



# Sistema de seguridad para el ejercicio hipertrófico muscular prensa de banco

Jorge Iván Jaramillo Herrera

Universidad Militar Nueva Granada  
Ingeniería, Mecatrónica  
Bogotá, Colombia  
Junio, 2021



# Sistema de seguridad para el ejercicio hipertrófico muscular prensa de banco

**Jorge Iván Jaramillo Herrera**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero en Mecatrónica**

Tutor:  
Ing. Nelson Velasco M.Sc.

Universidad Militar Nueva Granada  
Ingeniería, Mecatrónica  
Bogotá, Colombia  
Junio, 2021





## (Dedicatoria)

Le dedico este trabajo a todas aquellas personas que en algún momento de la vida han contribuido a la construcción de mi carácter y me han apoyado a crecer personal e intelectualmente. A mis padres y profesores... muchas gracias.



## Resumen

Se identificaron graves deficiencias en los medios de protección ofrecidos hoy en día para garantizar la integridad del levantador durante la ejecución del ejercicio de la prensa de banco. Razón por la cual se propone el diseño de un sistema de seguridad enfocado hacia complementar la asistencia brindada por parte del observador y el equipo de protección disponible para el desarrollo de este ejercicio. Lo anterior llevado a cabo de conformidad con una metodología de diseño apropiada para la conformación de un producto que cumpla con los fines planteados. A través de dicha metodología se consolidó la propuesta de un diseño mecánico y uno electrónico, mediante los cuales se reduciría en gran medida el riesgo de lesión durante la ejecución del ejercicio hipertrófico muscular de la prensa de banco.

**Palabras clave:** Diseño, Estructura, FEA, Prensa de banco, Seguridad.

## Abstract

Important flaws have been detected towards the means of protection offered nowadays to guarantee lifters integrity during the bench press execution. Hence the design of a security system is proposed, focused onto complementing spotters assistance and the protection equipment provided. The previous thing carried on through an appropriated engineering design methodology towards satisfying the aims presented. Across the foregoing methodology, an mechanical and electronical desings were developed, by which bench press executions risks should be reduced drastically.

**Keywords:** Bench Press, Design, FEA, Structure, Safety

# Contenido

Resumen	vii
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Problema . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.3. Justificación . . . . .	5
1.4. Estado del arte . . . . .	5
<b>2. Mecanismo de la Prensa de Banco</b>	<b>14</b>
2.1. Relevancia del capítulo . . . . .	14
2.2. Consideraciones previas . . . . .	14
2.3. Elementos influyentes . . . . .	15
2.4. Patrones generales del movimiento . . . . .	18
2.5. Teoría del fallo en la prensa de banco . . . . .	29
2.6. Prevención de accidentes . . . . .	36
<b>3. Diseño</b>	<b>38</b>
3.1. Relevancia del capítulo . . . . .	38
3.2. Pasos de diseño . . . . .	38
3.3. Diseño mecánico . . . . .	40
3.4. Diseño Electrónico . . . . .	147
<b>4. Conclusiones</b>	<b>217</b>
4.1. Conclusiones . . . . .	217
4.2. Futuras mejoras . . . . .	218
<b>A. Anexo: Planos de diseño mecánico</b>	<b>221</b>
<b>B. Anexo: Planos del complemento electrónico</b>	<b>246</b>
<b>C. Anexo: Planos del complemento electrónico (acelerómetro)</b>	<b>259</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>266</b>

# 1. Introducción

Una estrecha afinidad deportiva, en conjunto con la formación profesional en ingeniería mecatrónica han sido significativamente adoptadas por quien este trabajo presenta. Prácticas que en conjunto, le han significado al autor importantes enseñanzas y formación de vida.

Durante el mencionado recorrido deportivo, el escritor pudo detectar en repetidas ocasiones, y gracias a experiencias tanto propias como de pares en el entrenamiento con pesas, un serio problema en materia de seguridad durante la ejecución del ejercicio conocido como "prensa de banco". Situación en que la integridad humana se ve constantemente arriesgada por la masa que dicha práctica incorpora. Respecto de la mencionada problemática, se pudieron reconocer cómo causa principal las limitaciones humanas en cuestión de reflejos, atención y fuerza a la hora de enfrentar dicho riesgo, cuando se le confía a una persona supervisar esta actividad.

