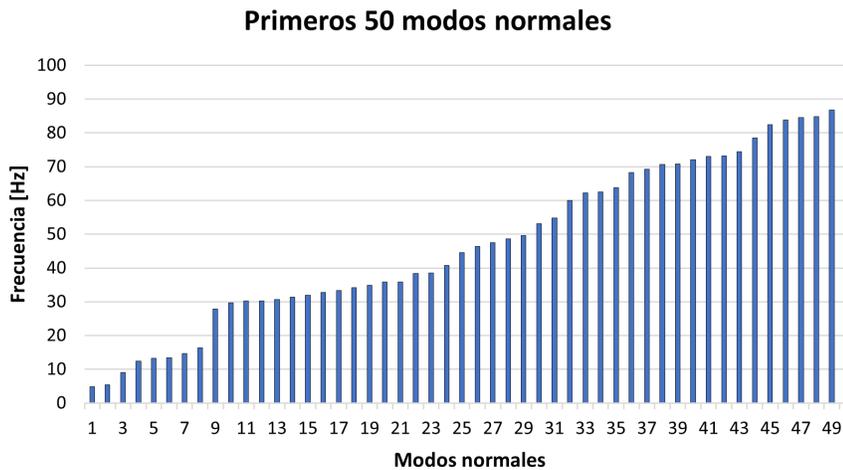


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 58: Fracción de masa efectiva trasladada vs. modos normales bajo cargas gravitacionales, primera iteración.

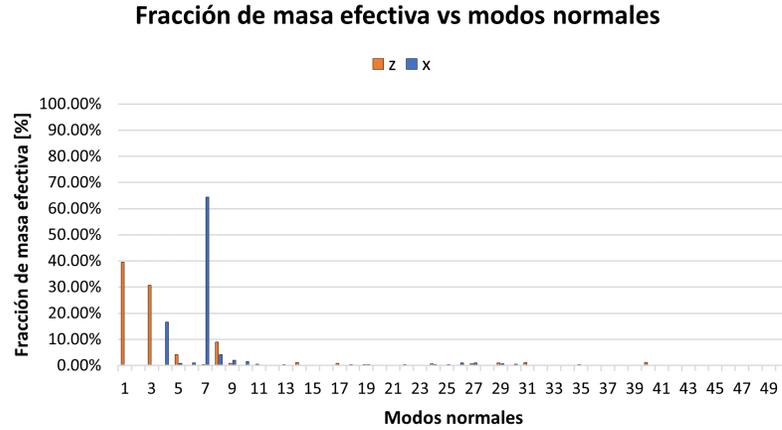


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 30: Fracción de masa efectiva desplazada para los primeros 50 modos normales, cargas gravitacionales, primera iteración.

Eje	Fracción de masa efectiva total
X	95.52 %
Y	36.56 %
Z	95.19 %
RX	95.35 %
RY	96.06 %
RZ	96.43 %

Fuente: Elaboración propia.

Figura 59: Representación visual de principales modos normales con respecto a su fracción de masa efectiva trasladada, primera iteración.

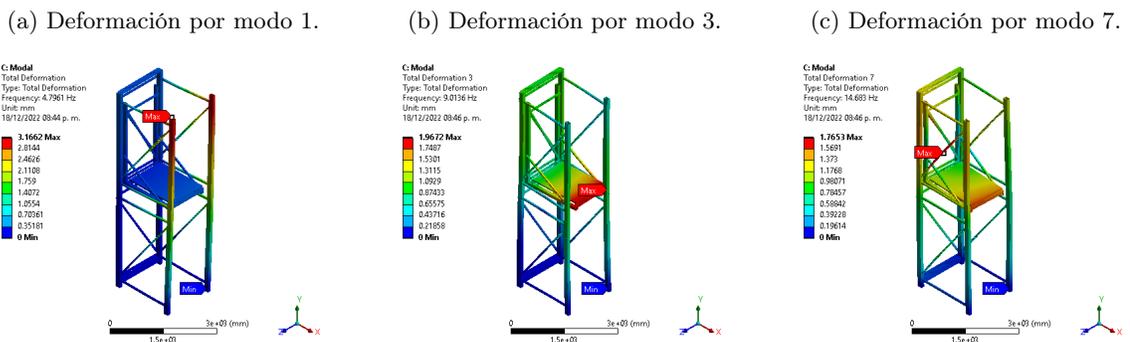
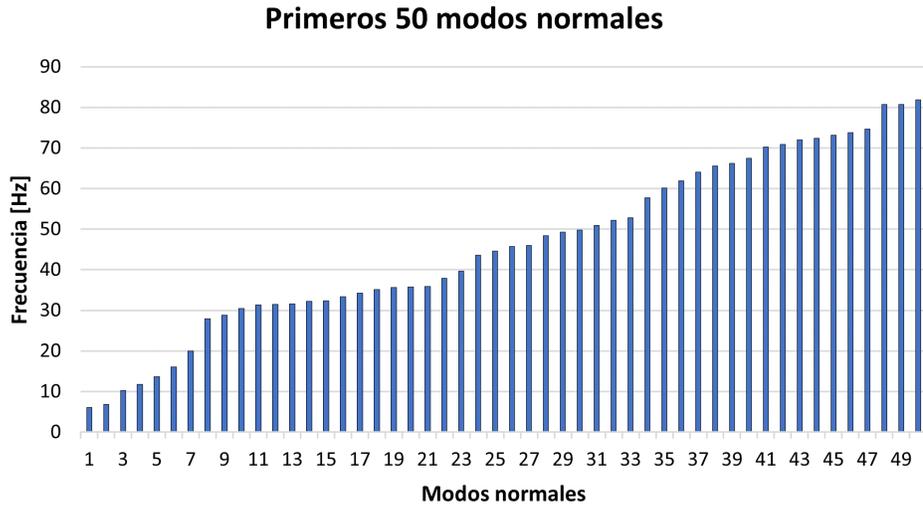


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

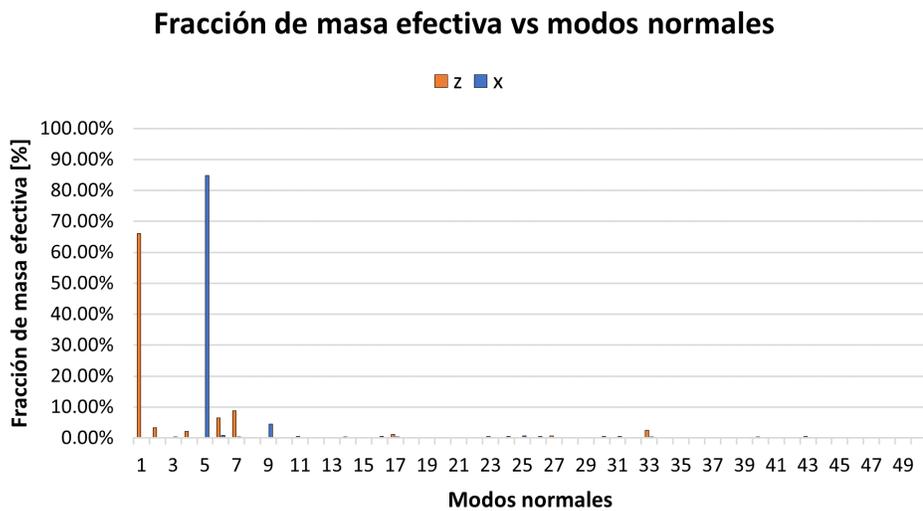
Segunda iteración

Figura 60: Histograma de frecuencias para modos normales bajo cargas gravitacionales, segunda iteración.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 61: Fracción de masa efectiva trasladada vs. modos normales bajo cargas gravitacionales, segunda iteración.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 31: Fracción de masa efectiva desplazada para los primeros 50 modos normales, cargas gravitacionales, segunda iteración (*rev 1*).

Eje	Fracción de masa efectiva total
X	95.72 %
Y	44.94 %
Z	95.27 %
RX	96.80 %
RY	96.26 %
RZ	96.49 %

Fuente: Elaboración propia.

Figura 62: Representación visual de principales modos normales con respecto a su fracción de masa efectiva trasladada, segunda iteración.

(a) Deformación por modo 1.

(b) Deformación por modo 5.

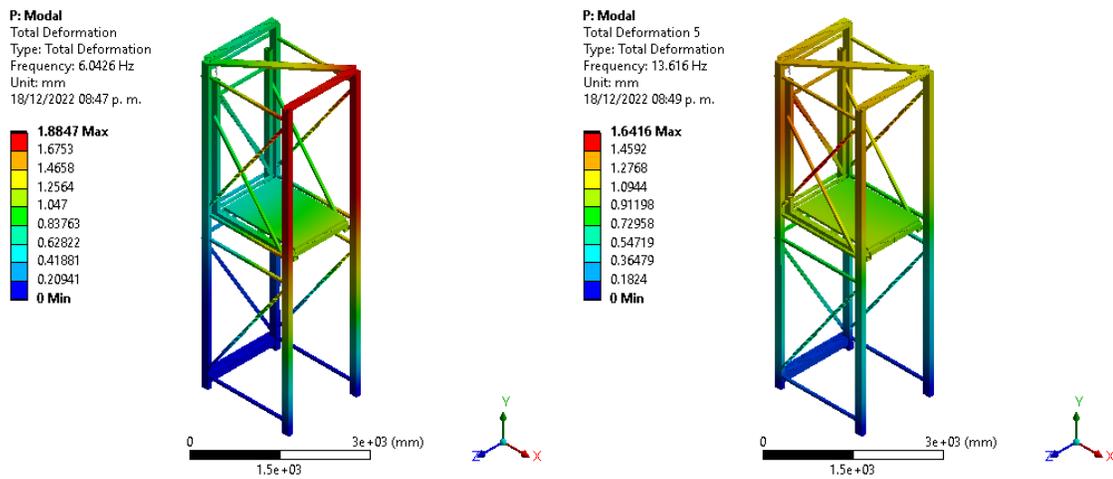


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

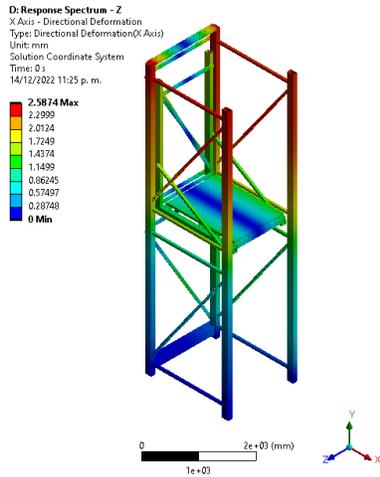
Fuente: Elaboración propia.

7.1.3. Simulación de respuesta espectral de la estructura y carro

Primera iteración

Figura 63: Deformación direccional por respuesta espectral aplicada en eje Z, cargas gravitacionales, primera iteración.

(a) Deformación en eje X.



(b) Deformación en eje Z.

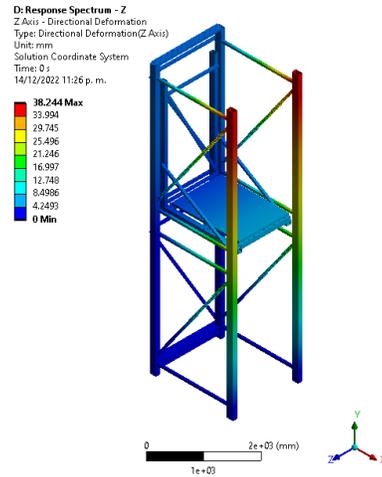
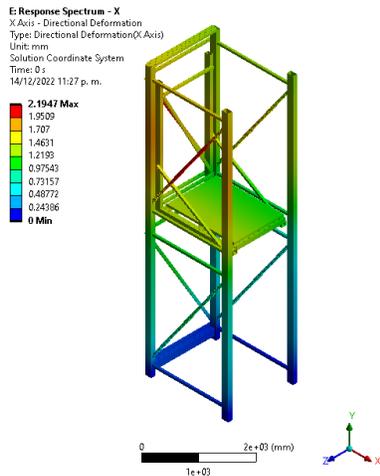


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 64: Deformación direccional por respuesta espectral aplicada en eje X, cargas gravitacionales, primera iteración.

(a) Deformación en eje X.



(b) Deformación en eje Z.

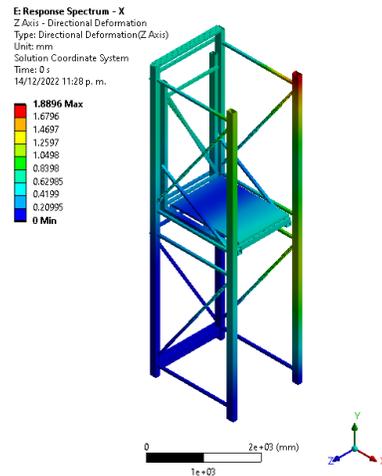


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Segunda iteración

Figura 65: Deformación direccional por respuesta espectral aplicada en eje Z, cargas gravitacionales, segunda iteración.

(a) Deformación en eje X.

(b) Deformación en eje Z.

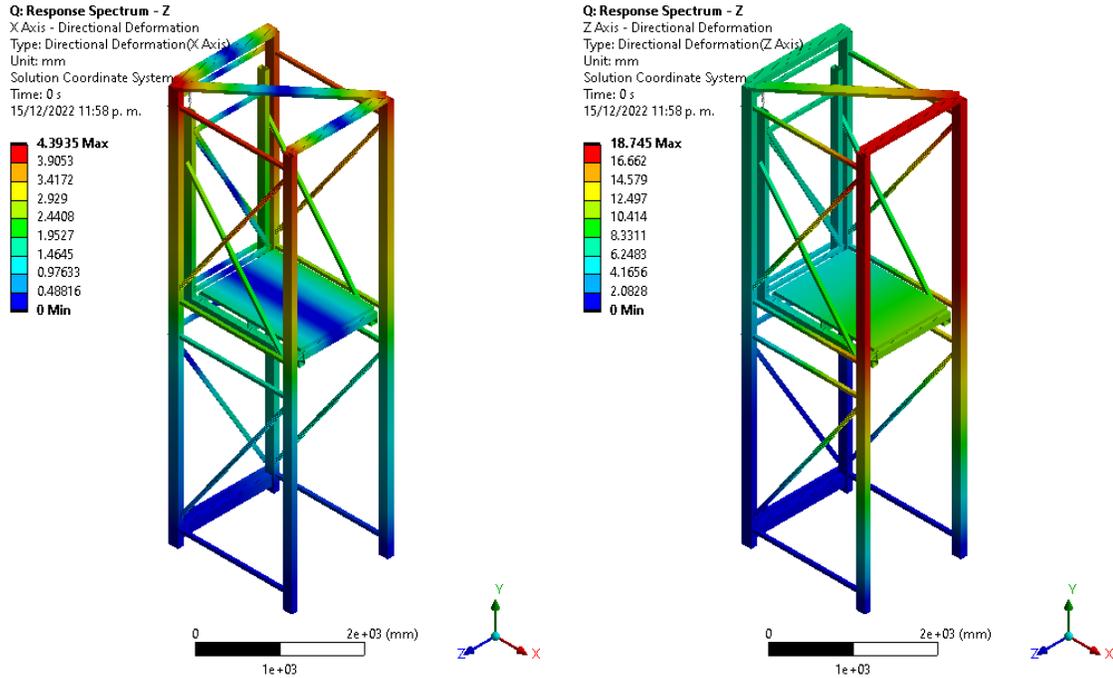
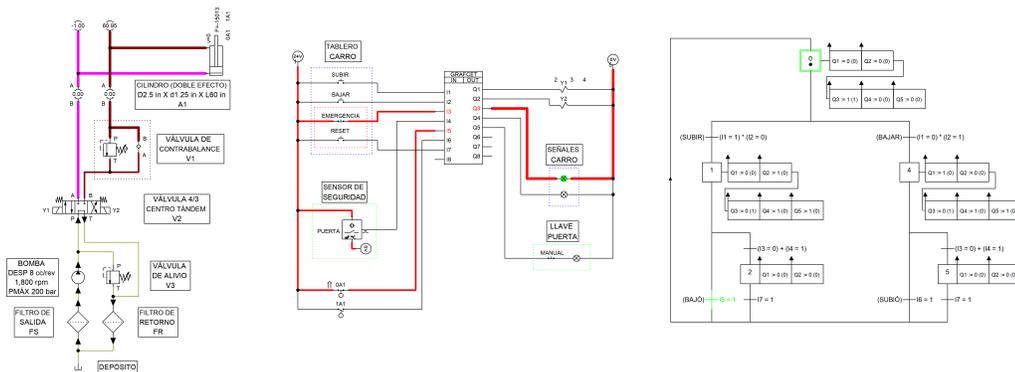


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.
 Fuente: Elaboración propia.

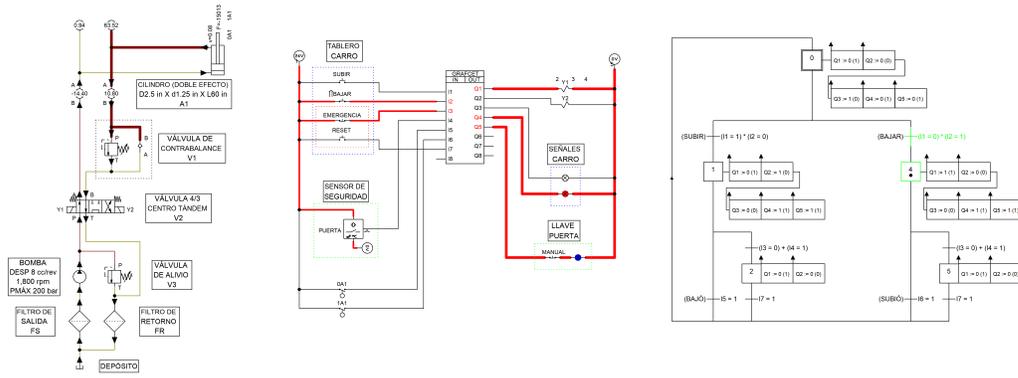
7.1.4. Simulación de sistema hidráulico

Figura 66: [1] Arranque del sistema en posición elevada: indicación de seguridad, puerta desbloqueada.