La señalada formación ingenieril, en conjunto con la afición deportiva, llevaron al autor a considerar la idea de enfrentar el problema reconocido; idea que es consolidada en el trabajo de grado que aquí se presenta. Labor en la cual, se enfocan los conocimientos adquiridos por el escritor a lo largo de su carrera, en busca de mejorar el panorama de seguridad para la prensa de banco. Lo anterior desde el diseño de un equipo mecatrónico que complemente la supervisión humana dada normalmente sobre la prensa de banco; mitigando así los riesgos que este ejercicio posee.

## 1.1. Problema

Al menos una cuarta parte de la población adulta del mundo presenta serios problemas de salud, debidas principalmente a costumbres sedentarias [56]. En busca de disminuir los índices de sedentarismo y las enfermedades que esta conducta acarrea, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado de entre cierta cantidad de ejercicio aeróbico y anaeróbico, una medida importante de fortalecimiento del sistema músculo esquelético en proporciones específicas [61, 61].

Para cubrir las necesidades de entrenamiento muscular, los entrenamientos desarrollados en gimnasios han destacado en Colombia por su popularidad. La anterior afirmación se fundamenta en estudios que han demostrado el aumento de la demanda por el uso de gimnasios

para el desarrollo deportivo autónomo [18, 67]. De cuyos resultados se ha comprobado una creciente demanda por el uso de las mencionadas instalaciones; tendencia especialmente notoria en las principales ciudades del país, dónde los índices de estrés, angustia e insomnio son predominantes [15].

De todas la opciones y comodidades que un gimnasio ofrece, es el entrenamiento con pesas (i.e. barras, mancuernas, poleas, máquinas, etc) una las opciones más populares en cuanto a suplir la necesidad de trabajo muscular se refiere. Respecto de la inclinación mencionada, los ejercicios desarrollados en la modalidad conocida cómo “peso libre” (FW “Free Weight”) son preferidos por encima de los efectuados en las denominadas “máquinas” (EM “Exercise Machine”), gracias a los incrementados beneficios en desarrollo muscular que ocasionan [16].

De entre todos los ejercicios en modalidad de peso libre existentes, uno de los más populares e importantes es la prensa de banco (Bench Press), el cual es esencial para la formación del tronco superior<sup>1</sup>. Dicho ejercicio se caracteriza por utilizar la fuerza proveniente de los músculos extensores del brazo (tríceps) y del grupo anterior de los hombros (pectoral mayor, pectoral menor, deltoides anterior y subclavio) para levantar de forma vertical, y en posición supina<sup>2</sup>, determinada cantidad de peso, normalmente presentado en forma de discos acoplados a los extremos de una barra de acero.

Según la “American College of Sports Medicine”, para que un entrenamiento sea efectivo en el desarrollo de fuerza y volumen muscular, la magnitud del peso involucrado debe representar alrededor del 70 % de la máxima capacidad de fuerza que el individuo pueda ejercer. Además, dicha carga debe ser soportada durante la cantidad necesaria de repeticiones que lleven a la persona a un nivel de fatiga que lo inhabilite de continuar levantando el peso [64, 65].

Aunque las ventajas que ofrece el entrenamiento con pesas son abundantes, el importante riesgo de accidentalidad que esta práctica acarrea es ineludible. Dicha amenaza se manifiesta a modo de contusiones, aplastamientos, dislocaciones, fracturas e incluso sobre esfuerzos de los tendones [17, 30], especialmente cuando los ejercicios son ejecutados irresponsablemente [37].

Las recomendaciones de la “American College of Sports Medicine” [64, 65] implican un importante riesgo hacia la salud del deportista cuando son puestas en práctica durante la ejecución de la prensa de banco. Lo anterior debido a la manera en que dicho ejercicio es llevado a cabo, en dónde regiones vitales cómo el rostro, cuello y tórax se ven comprometidas por la barra. Es por esta última razón, que una confiable supervisión se hace imprescindible sobre el mencionado ejercicio.