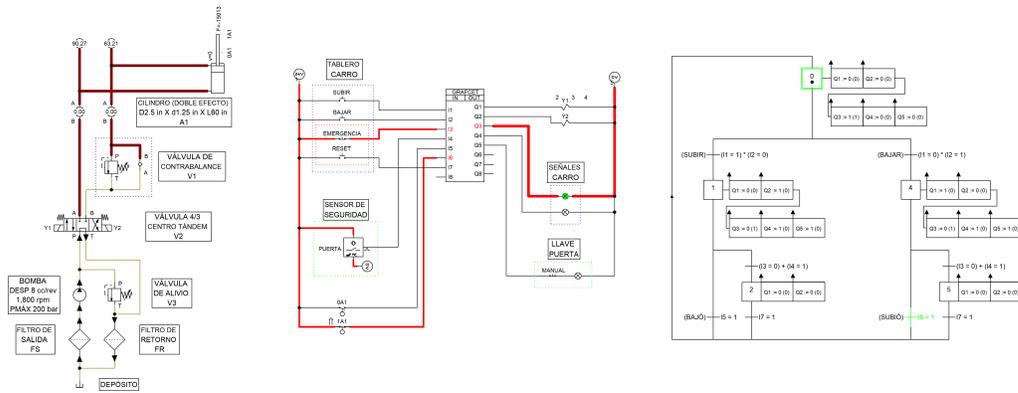
Fuente: Elaboración propia.

Figura 67: [2] Inicio de descenso: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.



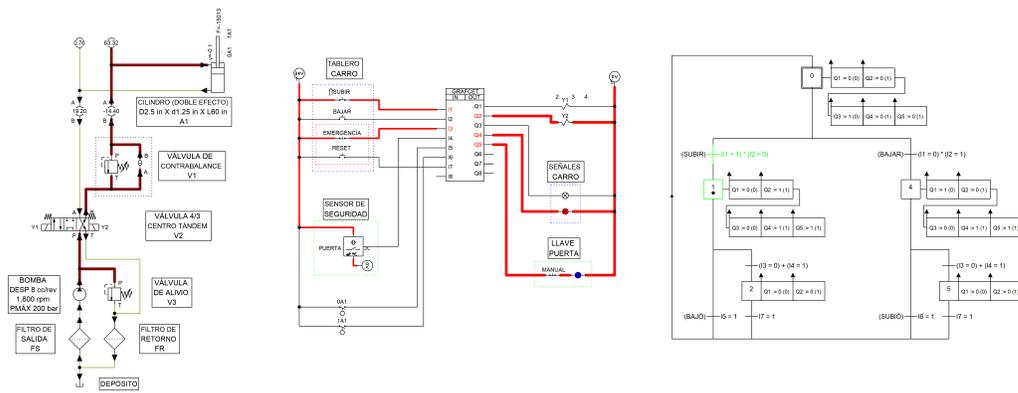
Fuente: Elaboración propia.

Figura 68: [3] Llegada a posición en planta baja: indicación de seguridad, puerta desbloqueada.



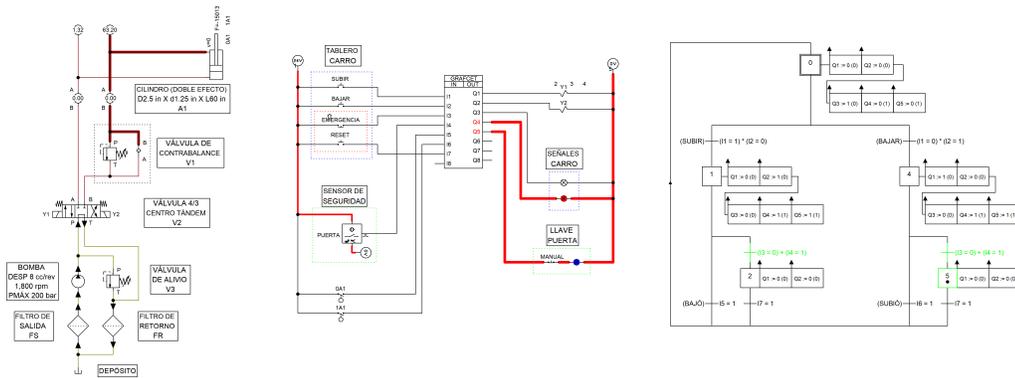
Fuente: Elaboración propia.

Figura 69: [4] Inicio de ascenso: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.



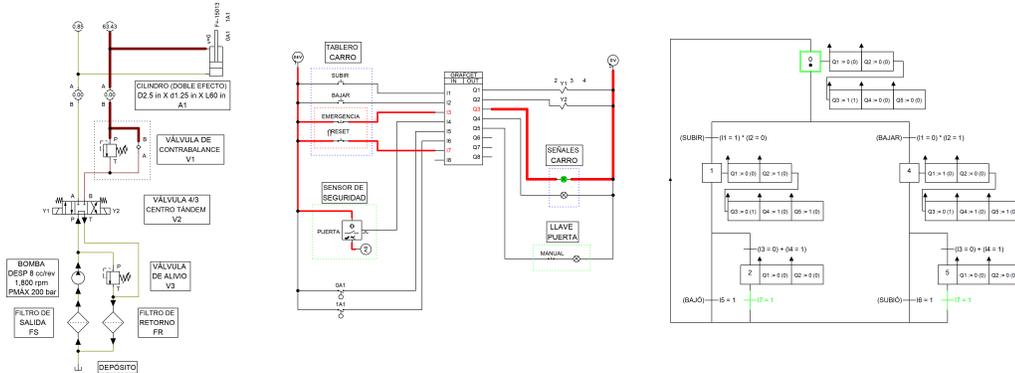
Fuente: Elaboración propia.

Figura 70: [5] Sistema detenido por uso de botón de emergencia: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.



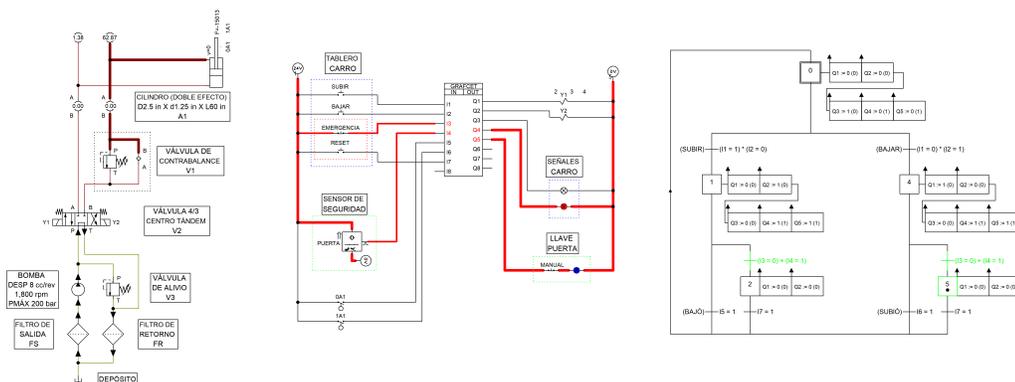
Fuente: Elaboración propia.

Figura 71: [6] Sistema desbloqueado por presión de botón de reset: indicación de seguridad, puerta desbloqueada.



Fuente: Elaboración propia.

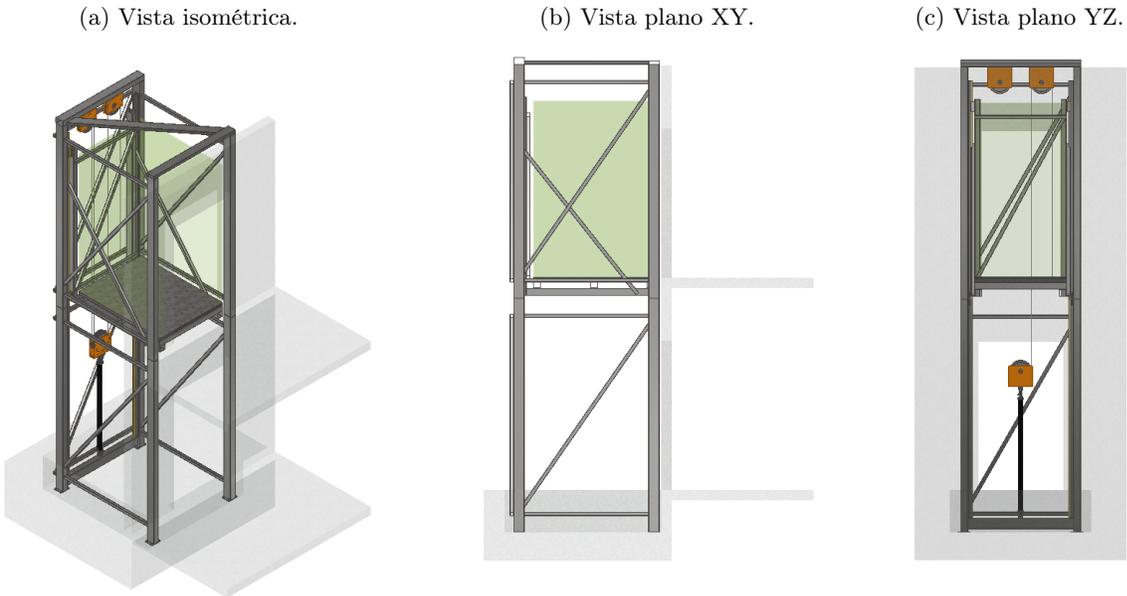
Figura 72: [7] Sistema detenido por detección de apertura de puerta: bloqueo del candado de puerta y alarma de movimiento.



Fuente: Elaboración propia.

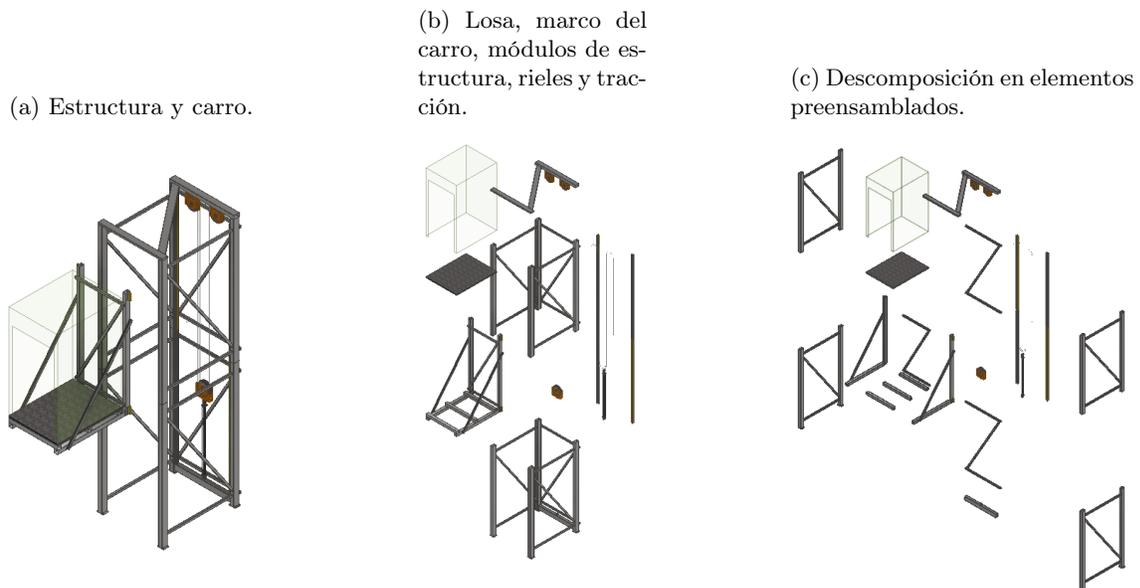
7.2. Diseño final

Figura 73: Vista isométrica del diseño final del elevador.



Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 74: Descomposición de subensambles del diseño final del elevador.



Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 32: Desglose de costos aproximados para los materiales del diseño.

Item	Elemento de referencia	Costo Unitario	Unidades	Subtotal (Q)	Subtotal (\$)	
Cilindro	Dalton Tie-Rod Cylinder 2.5 Bore x 60 Stroke	\$ 425.46	1	-	\$ 425.46	
Unidad hidráulica	A/C Hydraulic Unit 3.7 GPM 10 Gallon Reservoir	\$ 2,000.00	1	-	\$ 2,000.00	
Válvula de alivio	Prince RV Pressure Relief Valve RV-4L	\$ 63.24	1	-	\$ 63.24	
Válvula de contrabalance	CBCA-LHN - Standard Counterbalance Valve, T-11A	\$ 80.00	1	-	\$ 80.00	
Válvula direccional	D03 Solenoid Valve D03S-2F-24D-35	\$ 177.73	1	-	\$ 177.73	
PLC	Siemens LOGO PLC	\$ 90.00	1	-	\$ 90.00	
Tubo estructural	2"X 2"X chapa 11, 1018 CD	Q 382.06	9	Q 3,438.54	-	
Tubo estructural	4"X 4"X chapa 11, 1018 CD	Q 773.27	2	Q 1,546.54	-	
Tubo estructural	5"X 3"X chapa 11, 1018 CD	Q 800.00	3	Q 2,400.00	-	
Tubo estructural	6"X 4"X chapa 10, 1018 CD	Q 953.06	5	Q 4,765.30	-	
L estructural	1"X 1"X 1/2", 1018 CD	Q 300.00	5	Q 1,500.00	-	
Platina	2.50"X 3/4", 304L	Q 300.00	3	Q 900.00	-	
Otros	Uniones, platinas, piso, mangueras, acoples	-	-	Q 4,000.00	-	
				Subtotal	Q 18,550.38	\$ 2,836.43
				Subtotal	-	Q 22,124.15
				IVA + Shipping	-	Q 32,212.77
				Total	Q 48,763.15	

Costos aproximados, asumiendo \$ 1.00 \approx Q 7.80, IVA = 12% y shipping \approx 30%.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 33: Verificación de cumplimiento de requisitos.

Código	Criterio	Cumple
AUX-CMP-001	Todo el ensamble de tracción es visible desde la parte posterior de la estructura. El cable queda completamente restringido mediante la sujeción de las poleas.	Sí
AUX-CMP-002	Se dimensionó una carrera de resorte de emergencia de 100 mm, para un elevador de velocidad nominal de 0.18 m/s.	Sí
AUX-CMP-003	El carro, en su posición de descanso en el nivel inferior, cuenta con una holgura de 346 mm con respecto al fondo del foso.	Sí
AUX-MEC-001	Se incluyó un cable y poleas de redundancia al diseño. Todo el sistema de tracción se dimensionó con factor de seguridad superior a 8.25.	Sí
CAR-ACC-001	El marco del carro se dibujó a modo de ubicar el extremo angosto del cubo a la puerta de acceso.	Sí
CAR-ACC-002	El carro tiene un área efectiva de piso de 1.3 m por 1.7 m.	Sí
CAR-ACC-003	El carro tiene un ancho a la puerta de 1.3 m, superior al mínimo de 0.81 m.	Sí
CAR-ACC-004	El piso incluirá piso antideslizante sobre la losa de concreto.	Sí

Cuadro 33: Verificación de cumplimiento de requisitos.

Código	Criterio	Cumple
CAR-ACC-005	El carro tiene un área efectiva de piso de 1.3 m por 1.7 m.	Sí
CAR-CMP-001	Se incluyó un seguro por solenoide en el diseño del control eléctrico-hidráulico.	Sí
CAR-CMP-002	El piso de losa es soportado completamente por el marco del carro.	Sí
CAR-HOL-001	No validado, ya que dependerá de la edificación existente si se deban incluir plataformas de extensión del piso hacia el punto de llegada del carro.	No
CAR-HOL-002	No se incluyó en el alcance el diseño del interior del carro.	No
CAR-MEC-001	El marco del carro está sujeto mediante 4 guías, 2 inferiores y 2 superiores.	Sí
CAR-MEC-002	Todo elemento estructural se diseño con acero 1018 CD.	Sí
GEN-ACC-001	Se incluyeron indicadores visuales/auditivos en el diseño del control eléctrico-hidráulico. Estos se desactivan únicamente mediante la interacción con el panel de control durante operación nominal.	Sí
GEN-ACC-002	No se incluyeron rampas en el diseño.	Sí
GEN-CMP-001	Todo el diseño incluyó un factor de seguridad de al menos 5 con respecto a la fluencia, por lo que no se alcanza plasticidad.	Sí
GEN-ENS-001	El diseño del marco y estructura consiste de módulos que, a su vez, están compuestos de subensambles.	Sí
GEN-ENS-002	Ningún elemento de los subensambles de los módulos supera los 3.30 m de longitud x 2.10 m de ancho. Todos los subensambles pueden ser transportados independientemente y pueden ser ensamblados en el sitio de instalación. El ensamble completo de la estructura, cilindro hidráulico, poleas y losa de concreto tienen una masa de 1,400 kg.	Sí
GEN-HOL-001	El espacio de refugio del foso es de 1,747 mm por 1,498 mm por 346 mm, menos el espacio del resorte de amortiguamiento al centro.	Sí
GEN-MEC-001	El elevador es capaz de sostener tanto las cargas de diseño como los desplazamientos por carga sísmica sin depender de la estructura de la edificación.	Sí
GEN-MEC-002	El carro tiene un área efectiva de piso de 1.3 m por 1.7 m, con capacidad de carga de diseño de 250 kg.	Sí
GEN-MEC-003	El carro tiene un área efectiva de piso de 1.3 m por 1.7 m, con capacidad de carga de diseño de 250 kg.	Sí
GEN-MEC-004	El elevador es capaz de desplazarse verticalmente un máximo de 3.25 m.	Sí

Cuadro 33: Verificación de cumplimiento de requisitos.

Código	Criterio	Cumple
GEN-MEC-005	El diseño incluye perfiles estructurales tubulares rectangulares, platinas, perfiles tipo "L", pernos, elementos hidráulicos disponibles por medio de proveedores locales o proveedores extranjeros con cadena de suministro a Guatemala comprobada.	Sí
GEN-MEC-006	Se seleccionaron algunos elementos de sujeción con factor de seguridad a la fluencia por debajo de 5. Sin embargo, estos se contemplaron bajo cargas de diseño extremas, que exceden la carga nominal de uso.	Sí
GEN-MEC-007	No validado. Es necesario verificarlo luego del planteamiento de instalación.	No
GEN-MEC-008	No se utilizaron perfiles con biseles mayores a 5°.	Sí
GUI-CMP-001	Se incluyeron placas tipo fish plate en el diseño de los rieles guía.	Sí
GUI-MEC-001	Todos los miembros guía soportan las cargas de diseño y desplazamientos por carga sísmica.	Sí
HID-CMP-001	No validado. Es necesario verificarlo luego del planteamiento de instalación.	No
POT-ACC-001	La velocidad de diseño es de 0.18 m/s.	Sí
POT-ELE-001	Se diseñó considerando un motor monofásico de 2 HP, 220 V de tensión.	Sí
STR-HOL-001	El carro, en su posición de descanso en el nivel inferior, cuenta con una holgura de 346 mm con respecto al fondo del foso.	Sí
STR-HOL-002	La holgura superior es de 200 mm, para homogenizar las dimensiones de los módulos. Por seguridad, se ubicaron vigas de final de carrera físicos en el extremo superior.	No
STR-HOL-003	La holgura superior es de 200 mm, para homogenizar las dimensiones de los módulos. Por seguridad, se ubicaron vigas de final de carrera físicos en el extremo superior.	Sí
STR-HOL-004	Los espacios a los costados entre el carro y el marco cuentan con una holgura de 124 mm.	Sí
STR-MEC-001	El carro soporta las cargas sísmicas promedio de la Ciudad de Guatemala, con un desplazamiento total máximo de 38 mm en el eje Z.	Sí
TRA-CMP-001	Todos los elementos de sujeción que viajan están dimensionados con al menos un factor de seguridad de 5 con respecto a fluencia.	Sí
TRA-MEC-001	El cable, poleas, sujeción y cilindro se dimensionó mediante el criterio de factor de seguridad de 8.25.	Sí
TRA-MEC-002	El diámetro nominal del calbe seleccionado es de 5/16.º 7.94 mm.	Sí
TRA-MEC-003	No se cumplió el criterio, a favor de la disponibilidad de material en Guatemala.	No

8.1. Simulaciones estructurales, modales y de respuesta sísmica

Se llevaron a cabo tres tipos de simulación estática estructural, con el objetivo de evaluar los efectos de las cargas gravitacionales y separarlos de dos potenciales condiciones críticas: carga de diseño ubicada en el extremo opuesto de la sujeción de un solo cable al carro (cruzadas) y la carga de diseño ubicada en el mismo plano que la sujeción de un solo cable al carro (alineadas). Comparando los resultados de la primera iteración de la Figura 49 contra las Figuras 50 y 50, se observa que la carga de diseño deforma el ensamble estructura-carro 8 mm, mientras que el peso de los elementos generan una deflexión adicional de 2 mm. Ya que este movimiento máximo se da al extremo del carro, se recomienda un sistema de compensación PID en tiempo real de la posición del carro para mantener la sensación de estabilidad durante el ascenso y descenso.

Al añadir al análisis el efecto de la elasticidad del cable, se puede notar que el efecto de desalineamiento con respecto al nivel del piso empeora. La carga de diseño agrega al desplazamiento por cargas gravitacionales de la estructura 9 mm (ver Figuras 54 y 55). Además, al contrastar la deformación bajo cargas cruzadas entre la primera iteración de simulación (supuesto de cable rígido) y la segunda (cable elástico), se nota 5 mm de incremento en longitud del cable. Para compensar tanto el desfase por deflexión de los marcos como la elongación del cable, se recomienda mantener la velocidad del elevador por debajo 0.5 m/s. Debe hacerse notar, que durante condiciones nominales de operación, el carro siempre será elevado por dos cables, por redundancia e incremento en rigidez del sistema de tracción, con una elongación esperada de 2.5 mm en vez de 5 mm.

La distribución de esfuerzos entre las simulaciones estáticas de la primera y segunda

iteración cambió significativamente, al conseguir el cumplimiento del requerimiento de seguridad estructural de $\sigma_{adm} = 74 \text{ MPa}$ para el acero 1018 CD (ver Figuras 51a y 51b contrastadas con las Figuras 56a y 56b). La fuente de error inicial para la primera iteración fue una dimensión incorrecta en CAD, en la posición final del elemento de refuerzo a tracción CD del carro; y a una selección incorrecta para el tubo de sujeción de las poleas superiores. El ajuste de ambas resultó en la reducción del esfuerzo crítico en un factor de 2. Cabe destacar que durante la segunda iteración de simulaciones no se evaluó el caso de cargas alineadas, debido a su orden de magnitud en deformaciones y esfuerzos equivalente al análisis cruzado.

Para poder evaluar el efecto de la curva de respuesta espectral sísmica sobre el ensamble, se extrajeron los modos normales de vibración bajo precarga gravitacional. No se incluyeron los resultados modales bajo precarga de diseño, ya que el alto factor de seguridad de 5 causa que el incremento en esfuerzos no altere significativamente las frecuencias de los modos. Para la primera iteración, puede observarse un incremento abrupto en las frecuencias de resonancia entre los modos 8 y 9 (ver Figura 57). Para los siguientes, las frecuencias incrementan aproximadamente constante. Esto se debe a los elementos con luces largas entre puntos de anclaje y los voladizos del carro, como se refleja en la Figura 59, comparado con los múltiples segmentos de perfiles cortos utilizados como refuerzos en los marcos.

La Figura 58 muestra la relevancia de los modos normales extraídos, ponderándolos según la fracción de masa efectiva que trasladan. Nuevamente se encuentra una división en los datos, donde la mayor cantidad de masa efectiva es trasladada por los primeros 8 modos. En particular, los modos 1 y 3 juegan un papel relevante en las amplitudes en el eje-z, mientras que los modos 4 y 7, en el eje-x. Si bien el resto de modos no aportan más del 5% de fracción de masa efectiva trasladada, se extrajeron 50 modos para exceder el criterio de fracción total de 90% para los ejes críticos (X y Z), como se muestra en el cuadro 30.

La evaluación de frecuencias de modos normales para el caso de precarga gravitacional de la segunda iteración muestra un caso similar al anterior, donde se da un cambio abrupto en frecuencias entre el modo 7 y 8 (ver Figura 60). Sin embargo, la nueva distribución de frecuencias entre los modos 1 y 7 refleja una pendiente más pronunciada. Esto pudo deberse a la restricción de los elementos E_1KJWIH de la estructura en los nodos superiores por medio de una Z de refuerzo. La hipótesis se ve respaldada en la Figura 61, donde se concentró la fracción de masa efectiva en 2 principales modos: 1 y 5. La diferencia en frecuencias entre el modo 1 (6.04 Hz) y el 5 (13.6 Hz) se evidencia en la Figura 62, donde el primero traslada a los elementos de mayor longitud E_1KJWIH de la estructura, mientras que el segundo genera una amplitud relativa máxima en el elemento CD del carro.

La curva de espectro de respuesta sísmica se aplicó independientemente en los dos ejes de interés (X y Z) durante la primera iteración. La Figura 63 muestra el desplazamiento direccional en los ejes X y Z debido a la carga sísmica en el eje Z. Puede notarse la significancia de la orientación del análisis, donde el ensamble se traslada 3 mm en el eje-X, más 39 mm en el eje-Z. Este cambio drástico en comportamiento no se replica en la Figura 64, ya que en el eje-X, los marcos cuentan con mayor inercia. Por lo tanto, para la segunda iteración únicamente se evaluó el caso de carga sísmica en eje-Z, donde la adición del refuerzo superior Z redujo la oscilación de los voladizos de los elementos E_1KJWIH en un factor de 2.

8.2. Simulaciones hidráulicas y de control electrónico

Las Figuras 66 a 72 representan las etapas principales durante la operación del elevador. Durante operación nominal, el elevador en posición elevada (Figura 66) es retenido en su lugar mediante la válvula de control V2. La válvula de contrabalance V1 evita que el carro se desplome repentinamente al generar presión de frenado. En este punto, la puerta puede ser abierta ya que el candado de solenoide está inactivo. La indicación sonora y auditiva del sistema muestra que la máquina está a la espera de instrucciones.

Al llamar al elevador al primer nivel (Figura 67), el candado de la puerta se activa, la indicación visual y auditiva indica precaución por el movimiento del equipo y la válvula V2 se mueve a modo de extender el cilindro. Para el caso de ascenso (Figura 69), la válvula V2 toma su tercera posición, para permitir la contracción del cilindro. Si la operación es nominal (Figura 68), se alcanza el mismo estado descrito para la Figura 66.

De otra manera, en caso de emergencia, ya sea por el uso del botón de emergencia (Figura 70) y por detección de traspaso por la puerta durante ascenso o descenso (Figura 72), el sistema detiene su movimiento. Debido al caso extraordinario de operación, la señal auditiva y visual de precaución se mantiene activa y el candado de la puerta permanece conectado. No es sino hasta el uso del botón de *reset* (Figura 71), que el sistema regresa a operación nominal, con opción de elegir cualquier piso de destino.

8.3. Diseño final, costo de materiales y cumplimiento de requisitos

El diseño final del elevador consta de una estructura y un carro, que interactúan por medio de un sistema de rieles guía descentrado. Esto permitió la optimización de espacio en el carro y la ubicación de los elementos de tracción al plano trasero de la estructura. Se decidió por un cilindro trabajando a tracción, para evitar desgastes por falta de alineación y mitigar problemas de pandeo. Se optó por utilizar un elemento de sujeción del cilindro directamente anclado a el módulo inferior de la estructura, para asegurar el traslado de carga hacia las columnas principales del ensamble y no depender de la integridad del piso (ver Figuras 73 y 74(a)).

Ambos componentes se dividen en módulos, cumpliendo con GEN-ENS-001: Para la estructura, en marcos de estructura, rieles guía, sistema de tracción indirecto mediante un cilindro y un sistema de poleas de multiplicación de desplazamiento y un refuerzo superior Z. Para el carro, un marco para el carro con losa de concreto (ver Figura 74(b)).

Para facilitar el transporte y cumplir con el requisito GEN-ENS-002 en su totalidad, cada módulo puede separarse en subensambles (ver Figura 74(c)). Esto facilita el transporte, cuando los módulos no puedan trasladarse preensamblados. Además, facilita la manipulación de las piezas, para que puedan trasladarse a través de puertas y sitios de baja maniobrabilidad.

En el cuadro 32 se detalla el desglose de costos aproximados para los materiales principales del diseño. Para el cálculo de costos de materiales, se asumieron tasas de impuesto y

transporte del 12% y 30% respectivamente. Además, se fijó el precio del dólar estadounidense a $\$1.00 \approx Q7.80$. Bajo estos supuestos y $Q4,000.00$ contemplados para elementos de unión, platinas, losa, mangueras, acoples y accesorios, se halló un costo total de materiales de $Q48,763.15$, que supera por $Q8,763.15$ el objetivo del proyecto.

Si bien el monto se sobrepasa en un 22% con respecto al estimado inicial, el costo de materiales es menor a la mitad del precio de elevadores de gama media disponibles en Guatemala. Esto, además, incluyendo en la propuesta de valor elementos de alarma visuales y auditivas, controles por sensores y candados electrónicos, sistema de llamada al ascensor programados, dimensiones según normas de accesibilidad; y mitigación de amplitud por carga sísmica, sin trasladar la carga a la estructura del sitio de instalación.

De los 43 requisitos planteados, no se cumplió con 6 (ver cuadro [33](#)):

■ **CAR-HOL-001:**

La luz entre el extremo del carro y el extremo de la estructura, del lado del acceso a ascenso y descenso es superior a los 32 mm. Esto se debe a que se le dio prioridad a la integridad mecánica de la máquina: en caso de funcionamiento anormal, no sería deseable que el carro colisione directamente contra la edificación. Es necesaria la instalación de peldaños auxiliares, que extiendan la superficie del piso hacia el punto de parqueo del carro y actúen como elementos de sacrificio en caso el carro impacte.

■ **CAR-HOL-002:**

No se incluyó en el alcance final del proyecto el diseño del interior del carro. Sin embargo, se diseñó el marco, a modo de aliviar del diseño interior la integridad estructural.

■ **GEN-MEC-007:**

Si bien no se esperan cargas de instalación superiores a las cargas de operación de diseño, no se validó por el alcance del proyecto final. No se incluyó la planificación de instalación en este documento.

■ **HID-CMP-001:**

Se incluyó una válvula de alivio en el diseño hidráulico (ver Figura [46](#)). Sin embargo, quedó fuera del alcance del proyecto la planificación de instalación y calibración del sistema.

■ **STR-HOL-002:**

No se cumplió el requisito, porque se le asignó prioridad a la estabilidad del sistema bajo carga sísmica (mediante el refuerzo en Z) y a la estandarización de los módulos de estructura.

■ **TRA-MEC-003:**

Con un cable de 5/16.º 7.94 mm de diámetro nominal, cada polea debía ser de 317.5 mm de diámetro. Sin embargo, el material en *stock* redondo disponible en Guatemala tiene un diámetro máximo de 300 mm. Por lo tanto, se dimensionó para un diámetro de 276 mm. Debido a las velocidades bajas y el factor de seguridad del cable por encima de 8.25 a la fluencia, no se considera como un riesgo de fatiga la reducción del diámetro.

Conclusiones

1. Se diseñó un elevador residencial compuesto de 4 módulos principales, dos para la estructura, uno para el carro y uno para la tracción, con una carrera máxima de 3.25 m, capacidad máxima de 250 kg y exigencia de potencia durante la elevación de 2 HP.
2. Se diseñó un elevador residencial de dimensiones y elementos de accesibilidad según requisitos de *The American with Disabilities Act* y encuestas de elaboración propia, a un costo de materiales aproximado de Q48,763.15.
3. El objetivo de costos de materiales no se alcanzó, al ser sobrepasado en un 22%. Sin embargo, se incluyeron elementos de seguridad, dimensiones por norma de accesibilidad, mitigación de amplitud por carga sísmica e independencia estructural de la edificación del sitio de instalación como parte de su propuesta de valor.
4. Se diseñó un elevador residencial con dimensiones de la losa del carro de 1.3 m de ancho y 1.7 m de profundidad, según los requisitos de la ADA.
5. De las encuestas recopiladas, se encontró que se favorece un diseño que reduzca el espacio que el elevador ocupe en la residencia, que cuente con botones grandes, señales luminosas y sonoras, con pisos antideslizantes, botón y frenado de emergencia, puertas de apertura grande y tiempo de cierre prolongado, con preferencia de puertas corredizas con ventana sobre puertas abatibles; y capacidad para dos personas.
6. El diseño final del elevador consta de una estructura y un carro, que interactúan por medio de un sistema de rieles guía descentrado. Esto permitió la optimización de espacio en el carro y la ubicación de los elementos de tracción al plano trasero de la estructura.
7. Se seleccionó un sistema de tracción hidráulica indirecta, debido a la robustez del sistema hidráulico ante vibraciones, su simplicidad al no requerir cuarto de máquinas, el menor desgaste en sus componentes, un centro de masa bajo, su precisión en el movimiento y seguridad contra falla en tracción.

8. Se favoreció el diseño de un sistema de tracción hidráulica indirecta en vez de un sistema hidráulico puro por el costo de cilindros de carrera de más de 1.5 m, su escasez en el medio Guatemalteco para diámetros de camisa de 64 mm y su mayor requerimiento de volumen de fluido de trabajo.
9. Se decidió por un cilindro trabajando a tracción, para evitar desgastes por falta de alineación y mitigar problemas de pandeo.
10. Se optó por utilizar un elemento de sujeción del cilindro directamente anclado a el módulo inferior de la estructura, para asegurar el traslado de carga hacia las columnas principales del ensamble y no depender de la integridad del piso.
11. Se diseñó el elevador por medio de subensambles, con dimensiones máximas de 3.3 m x 2.10 m x 0.10 m, a modo tal que pudieran ser transportados en un camión con capacidad de carga máxima de 4.0 m x 1.9 m x 1.9 m y facilitar la instalación.
12. El ensamble completo, incluyendo la losa del carro, cuenta con una masa de 1,400 kg, a modo de poder ser transportado en un camión ligero de capacidad de 3,500 kg.
13. Se favoreció una baja velocidad de operación de 0.16 m/s, debido a la potencia requerida de 2 HP, además del incremento en seguridad por velocidades inferiores a 0.50 m/s.
14. La deformación elástica del cable resulta en un desplazamiento adicional de 5 mm a los 2 mm por deflexión al extremo del carro. Por lo tanto, si bien el sistema opera por encima del factor de seguridad de diseño con uno solo, un cable redundante es necesario para reducir las oscilaciones durante la carga y descarga del carro.
15. La adición del elementos de refuerzo para el voladizo superior de las columnas E_1KJWIH resultó en un incremento en la pendiente de la distribución de frecuencias para los modos normales. Esto se debió a la rigidización del diseño, lo que elevó las frecuencias naturales. Este cambio redujo, además, la oscilación de estos voladizos en un factor de 2.
16. Se observó un efecto significativo de la orientación del análisis de respuesta espectral sobre la estructura, donde la orientación de excitación crítica fue el eje-z, con 39 mm de desplazamiento total previo a los refuerzos.
17. Se incluyeron cuatro botones en el mando de control electrónico del sistema de tracción: elevación, descenso, emergencia y *reset*. Para el control del sistema, se añadieron sensores de final de carrera del carro, traspaso de puertas, un candado solenoide de puertas de seguridad e indicadores lumínicos/sonoros.
18. De los 43 requisitos planteados, no se cumplió con 6. Estos consisten primordialmente en requerimientos de instalación y diseño del cubo del carro, que quedaron fuera del alcance del proyecto.