---

<sup>1</sup>La sección del cuerpo que comprende desde la cintura hasta la cabeza

<sup>2</sup>Tendido sobre la espalda

Diversos estudios se han realizado en Estados Unidos para cuantificar el panorama de riesgo en el entrenamiento con pesas, de los cuales se destacan los siguientes: Según el desarrollado por C.Jones et al [37], el número de atenciones médicas relacionadas con entrenamientos de fuerza aumentaron un 35 % en un lapso de 20 años (de 1978 a 1998), acumulando un total de 20.500 casos; mientras que se reconocieron, durante el efectuado por G.Myer et al [57] en un rango de 17 años (de 1990 y 2007), un número preocupantemente mayor: 25335 lesiones y 114 muertes. De manera similar, se tiene información más reciente, la cual es aún más alarmante: sobre los 96 hospitales registrados en la “National Electronic Injury Surveillance System” (NEISS), sólomente para el 2019 se registraron 11,425 accidentes relacionados con equipos de entrenamiento, exponiendo así un estimado nacional de 468.315 [59]. Vinculada a la situación, un caso trágico documentado es el del joven Kyle Thomson, quien ejecutando la prensa de banco, falleció al dejar caer sobre su cuello una carga de 143Kg [32, 38]. Hecho lamentable que se produjo a pesar de contar en el momento con la supervisión de su compañero de entrenamiento, quien no tuvo ni los reflejos, ni la fuerza suficientes para salvaguardar la vida del deportista.

Aunque la información anterior provee un acercamiento más aterrizado a la actualidad, no se encontraron estudios similares, registros o bases de datos relativos a la accidentalidad en centros de entrenamiento colombianos. Sin embargo, si se extrapolan los índices presentados anteriormente [37, 57, 59], y se tiene en cuenta el incremento del interés en el país por el entrenamiento deportivo en gimnasios, puede darse por hecho un comportamiento muy similar.

Desde el punto de vista ingenieril, se determinó la necesidad de aplicar tecnología mecatrónica en pro de complementar los paupérrimos medios de protección ofrecidos a las personas que recurren a la prensa de banco para el autónomo desarrollo muscular. Lo anterior con un enfoque especial en la asistencia del individuo designado cómo supervisor del desarrollo de dicho ejercicio. Último al que se le conoce popularmente por los nombres de “spotter” u “observador”.

## 1.2. Objetivos

### General

- Asistir la tarea que el observador debe realizar durante el ejercicio de la prensa de banco para reducir los riesgos de accidente, mediante el diseño de un sistema mecánico inteligente.

## Específicos

- Determinar un medio mecánico suficiente para enfrentar y asegurar la carga que amenaza la vida de quien se encuentre desarrollando la prensa de banco.
- Diseñar un sistema de alarmas que guíe al observador (spotter) en el desarrollo de su tarea.

## 1.3. Justificación

El proyecto desarrollado tendrá un efecto muy significativo sobre la vida deportiva de aquellas personas que por profesión, o afición, regularmente desarrollen la prensa de banco. Lo anterior reflejado de las siguientes 2 maneras: la primera y más significativa es en materia de garantías, al no tener que interrumpir su progreso a causa del tratamiento y sanación de lesiones, cuya probabilidad de ocurrencia será reducida notablemente. Por otro lado, atribuible a la apenas mencionada, la segunda medida de impacto: un estimado incremento en la tasa de desarrollo muscular, debida a una indirecta influencia sobre las personas en no temer elevar sus propias exigencias en cuanto a repeticiones y cantidad de carga se refiere. Esto último gracias a la confianza en materia en seguridad, que el complemento infundirá sobre el usuario.

Por otro lado, y de manera indirecta, propietarios de gimnasios, entrenadores personalizados e individuos destinados a supervisar el desarrollo de la prensa de banco se verán también beneficiados por el sistema complementario a la asistencia de la prensa de banco. Lo anterior a modo de evasión de problemas judiciales provocados por negligencia al momento de prestar seguimiento, o las suficientes garantías en torno a la seguridad durante la ejecución del mencionado ejercicio.