1. Se recomienda un sistema de compensación PID en tiempo real de la posición del carro para mantener la sensación de estabilidad durante el ascenso y descenso.
2. Se recomienda la adición de un sistema de frenado, controlado por la lógica del elevador, para reducir las oscilaciones durante el ascenso y descenso, además de controlar las aceleraciones del carro.
3. Se recomienda el estudio detallado de los métodos de unión de los submódulos, ya que el número de pernos requeridos podrían necesitar platinas auxiliares para facilitar su instalación.
4. Se recomienda un estudio detallado del sistema de anclaje de la estructura a la losa del pozo, a modo de que resista las cargas dinámicas de operación nominal y las cargas cortantes sísmicas.
5. **CAR-HOL-001:** Se recomienda diseñar peldaños auxiliares, que se anclen a la residencia, a modo de obtener una luz máxima admisible entre el carro y el piso de 32 mm. Estos deben ser capaces de soportar la carga de diseño de 250 kg, además de actuar como elementos de sacrificio en caso de colisión del carro o puertas durante un sismo.
6. **CAR-HOL-002:** Para el diseño del cubo del carro, se recomienda utilizar pisos anti-deslizantes, puertas corredizas con ventanas, ventilación, botones grandes con notación en Braille, pasamanos de tubo a todo el rededor del cubo e iluminación adecuada, según la retroalimentación de las encuestas y criterios de ADA.
7. **GEN-MEC-007:** Se recomienda diseñar el método de instalación, a modo de no sobrepasar las cargas de operación de diseño y reducir el riesgo para los operadores.
8. **HID-CMP-001:** Se recomienda incluir dentro de la planificación de instalación y calibración del sistema, el ajuste de la válvula de alivio y aplicación de torques de precarga en pernos.
9. **STR-HOL-002:** Para reducir riesgo de colisión con el refuerzo superior en Z, se recomienda la instalación de finales de carrera redundantes.

- Acosta, E. & Delgado, O. (2013, noviembre). *Diseño y simulación de un ascensor con carga máxima de 250 kg para personas con capacidades especiales y adultos mayores para ser instalado en viviendas de dos pisos* (Tesis de Grado). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Quito.
- AGIES. (2018a). Normas de Seguridad Estructural para la República de Guatemala (NSE) 1 - Generalidades, Administración de las Normas y Supervisión Técnica. https://conred.gob.gt/normas/NRD1/NSE_1_2018_generalidades_administracion_de_las_normas.pdf
- AGIES. (2018b). Normas de Seguridad Estructural para la República de Guatemala (NSE) 2 - Demandas estructurales y condiciones de sitio. https://conred.gob.gt/normas/NRD1/NSE_2_07112018.pdf
- Andersson, E., Ambramsson, M. & Malmberg, B. (2018). *Patterns of changing residential preferences during late adulthood*. Cambridge University Press.
- Ascensa. (2016). Ascensa Ascensores S.A.: Productos [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <http://ascensa.com/>
- Ascensor Hidráulico. (2020). Consultado el 7 de enero de 2023, desde <https://inforlift.com/ascensor-hidraulico/>
- ASME. (2016). Handbook on Safety Code for Elevators and Escalators [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/a17-1-csa-b44-handbook-safety-code-elevators-escalators?productKey=A1121U:A1121U>
- Board, U. A. (s.f.). U.S. Access Board: Guide to the ADA Accessibility Standards [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://www.access-board.gov/ada/guides/chapter-4-elevators-and-platform-lifts/>
- Bos, J., Dell, R., Nemeth, B., Wei, C. S. & Foley, W. (2014). Developing a Methodology for Comparing the Energy Efficiency of Hydraulic and Traction Elevators. *Volume 6A: Energy*, V06AT07A020. <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-38384>
- Car, B. & para la Atención de las Personas con Discapacidad, C. N. (2020, 29 de noviembre). Manual de normas técnicas de accesibilidad universal. <https://conadi.gob.gt/web/wp-content/uploads/2021/03/Manual-de-Normas-T%C3%A9cnicas-de-accesibilidad-universal-2021.pdf>

- Carmody, B. (2021, 18 de febrero). Verywell health: Best Home Elevators [Recuperado el 12 de agosto de 2021]. <https://www.verywellhealth.com/best-home-elevators-4846169>
- Celik, F. (2005). Elevator Safety in Seismic Regions. *Blain Hydraulics*, 53. http://www.blain.de/wp-content/uploads/2015/12/Elev_safety_in-siesmic_regions.pdf
- Celik, F. & Korbahiti, B. (2006). Why hydraulic elevators are so popular? Part II. *Blain Hydraulics*, 54. https://www.blain.de/wp-content/uploads/2015/12/Why_hydraulic_elevators_are_so_popular-Part2.pdf
- CEN. (2001). *Reglas de seguridad para la construcción e instalación de ascensores*. AENOR.
- Comité Europeo de Normalización. (1998, agosto). UNE-EN81-1:1998 Regla de seguridad para la construcción e instalación de ascensores - Parte 1: ascensores eléctricos. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0025722>
- CONADI-UNICEF. (2016). Informe de la II Encuesta Nacional de Discapacidad en Guatemala. *Obtenido de Oficina Regional de CBM en Latinoamérica*. <https://www.unicef.org/guatemala/media/461/file>
- Control, M. (2017). Motion Control Engineering and Sercom: Ventas [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://www.motioncontrolca.com/servicios/ventas.html>
- Council, I. C. (2018). Chapter 30: Elevators and Conveying Systems [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2018/chapter-30-elevators-and-conveying-systems>
- DG Crane Wheel. (s.f.). Wire rope sheave. <https://www.dgcranewheel.com/wp-content/uploads/download/wire-rope-sheave.pdf>
- Disabled World. (2019, 17 de enero). *Physical and Mobility Impairment Information* [Disabled World]. <https://www.disabled-world.com/disability/types/mobility/>
- Division of Capital Asset Management and Maintenance. (2017, 27 de agosto). Elevator 101: Introduction to Elevator Technology. <https://www.mass.gov/doc/elevator-101-introduction-to-elevator-technology>
- ECA. (2017). Elevadores y Gradas Eléctricas: Elevadores Tipo Residencial ECA [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://elevadoresca.com/servicios/elevadores-tipo-residencial/>
- Elevators, R. (s.f.). Residential Elevators: Cost to Install a Home Elevator [Recuperado el 12 de agosto de 2021]. <https://residencelevators.com/cost-to-install-a-home-elevator/>
- Elevators, T. (2021). TK Elevators: synergy 100 - Calidad y Eficiencia para Edificios Residenciales [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://www.tkelevator.com/gt-es/productos/ascensores/synergy-100/>
- Equipos, A. (2019). Ascensores por Cibes [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <http://cibes.alevoequipos.com/>
- Hemenway, D., Solnick, S., Koeck, C. & Kytir, J. (1994). The incidence of stairway injuries in Austria. *Accident; analysis and prevention*, 26(5), 675-679. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90029-9)
- Herramientas Industriales. (s.f.). Cable de acero: herramientas industriales - Ciudad de Guatemala. Consultado el 8 de octubre de 2022, desde <https://www.herraindustriales.com/copia-de-inicio-4>
- HomeElevators. (s.f.). HomeElevators: Guide to Residential Elevators [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://homeelevators.com/home-elevators-guide/>
- INE. (2019). *Principales Resultados Censo 2018*. Instituto Nacional de Estadística Guatemala.

- Instituto Guatemalteco de Turismo. (2016). Manual técnico de accesibilidad turística universal. <https://inguat.gob.gt/index.php/prensa/comunicados/category/45-guias-turisticas?download=604:manual-accesibilidad-turistica.pdf>
- IPH Global. (2017). Cables de acero para uso general. <https://www.iphglobal.com/uploads/downloads/296763001513024041.pdf>
- Ji, J., Zhang, W., Zhao, W., Yuan, C. & Liu, Y. (2012). Research of Seismic Testing and Dynamic Character of High-rise Building Structure Based on ANSYS. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 6(8), 63-71. <https://doi.org/10.4156/jdcta.vol6.issue8.8>
- Lift, G. (s.f.). Garaventa Lift: Elevador Residencial [Recuperado el 12 de agosto de 2021]. <https://www.garaventalift.com/es/productos/elevador-residencial.html>
- Maldonado, E. (2013, octubre). *Plan de mantenimiento preventivo para elevadores Gen2-Regen* (Tesis de Grado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- MatWeb. (s.f.-a). AISI 1018 cold drawn steel. Consultado el 6 de octubre de 2022, desde <https://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck>
- MatWeb. (s.f.-b). AISI type 304L stainless steel. Consultado el 8 de octubre de 2022, desde <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e2147b8f727343b0b0d51efe02a61ckck=1>
- MatWeb. (s.f.-c). Concrete, 1-4 Dry. Consultado el 6 de octubre de 2022, desde <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=564484d62ed445b085fa0408ee276018&ckck=1>
- Mobility, L. (s.f.). Residential Elevator Prices: How Much Does a Home Elevator Cost in Your Local Area? [Recuperado el 12 de agosto de 2021]. <https://www.lifewaymobility.com/resources/product-guides/how-much-does-a-home-elevator-cost/>
- Muñoz, C. (2016, diciembre). *Análisis y diseño del sistema de tracción de un ascensor residencial* (Tesis de Grado). Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
- Murthy, A. S. & Taylor, D. G. (2018). Control of a Hydraulic Elevator with a Variable-Speed Pump. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2245-2250. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591577>
- NFPA. (2020). National Fire Protection Association: NFPA 5000 [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=5000>
- OMS. (2011). *Informe sobre la Discapacidad 2011*. Organización Mundial de la Salud.
- ONU. (2017). *Living Arrangements of Older Persons: A Report on an Expanded International Datasheet*. ONU.
- Oterino, B. & et.al. (2009). *EVALUACIÓN REGIONAL DE LA AMENAZA SÍSMICA EN CENTROAMÉRICA AL09-PID-23* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. http://redgeomatica.rediris.es/andes/htmls/pdf/Informe_UPM_2009.pdf
- OTIS. (s.f.). OTIS: Residential [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://www.otis.com/es/gt/products-services/industry/residential>
- Pynoos, J. & Regnier, V. (1991). *Improving Residential Environments for Frail Elderly: Bridging the Gap between Theory and Application*. Academic Press, Inc.
- Shrestha, A. (2019, mayo). *Safety considerations for the design of modern elevator systems* (Tesis doctoral). University of Mississippi. Oxford.
- Sjögren, H. & Björnstig, U. (1991). Trauma in the Elderly: The Impact on the Health Care System. *Scandinavian Journal of Primary Health Care*, 9(3), 203-207. <https://doi.org/10.3109/02813439109018519>

- Startzell, J., Owens, D., Mulfinger, L. & Cavanagh, P. (2000). Stair Negotiation in Older People: A Review. *Journal of the American Geriatrics Society*, 48, 567-580.
- Stiltz. (2020). Stiltz Homelifts: Home Lifts Range [Recuperado el 1 de julio de 2021]. <https://www.stiltz.co.uk/home-lifts/>
- Strakosch, G. R. & Caporale, R. S. (Eds.). (2010). *The vertical transportation handbook* (4. ed. [completely rev. and updated]). Wiley.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2016, 30 de noviembre). ASME A17.1-2016/CSA B44-16 Safety Code for Elevators and Escalators. [https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/a17-1-csa-b44-safety-code-elevators-escalators-\(1\)?productKey=A0961V:A0961V](https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/a17-1-csa-b44-safety-code-elevators-escalators-(1)?productKey=A0961V:A0961V)
- Tiedemann, A., Sherrington, C. & Lord, S. (2007). Physical and Psychological Factors Associated With Stair Negotiation Performance in Older People [MEDICAL SCIENCES, 1259-1265.]. *Journal of Gerontology*.
- Uniropo Ltd. (2012). Sheave- and drum dimensions. Consultado el 8 de octubre de 2022, desde <https://www.uniropo.com/sheave-drum-dimensions/>
- United States Access Board. (2015, julio). U.S. Access Board Technical Guide: Elevators and Platform Lifts. *Americans with Disabilities Act: Accessibility Standards*. <https://www.access-board.gov/ada/#ada-407>
- Vladutiu, C., Casteel, C., Marshall, S., McGee, K., Runyan, C. & Coyne-Beasley, T. (2012). Disability and home hazards and safety practices in US households. *Disability and Health Journal*, 49-54.
- Wee, J. & Lysaght, R. (2009). Factors affecting measures of activities and participation in persons with mobility impairment. *Disability and Rehabilitation*, 31(20), 1633-1642. <https://doi.org/10.1080/09638280902736346>
- Zhao, Y., Kupferstein, E., Tal, D. & Azenkot, S. (2018a). *It Looks Beautiful but Scary": How Low Vision People Navigate Stairs and Other Surface Level Changes*. Association for Computing Machinery.
- Zhao, Y., Kupferstein, E., Tal, D. & Azenkot, S. (2018b). it looks beautiful but scary": How low vision people navigate stairs and other surface level changes. *Proceedings of the 20th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, 307-320. <https://doi.org/10.1145/3234695.3236359>

12.1. Formato de encuesta para criterios clave de un elevador residencial

En esta sección se presenta el formato utilizado para la recopilación de respuestas sobre los criterios de accesibilidad para un elevador residencial en el contexto guatemalteco.

12.2. Planos de construcción

A continuación se detallan los planos del ensamble general del diseño, BOM general, vistas en explosión de los módulos y subensambles, además de dimensiones generales de los elementos estructurales.

Elevador residencial para personas con movilidad reducida y personas mayores en Guatemala

Encuesta para diseño del primer prototipo de interacción con el usuario.

*Obligatorio

Consentimiento informado

Como proyecto de graduación para el título de Licenciado en Ingeniero Mecánico Industrial, en la Universidad del Valle de Guatemala, se está realizando una investigación con respecto a las características que los guatemaltecos con discapacidad de movilidad y personas mayores requerirían de un elevador residencial.

Si usted decide participar en este cuestionario, se le solicitará que responda a 10 preguntas. Esta encuesta es completamente voluntaria, por lo que, si desea no contestar alguna pregunta, puede dejarla en blanco. Su relación con la Universidad del Valle de Guatemala y con el personal docente del departamento de Ingeniería Mecánica y Mecánica Industrial no se verá afectada si decide no participar.

Por cuestiones de seguridad, no serán divulgadas sus respuestas específicas. Su identidad, información de contacto y cualquier dato personal será protegido y será restringido al equipo de investigación. Solamente el investigador y asesor de este proyecto tendrán acceso a su cuestionario. Ninguna de sus respuestas se vinculará a su nombre.

Es posible que algunas preguntas puedan parecerle personales o hacerle sentir incómodo, debido al enfoque del proyecto. Si se diese el caso de no desear contestar cualquier pregunta, está en la libertad de hacerlo. Al contestar las preguntas de la encuesta, usted estará ayudando al desarrollo de la investigación y a concluir acerca de las necesidades de las personas con movilidad reducida guatemaltecas para el año 2022.

Si usted tiene alguna pregunta sobre esta investigación o sobre el cuestionario, puede preguntarle a la persona que le presente tal documento o contactar directamente al investigador, a la dirección electrónica especificada a continuación:

César Antonio Saavedra Monterroso, estudiante de Lic. Ing. Mecánica Industrial, Universidad del Valle de Guatemala.

Correo: saa17415@uvg.edu.gt

1. Al indicar «Acepto formar parte de esta encuesta» en la siguiente opción, usted indica que ha leído y comprendido la información del consentimiento informado o se le ha leído en voz alta y se le ha aclarado. Con esto, usted está de acuerdo con su participación, tiene claro que puede dejar de contestar cualquier pregunta que no desee responder y que tiene derecho a recibir una copia de esta encuesta para poder conservarla. *

Marca solo un óvalo.

- Acepto formar parte de esta encuesta
- No deseo continuar

Consideraciones generales de elevadores

2. ¿Qué factores consideraría críticos para decidir si invertir en un elevador residencial o no?

Selecciona todos los que correspondan.

- El espacio que ocupe en la residencia
- Velocidad de ascenso o descenso baja
- Velocidad de ascenso o descenso sea alta
- Frenado y aceleración bajos
- Botones y señales accesibles
- Estabilidad al subirse o bajarse
- Tamaño de la puerta
- Tamaño del cubículo del elevador
- Acabados interiores
- Existencia de una baranda
- Visibilidad al interior del carro (paredes del elevador con vidrio, rejillas, etc.)
- Apertura automática de las puertas
- Nivel de ruido
- Consumo de potencia
- Capacidad de carga
- Otro: _____

3. ¿Qué capacidad, en número de personas, consideraría razonable para un elevador residencial enfocado en personas con discapacidad de movilidad o de edad avanzada?

Marca solo un óvalo.

Número de Personas

1

2

3

4

5

Experiencia con elevadores

4. ¿Qué características considera positivas de los elevadores que usted ha utilizado?

5. ¿Qué características considera negativas de los elevadores que usted ha utilizado?

Consideraciones de accesibilidad e interacción con el elevador

6. ¿Qué cambiaría o mantendría con respecto a los botones y señales dentro y fuera de la cabina de los elevadores que ha utilizado?

Selecciona todos los que correspondan.

- Botones más pequeños
 Botones más grandes
 Botones más cercanos al piso del elevador
 Botones más alejados al piso del elevador
 Señalización en Braille más grande
 Señalización en Braille más compacta
 Sonidos y alarmas más intensos
 Sonidos y alarmas más atenuados
 Mayor señalización luminosa
 Menor señalización luminosa
 Uso de señales luminosa con códigos de colores
 Distribución de los botones en las paredes interiores del elevador más espaciada
 Distribución de los botones en las paredes interiores del elevador más compacta
 Botones en el interior del elevador más cercanos a las puertas
 Botones en el interior del elevador
 Otro: _____

7. ¿Qué cambiaría o mantendría de las puertas de los elevadores que ha utilizado?

Selecciona todos los que correspondan.

- Puertas de apertura y cierre automáticos
 Puertas de accionamiento manual
 Puertas abatibles
 Puertas deslizantes
 Apertura de entrada más grande
 Apertura de entrada más pequeña
 Puerta con ventana o transparente
 Puerta no transparente
 Tiempo de espera más prolongado antes del cierre automático
 Tiempo de espera más corto antes del cierre automático
 Otro: _____

8. ¿Qué cambiaría o mantendría de los pisos, superficies o iluminación de los elevadores que ha utilizado?

Selecciona todos los que correspondan.

- Iluminación más cálida
- Iluminación más fría
- Mayor intensidad de la iluminación
- Menor intensidad de la iluminación
- Implementar iluminación a la entrada del elevador
- Pisos antideslizantes
- Piso cerámico
- Piso metálico
- Paredes metálicas sólidas
- Paredes con ventanas
- Paredes completamente transparentes
- Paredes con rejillas de ventilación más grandes
- Paredes con rejillas de ventilación más pequeñas
- Otro: _____

9. ¿Qué medidas de alarma o seguridad desearía que tuviera un elevador residencial, si usted decidiera adquirir uno?

Selecciona todos los que correspondan.

- Frenos de emergencia
- Descenso manual del elevador, accionado desde el exterior
- Alarmas auditivas y visuales
- Alarma de sobrecarga
- Iluminación con energía de respaldo
- Visibilidad al exterior del carro del elevador
- Botón de alarma de emergencia
- Prevención de movimiento con puertas abiertas
- Otro: _____

10. ¿Preferiría usted una puerta de tipo abatible o una corrediza en un elevador residencial, si usted decidiera adquirir uno?

Marca solo un óvalo.

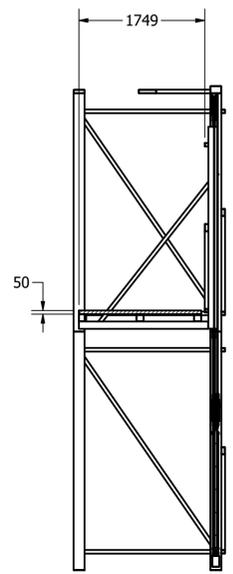
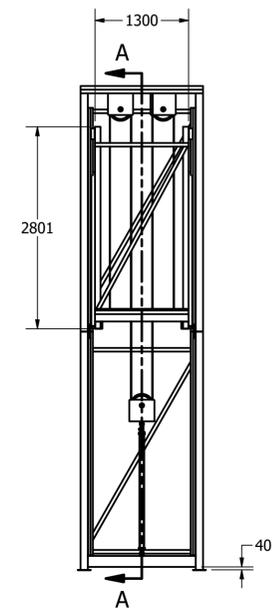
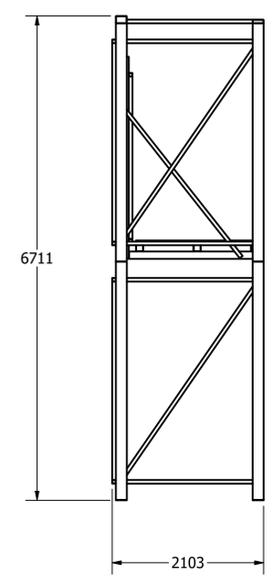
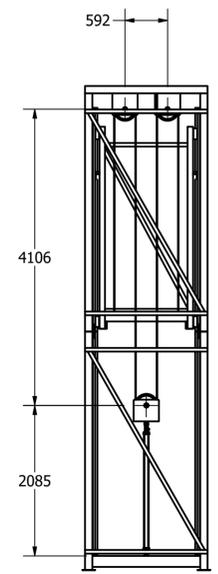
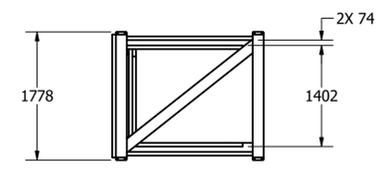
- Puerta abatible
- Puerta corrediza
- Otro: _____

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

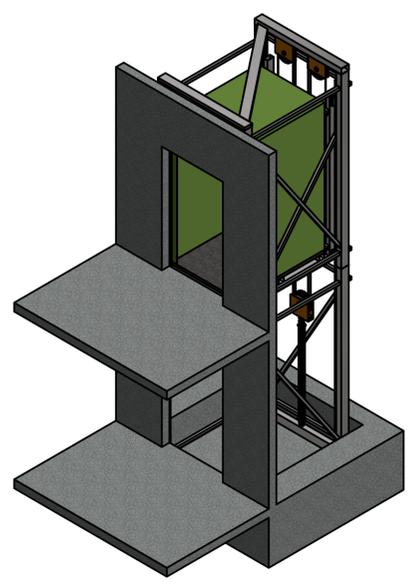
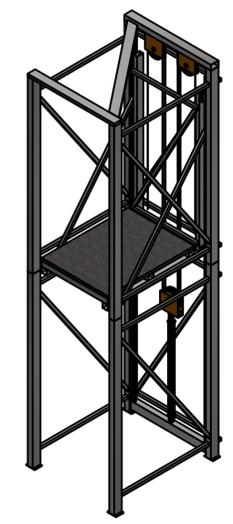
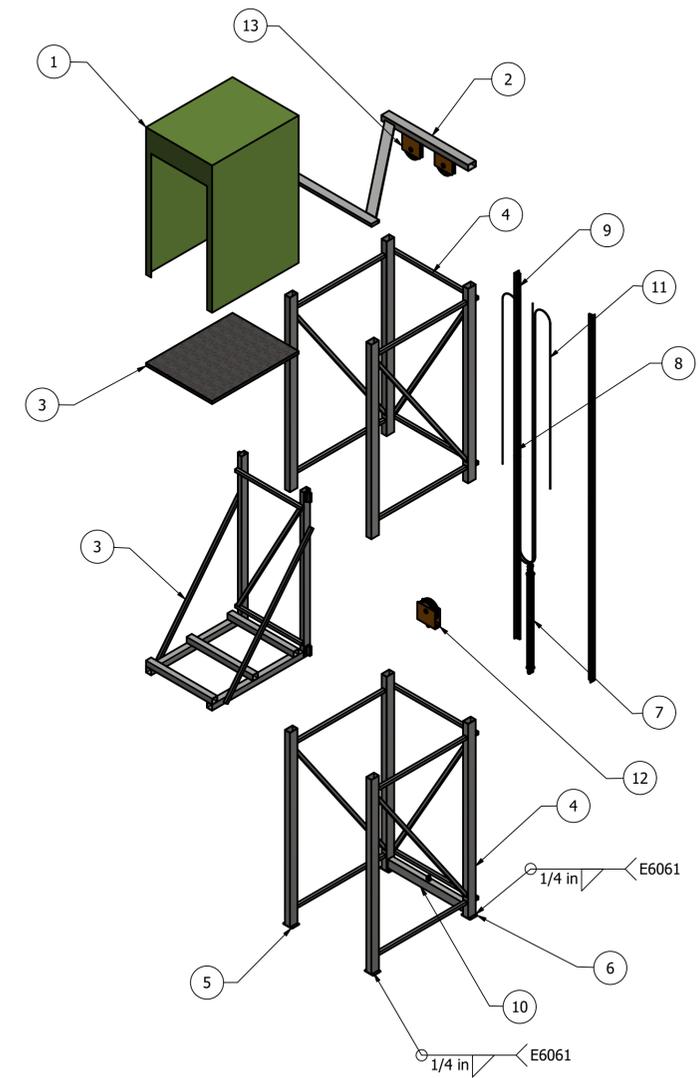
Google Formularios

HISTORIAL DE REVISIONES			
REV	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO POR
A	PUBLICACIÓN INICIAL	07/05/2023	R. ARAGÓN

LISTADO DE PARTES			
ITEM	CANT.	No. DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	1	ELE-CAR-CUB-001	Mockup de cubo
2	1	ELE-CAR-GUI-002	Perfil superior de tracción
3	1	ELE-CAR-MAR-001	Base inferior
4	2	ELE-EST-MAR-001	Estructura de rieles
5	2	ELE-EST-MAR-002	Platinas base
6	2	ELE-EST-MAR-003	Platinas base largas
7	1	ELE-HID-CIL-001	Cilindro hidráulico
8	4	EST-GUI-001	Fishplate de alineación de guías
9	4	EST-MAR-004	Estructura de rieles
10	1	HID-CIL-003	Ensamble de sujeción inferior
11	2	TRA-CBL-001	Cable de tracción
12	1	TRA-POL-003	Placa secundaria de sujeción de poleas al cilindro
13	2	TRA-POL-006	Sujeción de poleas al cilindro secundarias

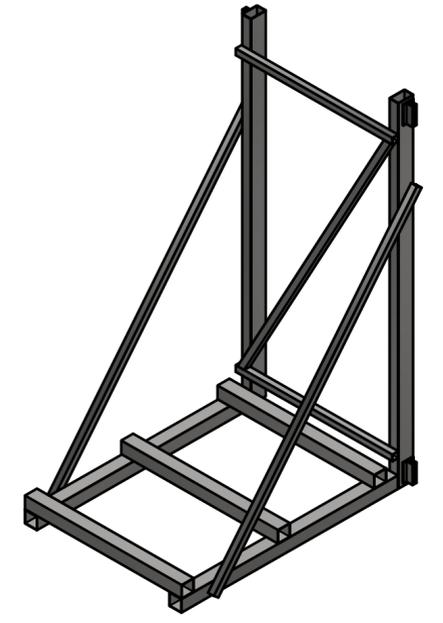
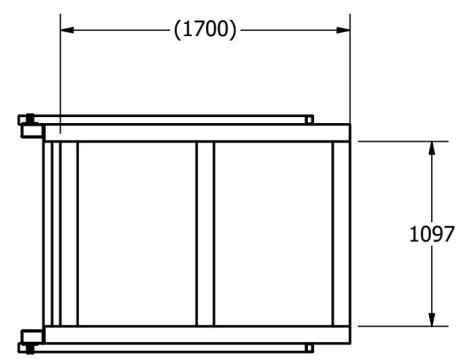
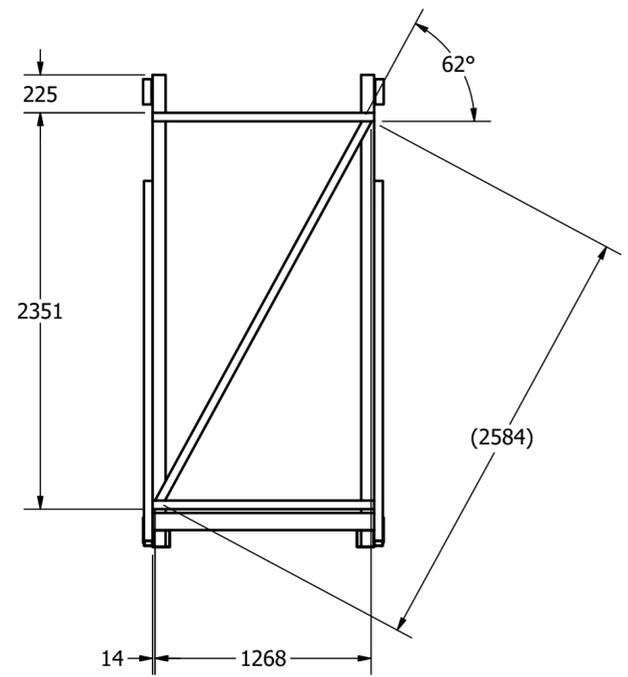
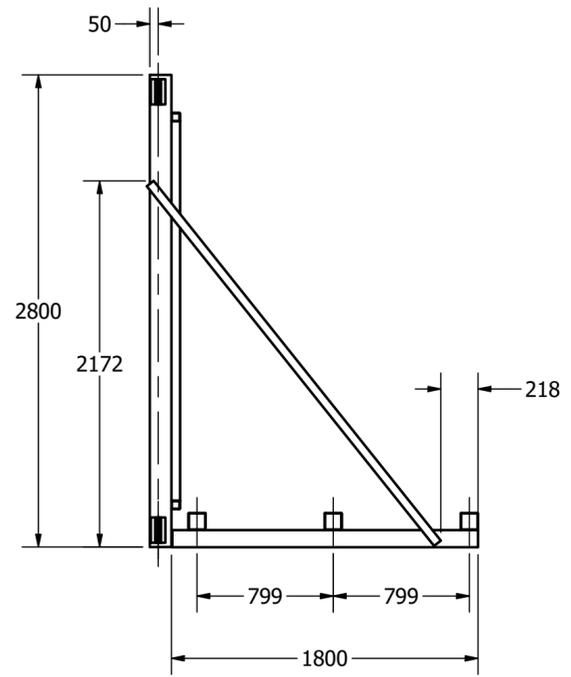
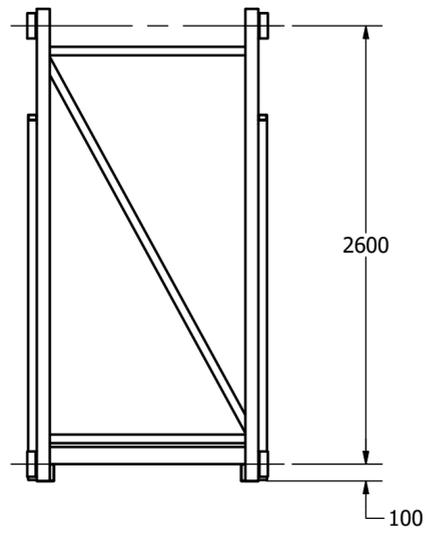
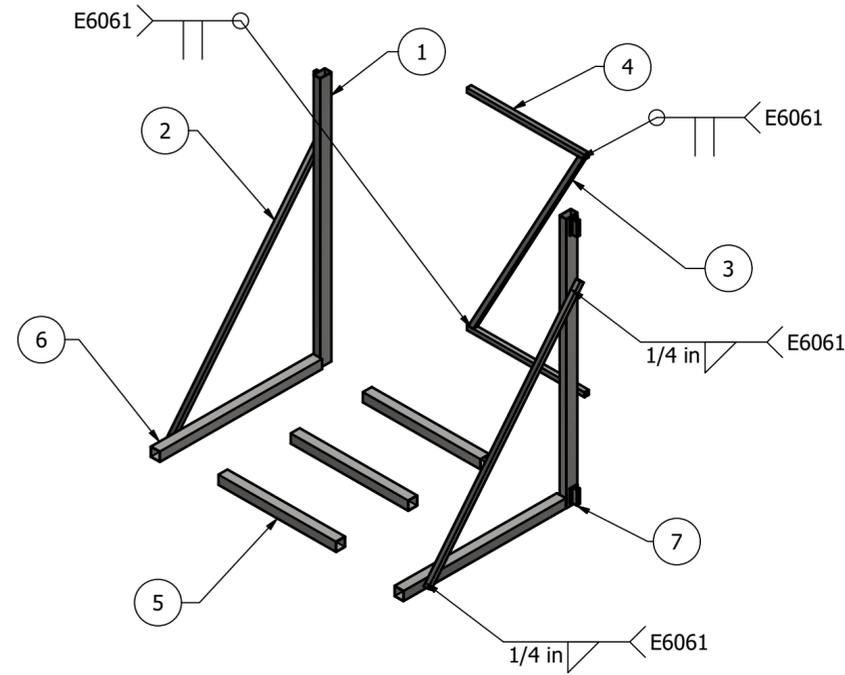


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 / 50



TOLERANCIAS GENERALES LINEAL: .X ± 1.0 ANGULAR: ± 1° FRACCIONES: 1/32 RUGOSIDAD SUPERFICIAL: ✓		DISEÑADO POR: C. SAAVEDRA REVISADO POR: R. ARAGÓN APROBADO POR: R. ARAGÓN	FECHA: 2023/02/26 FECHA: 2022/11/01 FECHA: 2023/05/07 FECHA: 2023/05/07	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 TEL: (502) 2524-0336 / 40 info@uvg.edu.gt
MATERIAL: - TRATAMIENTO: - MASA: 1408.250 kg		TRABAJO DE GRADUACIÓN TITULO: ELEVADOR DOMÉSTICO PARA PERSONAS DISCAPACITADAS		NÚMERO DE DIBUJO: 1 ESCALA: 1:50 UNIDADES: mm PÁGINA 1 DE 16 REV A

LISTADO DE PARTES			
ITEM	QTY	No. DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	220 in	AISC - 5" x 3" x 1/8" - 110"	ACERO 1018
2	214 in	ASTM A513 - 2" x 2" x 1/8" - 107"	ACERO 1018
3	102 in	ASTM A513 - 2" x 2" x 1/8" - 102"	ACERO 1018
4	102 in	ASTM A513 - 2" x 2" x 1/8" - 51"	ACERO 1018
5	154 in	ASTM A513 - 4" x 4" x 1/8" - 51"	ACERO 1018
6	141 in	ASTM A513 - 4" x 4" x 1/8" - 71"	ACERO 1018
7	4	ELE-CAR-GUI-001 Guia para riel	