Es por la peligrosa naturaleza de la prensa de banco y su trascendencia en el mundo del desarrollo deportivo, que se ve la necesidad de beneficiar a todas las personas citadas en concepto de evitarles líos tanto judiciales cómo en la aficción de su propia salud. Esto por medio de un sistema de asistencia integral que cubra en la medida posible, las falencias hoy presentes en los medios ofrecidos para la asistencia del señalado ejercicio.

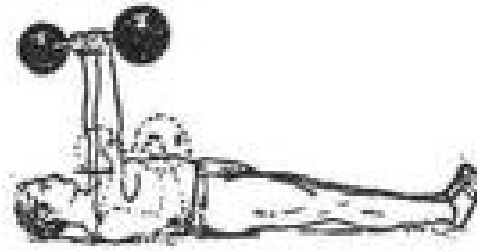
## 1.4. Estado del arte

Se considera al pesista y luchador estonio<sup>3</sup> George Hackenschmidt cómo creador del ejercicio conocido hoy en día cómo "prensa de banco". Lo anterior gracias a que en el libro "The way to live" de su autoría, publicado en 1908 [29], detalla las generalidades básicas de desarrollo

---

<sup>3</sup>Gentilicio de la República de Estonia





**Figura 1-1.:** Modo de proceder de "la prensa de banco contemporánea". Imagen tomada de [29].

del mencionado ejercicio, nunca antes documentadas. Cabe agregar en ese entonces la diferencia durante la ejecución del ejercicio, en cuanto a ser empleado el suelo cómo soporte espaldar para posición supina (figura 1-1), en lugar del conocido banco cómo es hoy en día popularmente llevado a cabo.

La prensa de banco no se popularizó sino hasta mediados los años 1950's/1960's, cuando importantes fisiculturistas y pesistas empezaron a implementar el mencionado ejercicio durante sus entrenamientos para llevar los músculos de sus extremidades al fallo volitivo<sup>4</sup>. Práctica que se extendió por los significativos avances en desarrollo muscular que causaba [77].

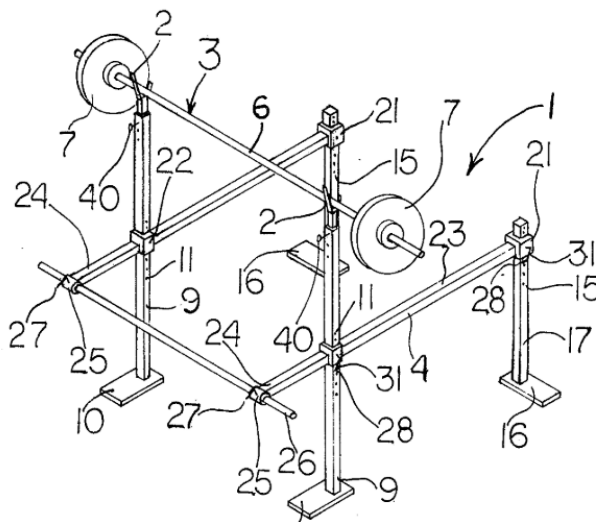
A pesar de la entonces elevada popularidad del señalado ejercicio, no fue sino hasta los inicios de la década de los 80's que patentes para incrementar la seguridad de la prensa de banco fueron desarrolladas. La más antigua encontrada, se fundamentó en la implementación de una barrera sólida con vigas (figura 1-2) que impidieran el choque de la carga con la integridad de la persona [36]. Por otro lado, siete años más tarde, un concepto similar fue publicado, con la diferencia de implementar para el mismo fin, una protección similar por medio de cuerdas (figura 1-3) [35].

Cerca de los años 90's, el concepto de "auto ayuda" se introdujo a los proyectos para salvaguardar al practicante de la carga en la prensa de banco. Dicho concepto implica que, sin la ayuda de un tercero, el deportista se transmita a si mismo la fuerza suficiente para poder culminar el ejercicio, mediante sus extremidades inferiores. Algunos diseños que involucran esta idea son: el trabajo de Z.Karl (figura 1-4), que involucra el empuje de los muslos sobre una barra anclada al sistema de poleas que redireccionaría la fuerza hacia el peso levantado [40]. De manera similar se comportan los diseños de B.Sang [69] por medio de una plataforma de empuje (figura 3-14) y de J.Ferris [25] (figura 3-15) con un acople directo al calzado de la persona.