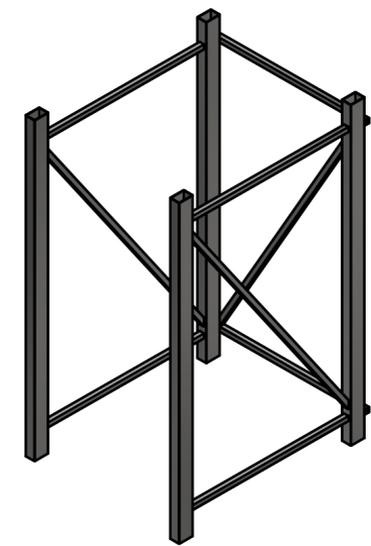
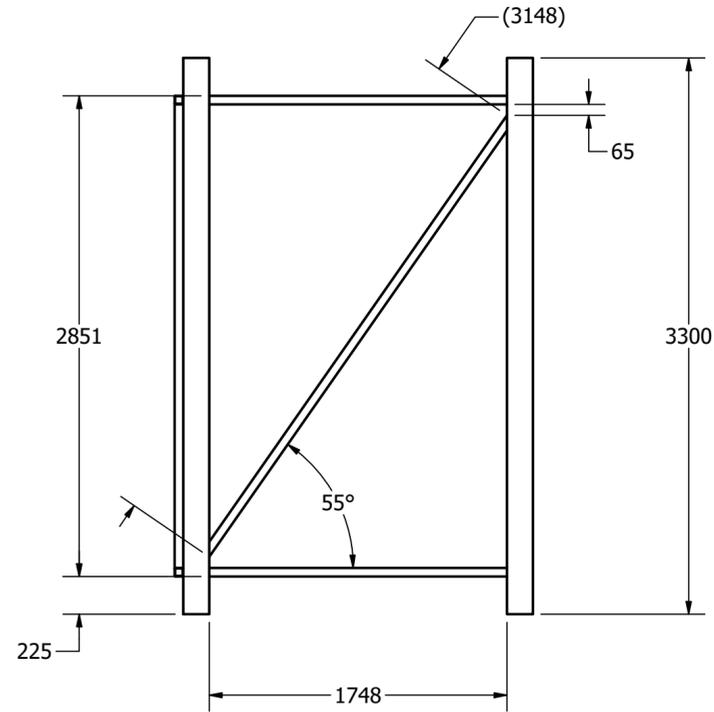
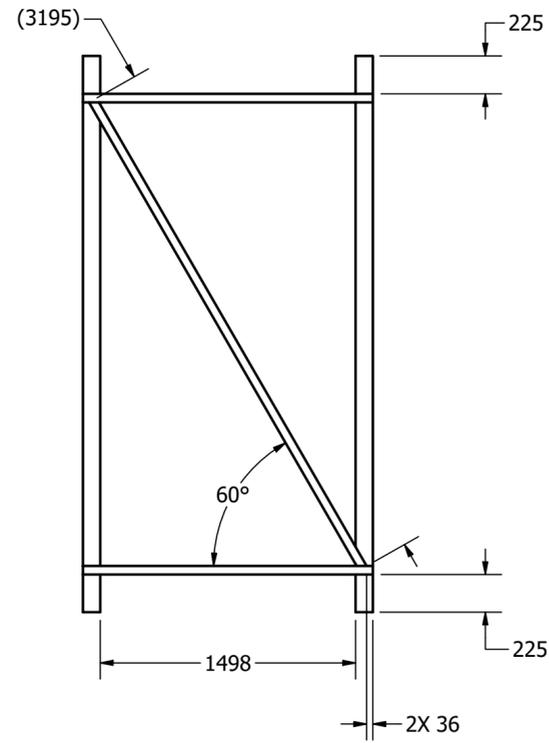
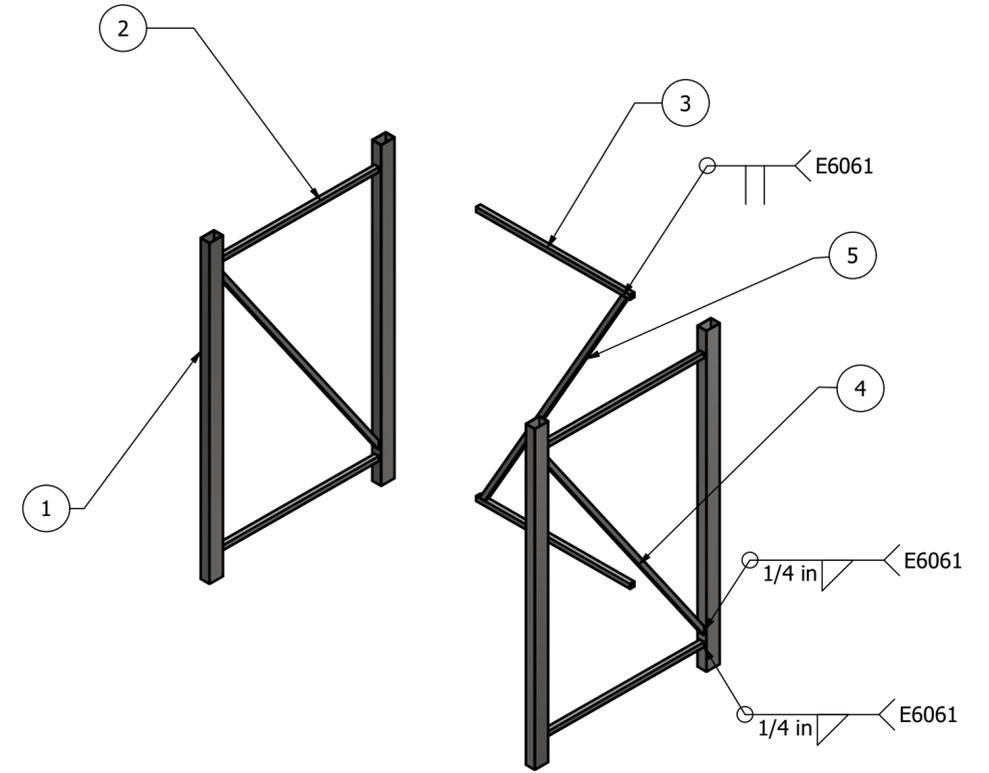
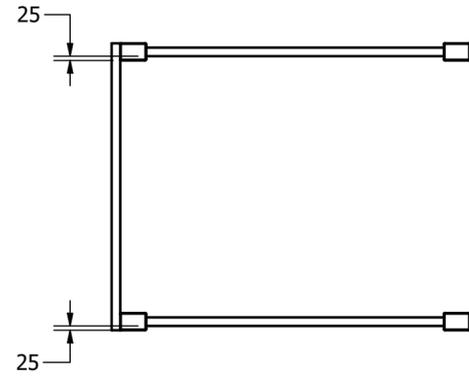


NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.
2. APLICAR PINTURA ANTICORROSIVA A LAS SUPERFICIES EXTERIORES, POSTERIOR A LA SOLDADURA.

TÍTULO: ELE-CAR-MAR-001		
Base inferior (Carro)		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO: C	ESCALA: 1:30	UNIDADES: mm
PÁGINA 2 DE 16		REV A

LISTADO DE PARTES			
ITEM	CANT.	No. DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	520 in	AISC - 6" x 4" x 1/8" - 130"	ACERO 1018
2	275 in	ASTM A513 - 2 x 2 x 1/8" - 69"	ACERO 1018
3	134 in	ASTM A513 - 2 x 2 x 1/8" - 67"	ACERO 1018
4	248 in	ASTM A513 - 2 x 2 x 1/8" - 124"	ACERO 1018
5	126 in	ASTM A513 - 2 x 2 x 1/8" - 126"	ACERO 1018



NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.
2. APLICAR PINTURA ANTICORROSIVA A LAS SUPERFICIES EXTERIORES, POSTERIOR A LA SOLDADURA.

TÍTULO: ELE-EST-MAR-001		
Estructura de rieles		
NÚMERO DE DIBUJO: 2		
FORMATO: C	ESCALA: 1:30	UNIDADES: mm
PÁGINA 3 DE 16		REV A

2



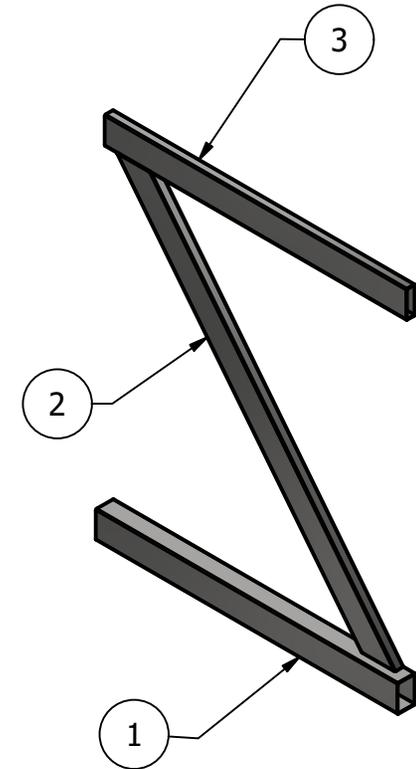
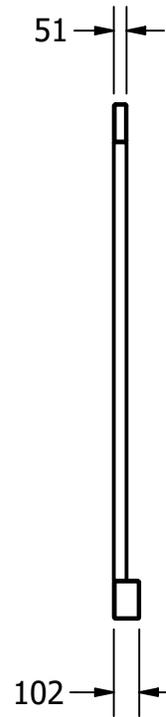
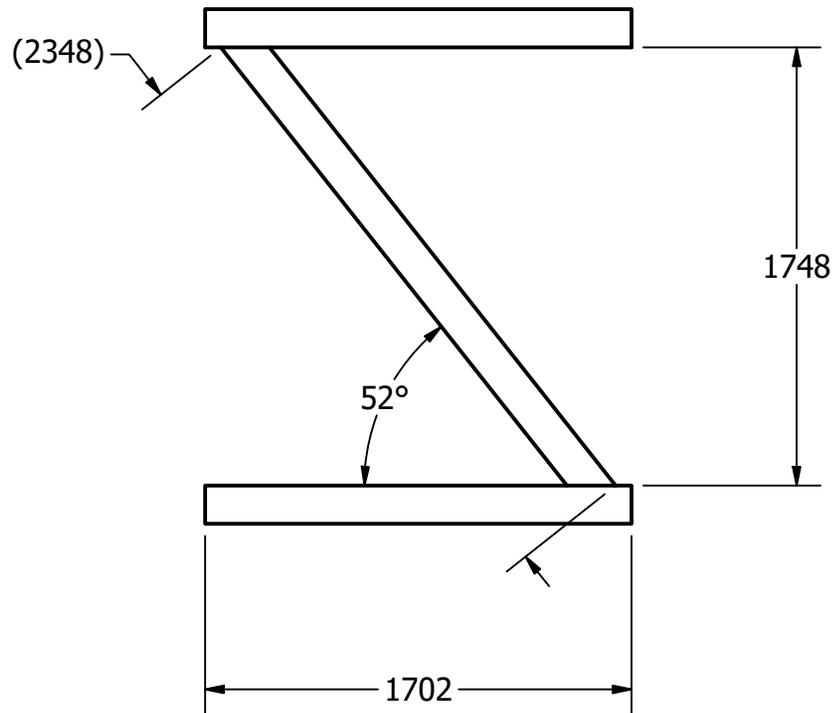
1

LISTADO DE PARTES

ITEM	CANT.	No. DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	67 in	AISC - 6" x 4" x 1/8" - 67"	ACERO 1018
2	93 in	AISC - 6" x 2" x 1/8" - 93"	ACERO 1018
3	67 in	AISC - 6" x 2" x 1/8" - 67"	ACERO 1018

B

B



B

A

A

NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.
2. APLICAR PINTURA ANTICORROSIVA A LAS SUPERFICIES EXTERIORES, POSTERIOR A LA SOLDADURA.

TÍTULO: CAR-GUI-002
 Perfil superior de tracción (Z)

NÚMERO DE DIBUJO: 3

FORMATO ESCALA: 1:30 UNIDADES: mm

A

PÁGINA 4 DE 16

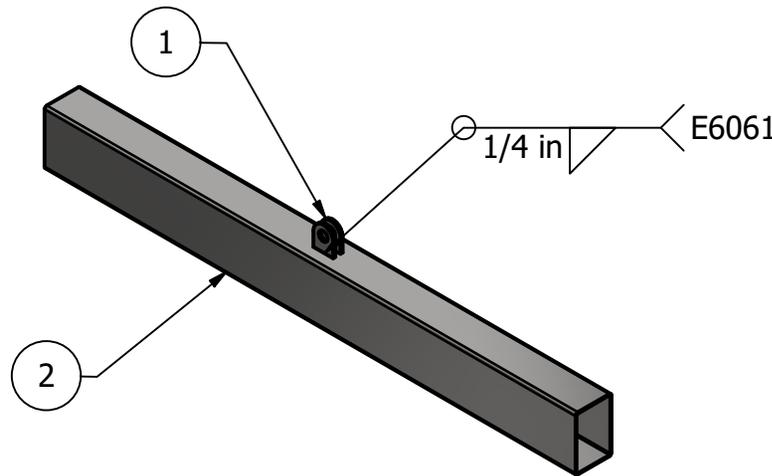
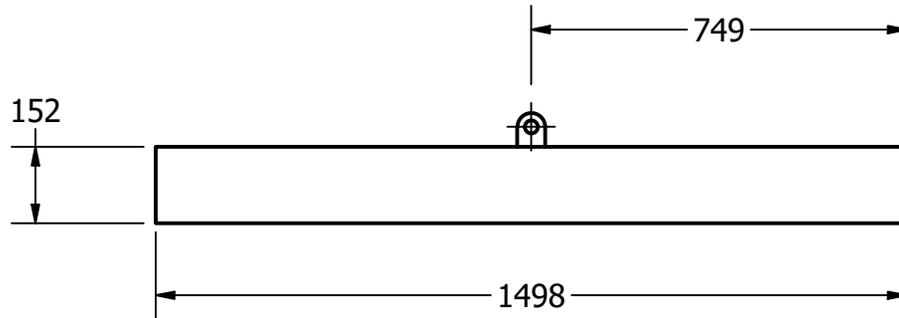
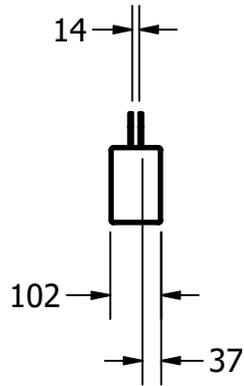
REV
A

2



1

LISTADO DE PARTES			
ITEM	CANT.	No. DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	2	HID-CIL-002 Oreja de sujeción inferior	ACERO 1018
2	59 in	AISC - 6" x 4" x 1/8" - 59"	ACERO 1018

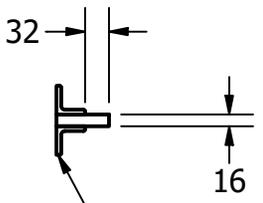
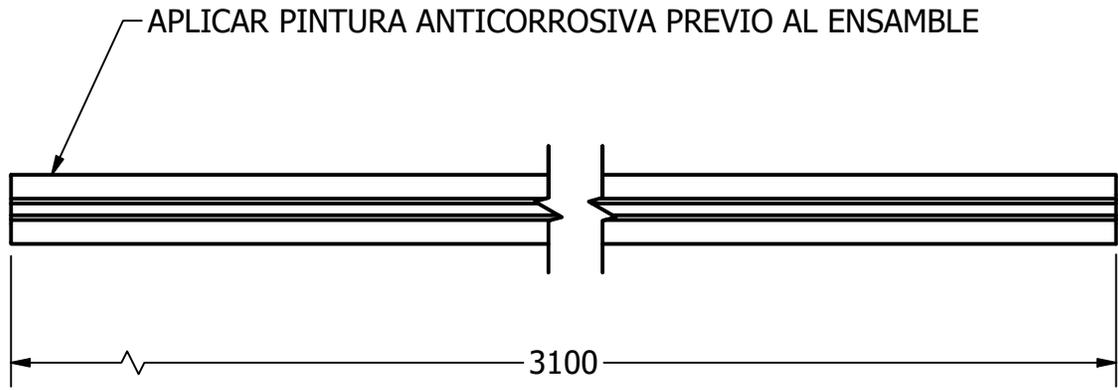
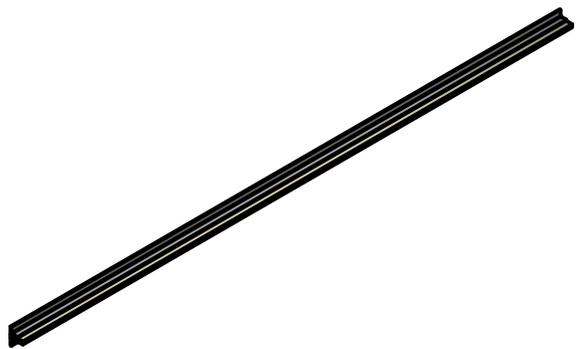


NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.
2. APLICAR PINTURA ANTICORROSIVA A LAS SUPERFICIES EXTERIORES, POSTERIOR A LA SOLDADURA.

TÍTULO: HID-CIL-003		
Ensamble de sujeción inferior		
NÚMERO DE DIBUJO: 4		
FORMATO	ESCALA: 1:15	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 16	REV A

LISTADO DE PARTES			
ITEM	CANT.	No. DE PARTES	DESCRIPCIÓN
1	122 in	AISC - 2 3/4" x 5/8" - 122"	ACERO 1018
2	244 in	AISC - L 1.5" x 1.5" x 1/4" - 122"	ACERO 1018



APLICAR PINTURA ANTICORROSIVA PREVIO AL ENSAMBLE

TÍTULO: EST-MAR-004		
Ensamble de rieles guía		
NÚMERO DE DIBUJO: 5		
FORMATO	ESCALA: 1:10	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 6 DE 16	REV A

4

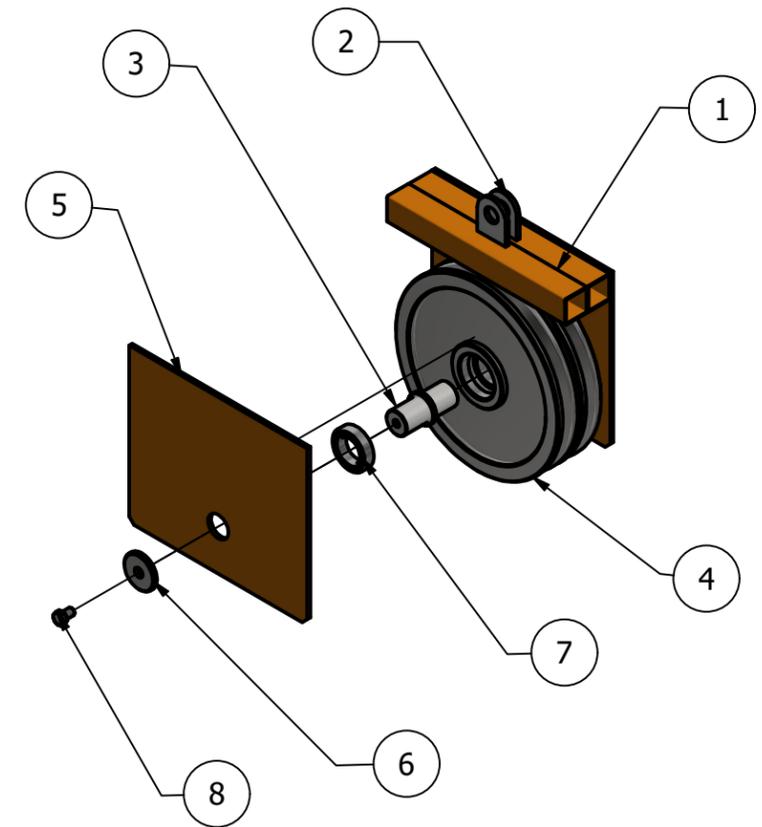
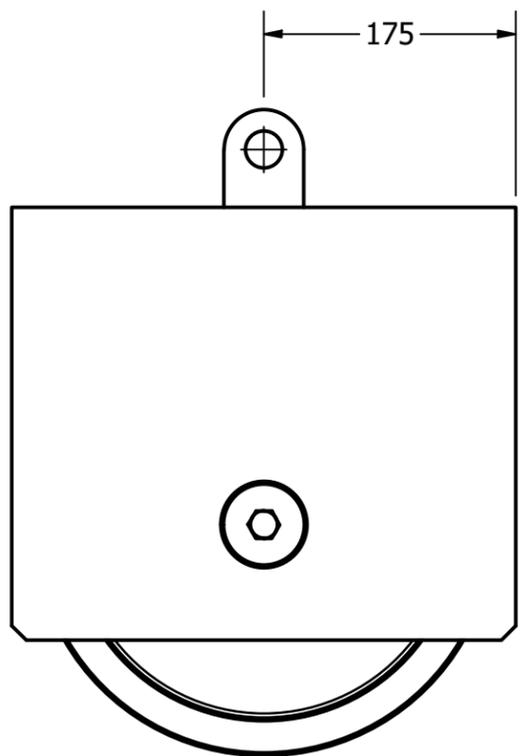
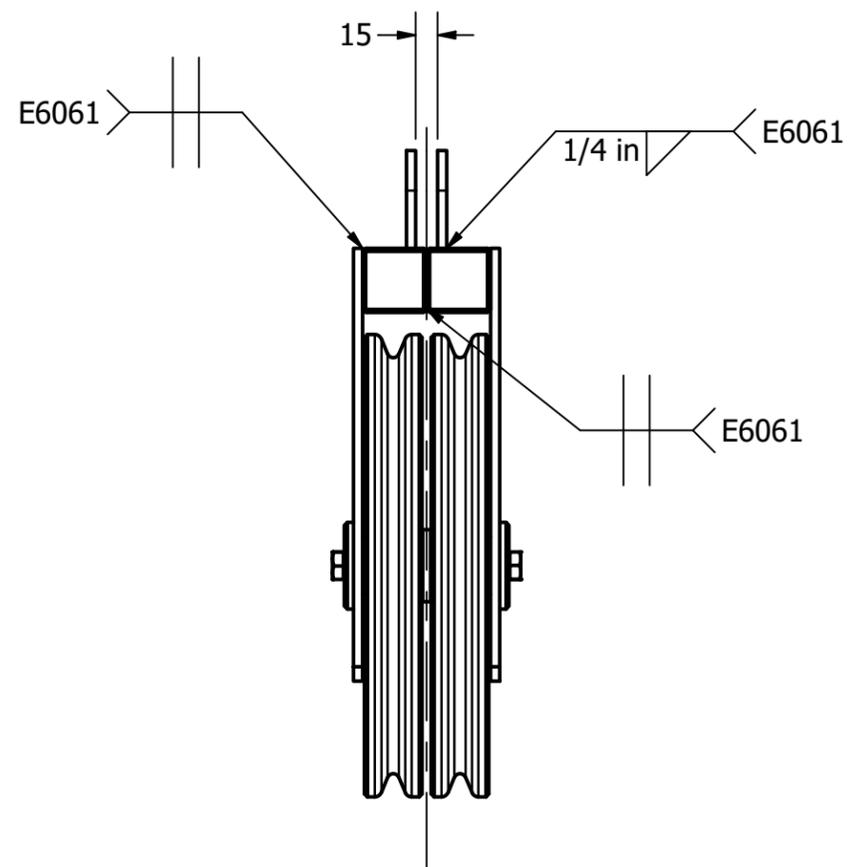
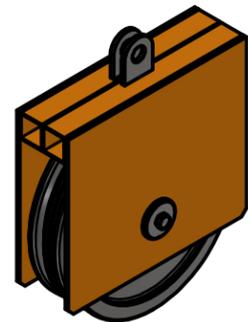
3

2

1

LISTADO DE PARTES			
ITEM	CANT.	No. DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	28 in	ASTM A513 - 1 3/4" x 1 3/4" x 1/8" - 14"	ACERO 1018
2	2	HID-CIL-002 Oreja de sujeción inferior	ACERO 1018
3	1	EJE DE POLEAS AL CILINDRO	ACERO 1045
4	2	TRA-POL-001 Polea de tracción	ACERO 1018
5	2	TRA-POL-003 Placa secundaria de sujeción de poleas al cilindro	ACERO 1018
6	2	TRA-POL-005 Seguro para eje de polea	ACERO 1018
7	4	BS 290 SKF - SKF 6008-2RS1	
8	2	AS 2465 - 1/2 x 3/4 UNC	CABEZA HEXAGONAL

APLICAR PINTURA ANTICORROSIVA
POSTERIOR A LA SOLDADURA



TÍTULO: TRA-POL-004		
Sujeción de poleas al cilindro		
NÚMERO DE DIBUJO: 6		
FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 7 DE 16	REV A

4

3

2

1

4

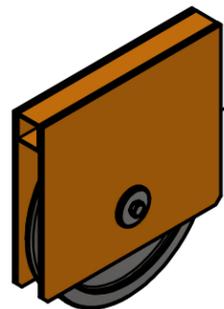
3

2

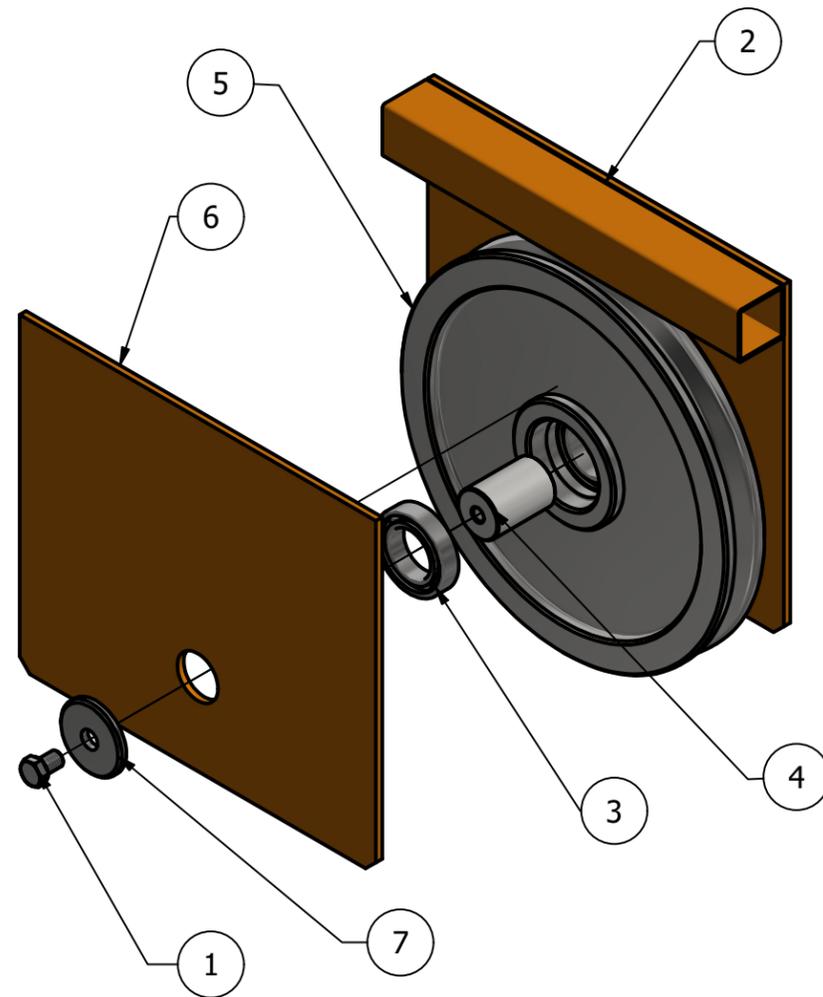
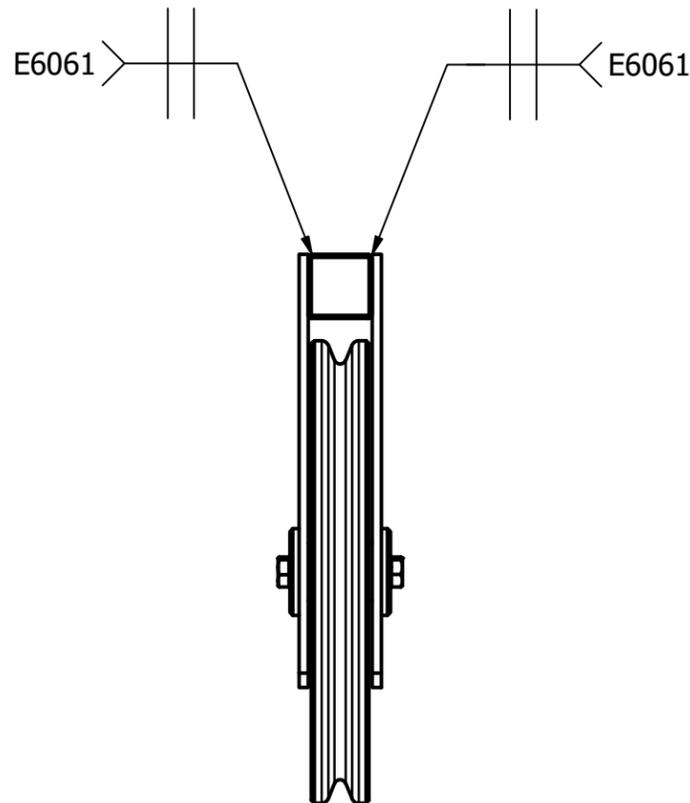
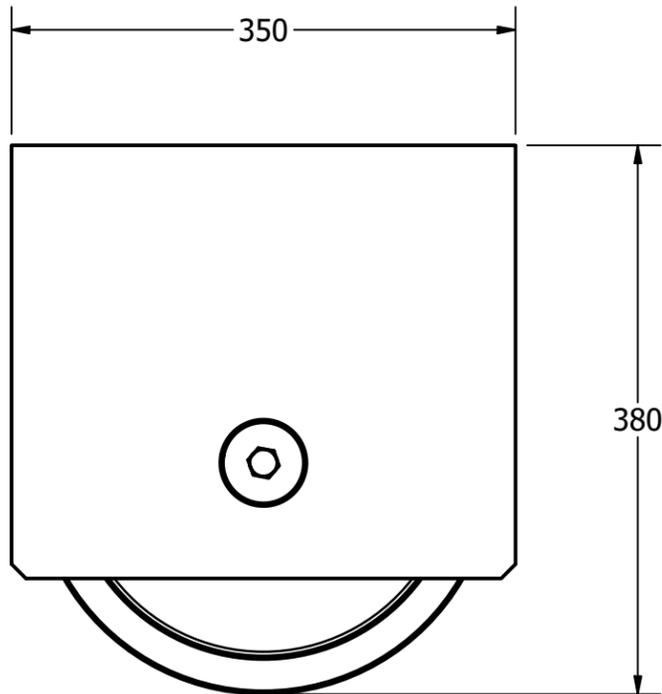
1

PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	2	AS 2465 - 1/2 x 3/4 UNC	CABEZA HEXAGONAL
2	14 in	ASTM A513 - 1 3/4" x 1 3/4" x 1/8" - 14"	ACERO 1018
3	2	BS 290 SKF - SKF 6008-2RS1	
4	1	EJE PARA POLEAS SECUNDARIAS	ACERO 1045
5	1	TRA-POL-001 Polea de tracción	ACERO 1018
6	2	TRA-POL-003 Placa secundaria de sujeción de poleas al cilindro	ACERO 1018
7	2	TRA-POL-005 Seguro para eje de polea	ACERO 1018



APLICAR PINTURA ANTICORROSIVA
POSTERIOR A LA SOLDADURA



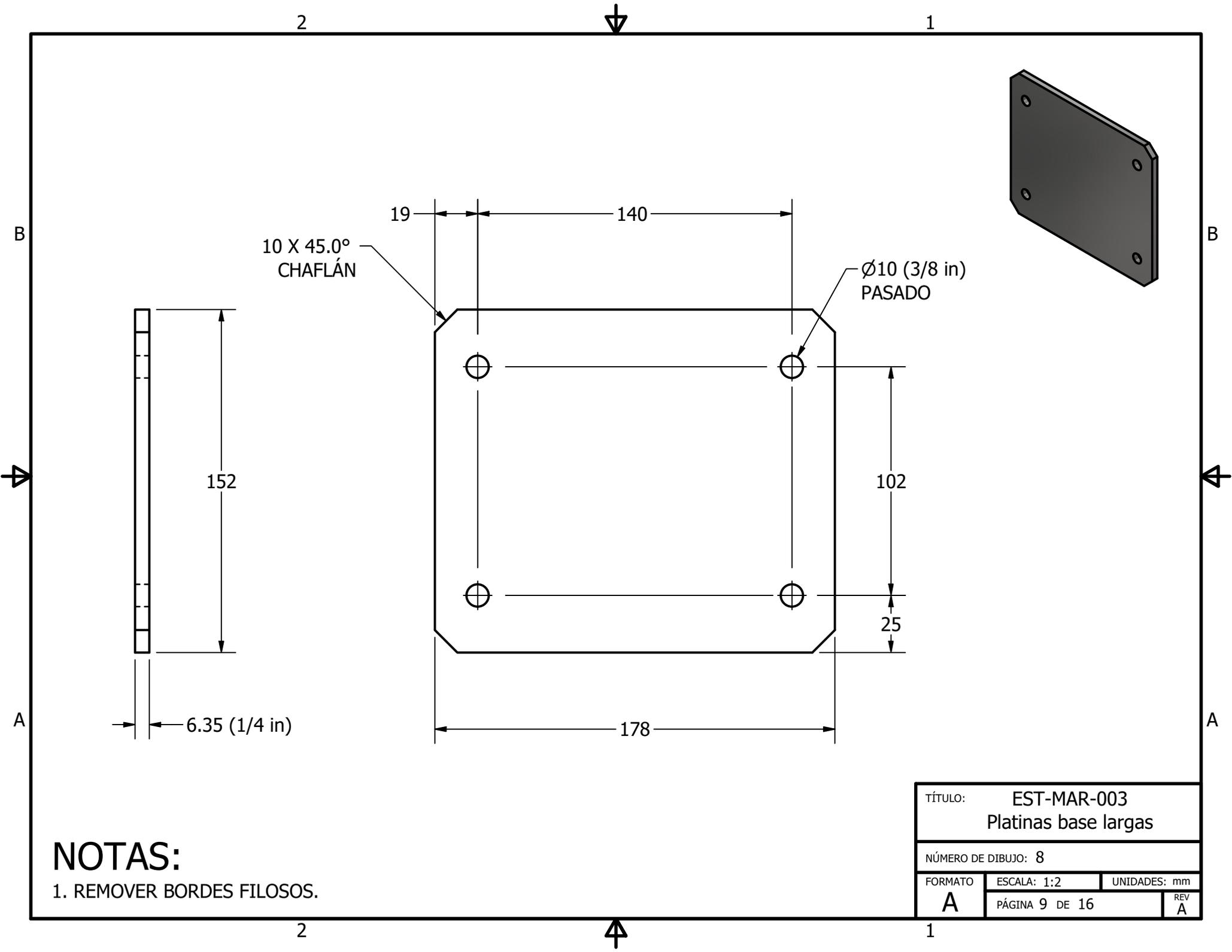
TÍTULO: TRA-POL-006		
Sujeción de poleas secundarias		
NÚMERO DE DIBUJO: 7		
FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 8 DE 16	REV A