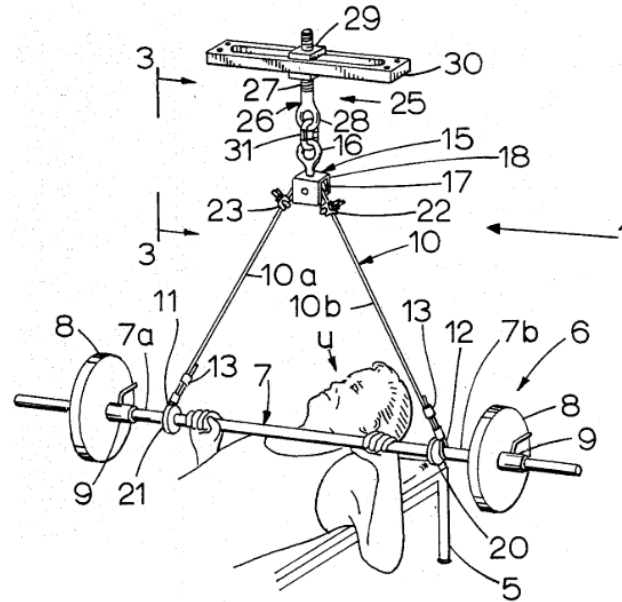
<sup>4</sup>Nivel extremo de fatiga muscular, necesario para la hipertrofia muscular

Modelos posteriores consideraron la asistencia mediante actuadores externos. De los que se encuentran los diseños de S.William [82] y O.Slawinski [73]; ambos caracterizados por implicar la activación de un motor eléctrico cuando un interruptor, respectivamente en forma de plataforma (figura 3-3) y pedal (figura 1-8), es accionado por el usuario. Por otro lado, y siguiendo el mismo concepto, se encuentran los modelos diseñados por B.William (figura 1-9) [81] y W.Brawner (figura 1-10) [9], diferenciados de los mencionados más arriba en el tipo de actuador usado, aplicándose para este último par de casos la mecánica hidráulica.

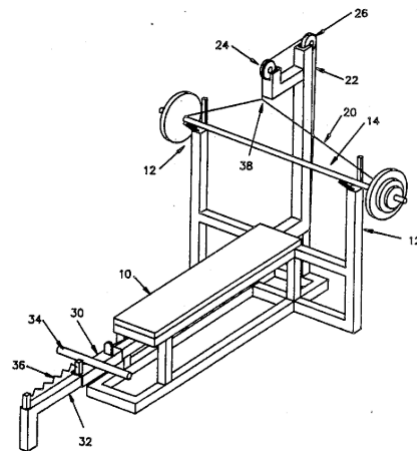
Los diseños modernos relativos a la prensa de banco se destacan por simular y reemplazar el peso de los discos que se acoplan a la barra. Dicha magnitud ha sido reproducida por medio de diferentes conceptos y clases de actuadores. El primero de ellos identificado corresponde con el proyecto de S.Sánchez et al [68], en el cual, por medio del control de motores eléctricos, se logra simular únicamente la componente vertical del peso cómo si se tratara de una máquina para ejercicios (figura 1-11). Por otro lado, los modelos de D.Hoecht et al (figura 1-12) [31] y de P.Colosky et al (figura 1-13) [12] emplean resortes cuya firmeza puede ser ajustada, produciendo de alguna manera, una carga similar a la presente en las pesas tradicionales. Similar a estos últimos, un elemento comercial hoy en día muy usado, es la plataforma con muelles (figura 1-14) desarrollada por W.Stewart [74] que emplea el mismo concepto de resortes.



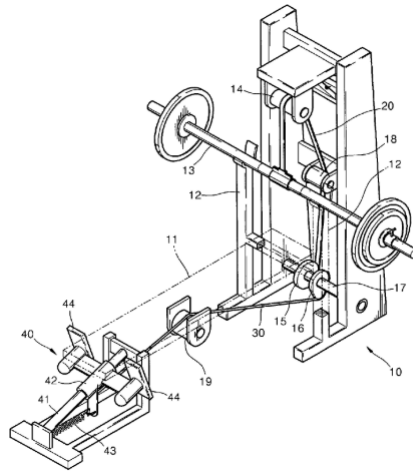
**Figura 1-2.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por S.James. Imagen tomada de [36].