4

3

2

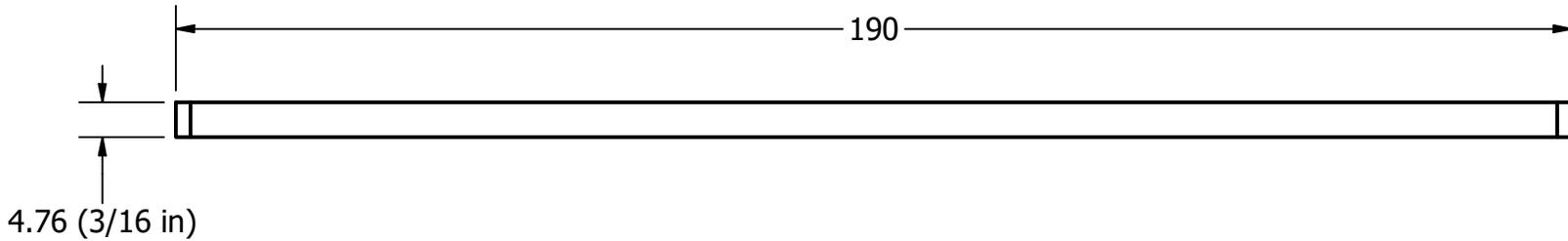
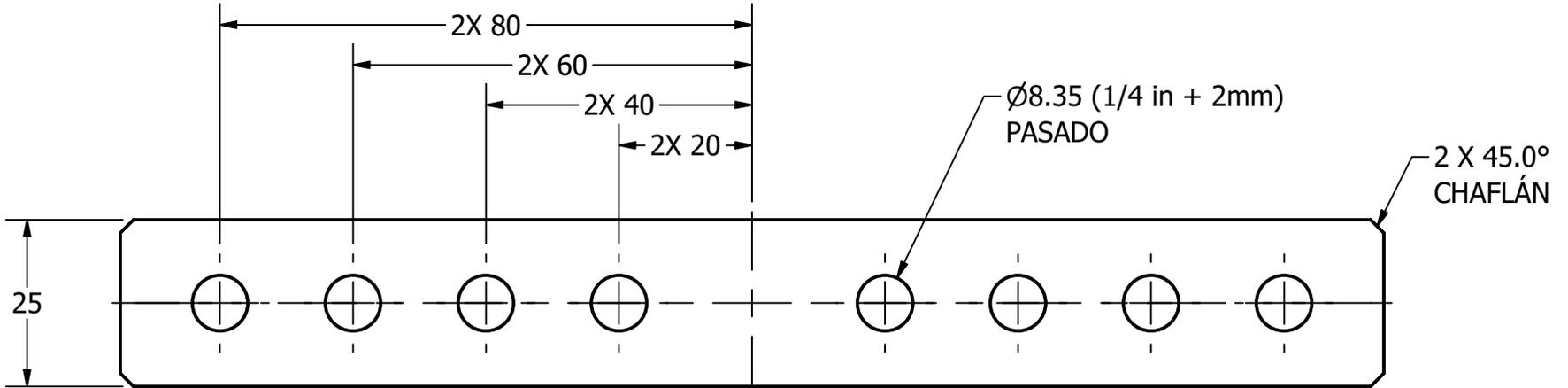
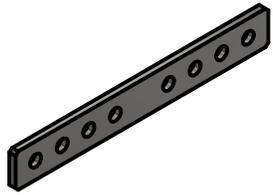
1



NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.

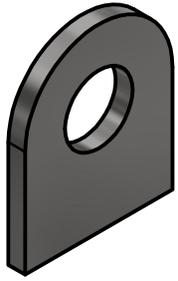
TÍTULO: EST-MAR-003		
Platinas base largas		
NÚMERO DE DIBUJO: 8		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 9 DE 16	REV A



NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.

TÍTULO: EST-GUI-001		
Fishplate de alineación		
NÚMERO DE DIBUJO: 9		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 10 DE 16	REV A



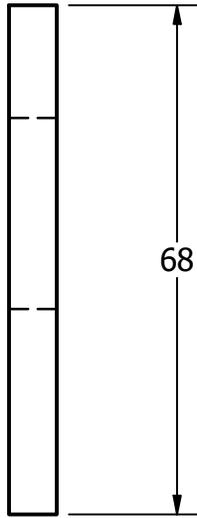
2



1

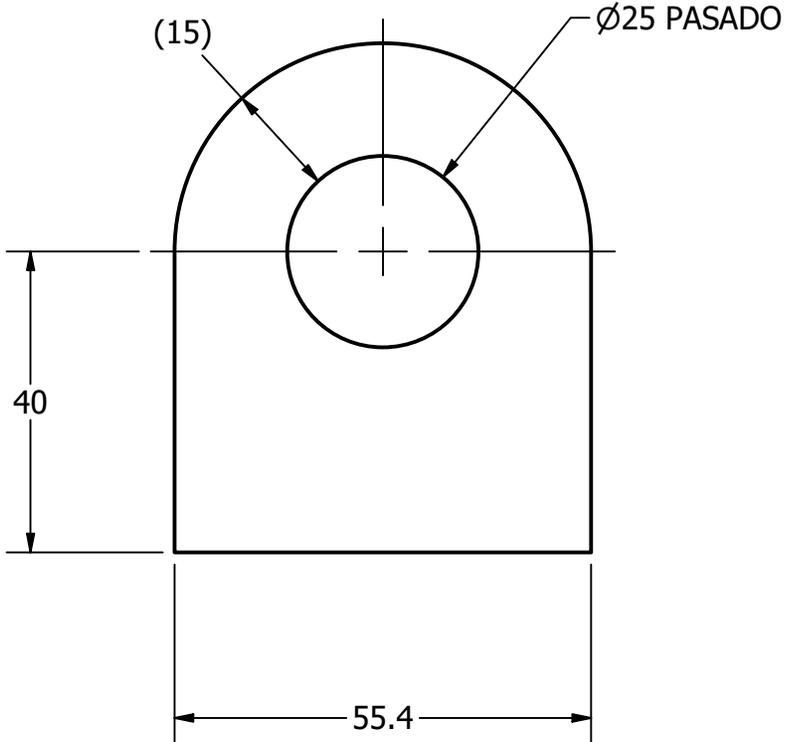
B

B



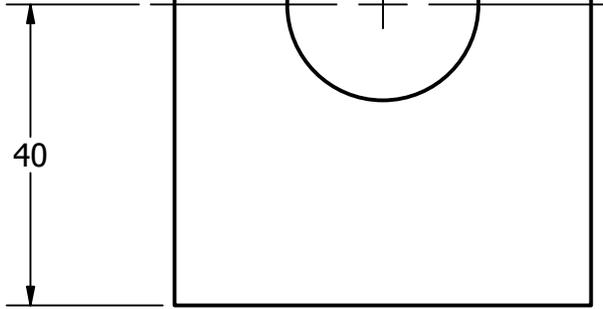
68

6.35 (1/4 in)

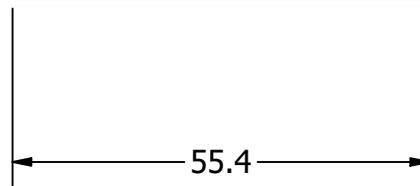


(15)

Ø25 PASADO



40



55.4

A

A

NOTAS:

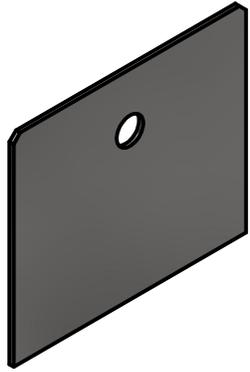
1. REMOVER BORDES FILOSOS.

TÍTULO: HID-CIL-002		
Oreja de sujeción		
NÚMERO DE DIBUJO: 10		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 11 DE 16	REV A

2



1



2

1

B

B

Ø40 PASADO

10 X 45.0°
CHAFLÁN

175

80

300

6.35 (1/4 in)

350

A

A

NOTAS:

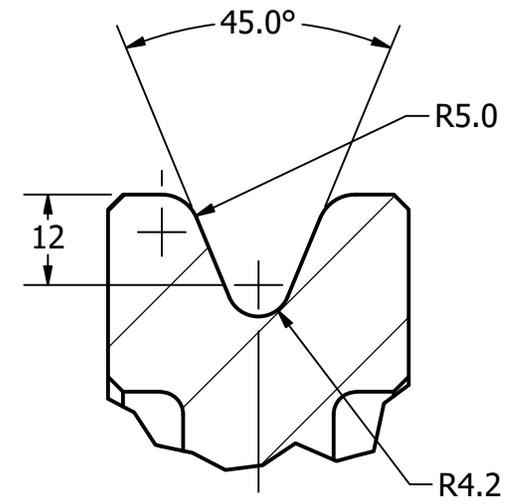
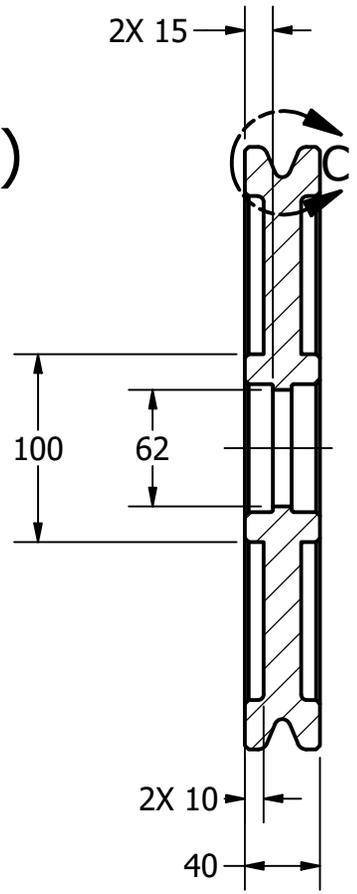
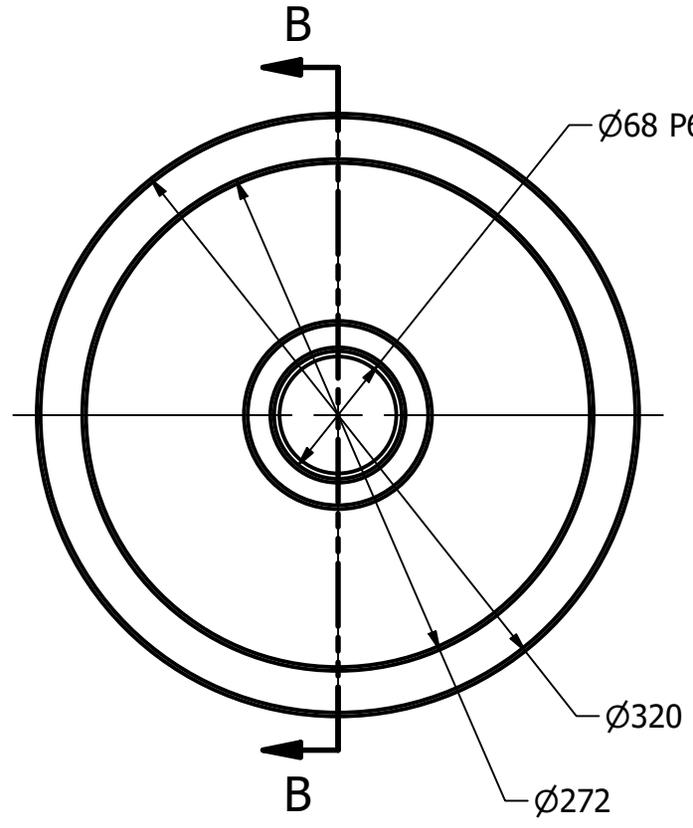
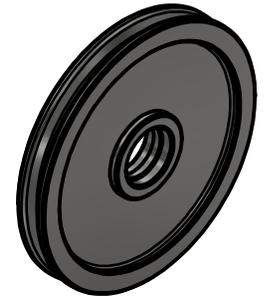
1. REMOVER BORDES FILOSOS.

TÍTULO: TRA-POL-003		
Placa de sujeción de polea		
NÚMERO DE DIBUJO: 11		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 12 DE 16	REV A

2

1

1



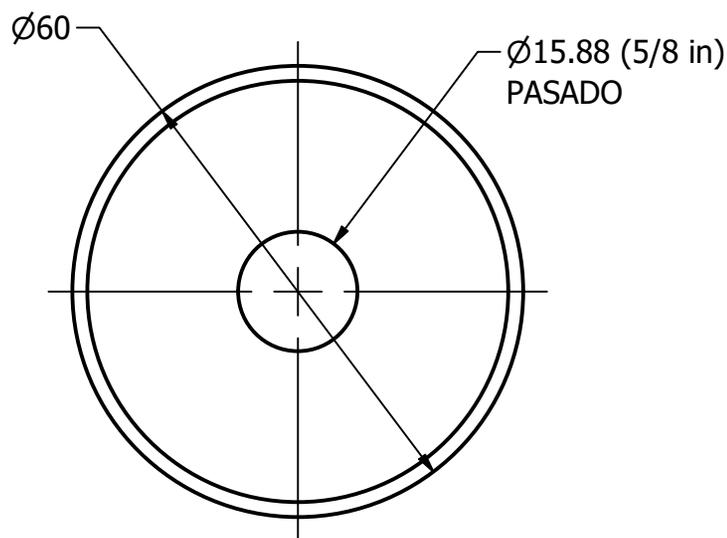
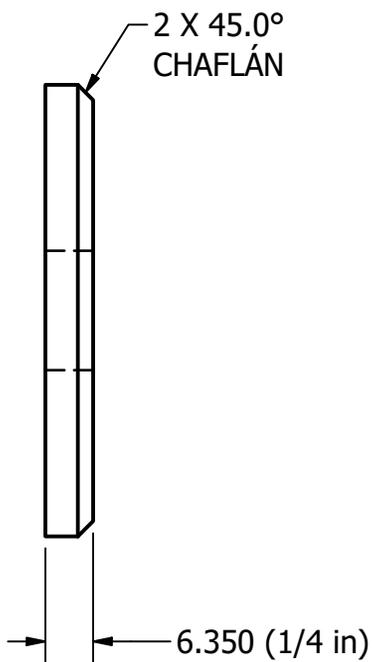
DETALLE C
ESCALA 1

SECCIÓN B-B
ESCALA 1 / 4

NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.
2. TODOS LOS CHAFLANES 2 X 45° A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

TÍTULO: TRA-POL-001		
Polea de tracción		
NÚMERO DE DIBUJO: 12		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 13 DE 16	REV A



NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.

TÍTULO: TRA-POL-005
Seguro para eje de polea

NÚMERO DE DIBUJO: 13

FORMATO ESCALA: 1:1 UNIDADES: mm

A

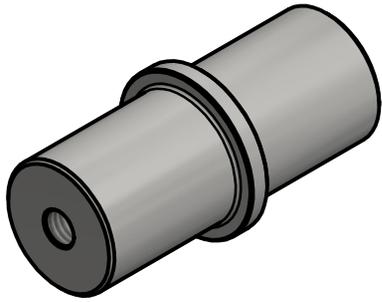
PÁGINA 14 DE 16

REV
A

2



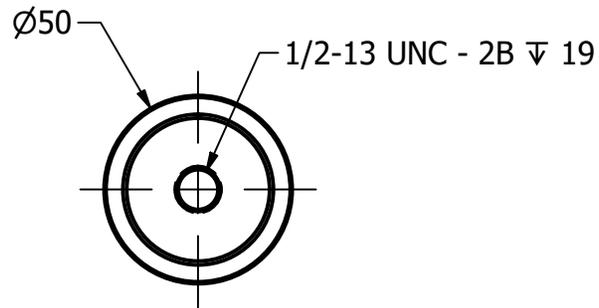
1



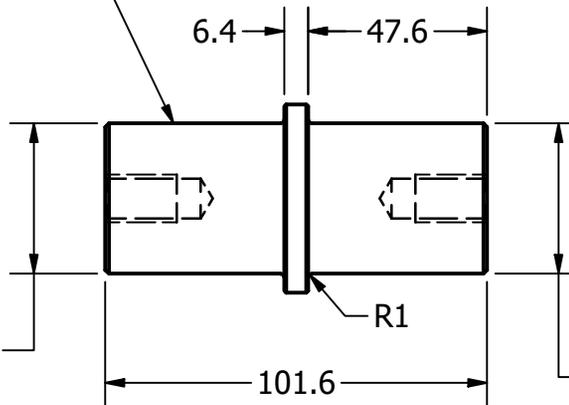
B

B

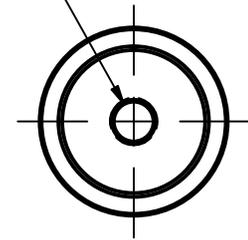
SKF 6008-2RS1



$\varnothing 40$ h6 (40.00 / 39.98)



1/2-13 UNC - 2B ∇ 19



$\varnothing 40$ h6 (40.00 / 39.98)

A

A

NOTAS:

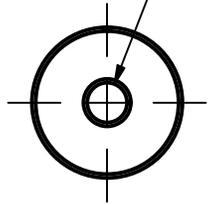
1. REMOVER BORDES FILOSOS.
2. TODOS LOS CHAFLANES 1 X 45° A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

TÍTULO: EJE PARA POLEAS AL CILINDRO		
NÚMERO DE DIBUJO: 14		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 15 DE 16	REV A

2



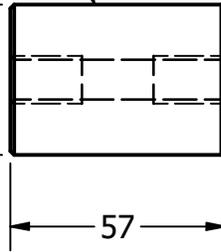
1



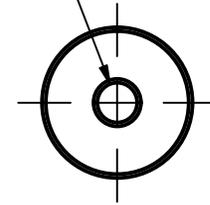
1/2-13 UNC - 2B ∇ 19

$\varnothing 40$ h6 (40.00 / 39.98)

SKF 6008-2RS1



1/2-13 UNC - 2B ∇ 19



NOTAS:

1. REMOVER BORDES FILOSOS.
2. TODOS LOS CHAFLANES 1 X 45° A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

TÍTULO: EJE PARA POLEAS SECUNDARIAS		
NÚMERO DE DIBUJO: 15		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 16 DE 16	REV A