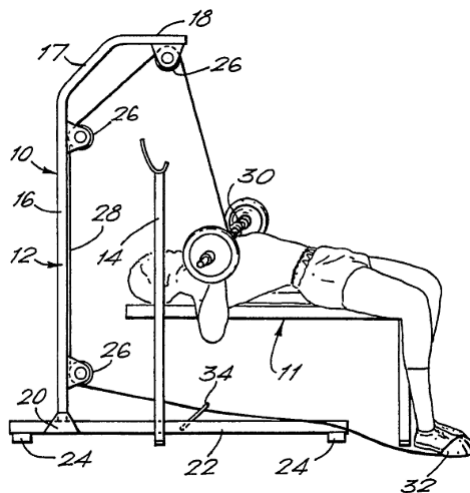
**Figura 1-3.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por S.James. Imagen tomada de [35].



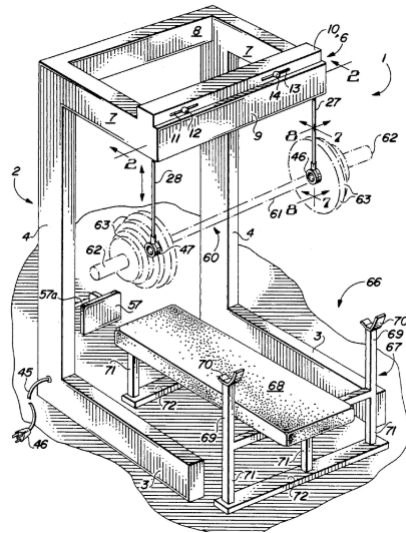
**Figura 1-4.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por Z.Karl. Imagen tomada de [40].



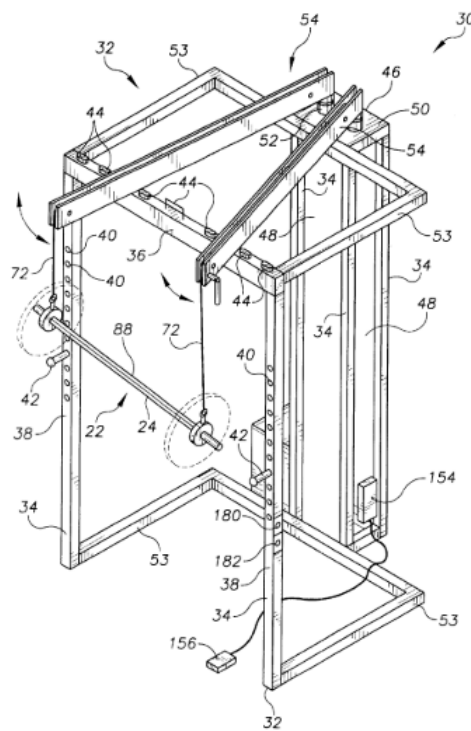
**Figura 1-5.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por B.Sang. Imagen tomada de [69].



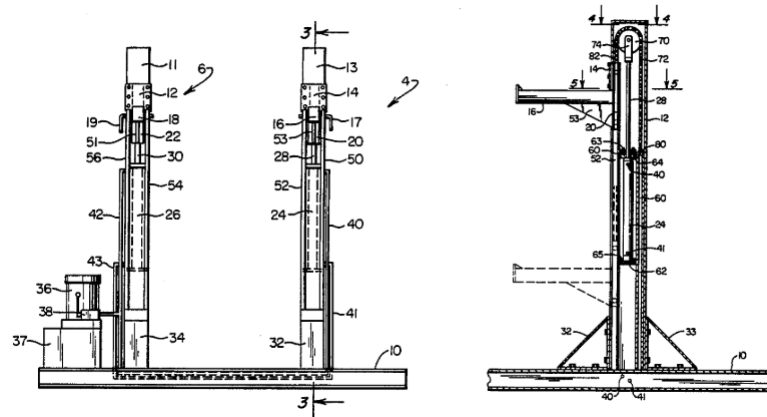
**Figura 1-6.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por J.Ferris. Imagen tomada de [25].



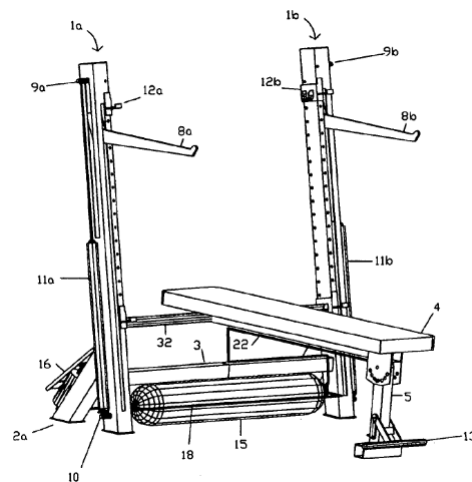
**Figura 1-7.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por S.William. Imagen tomada de [82].



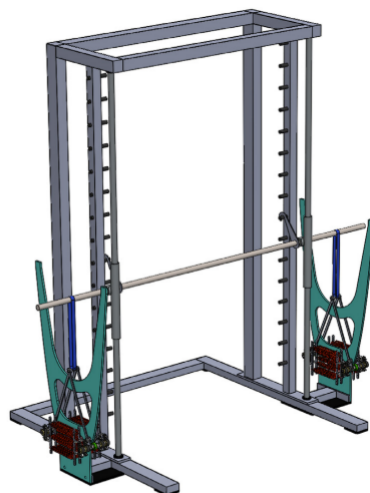
**Figura 1-8.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por O.Slawinski. Imagen tomada de [73].



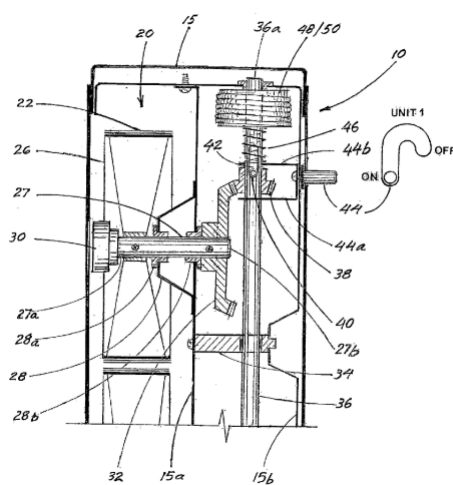
**Figura 1-9.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por B.William. Imagen tomada de [81].



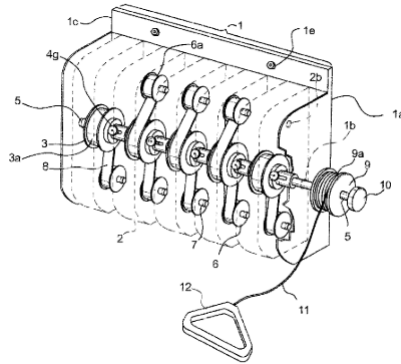
**Figura 1-10.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por W.Brawner. Imagen tomada de [9].



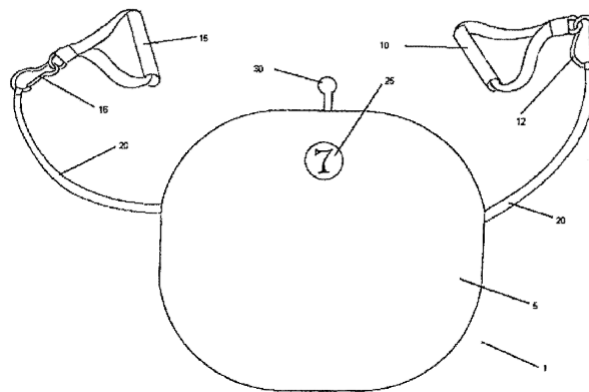
**Figura 1-11.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por S.Sánchez et al. Imagen tomada de [68].



**Figura 1-12.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por D.Hoecht et al. Imagen tomada de [31].



**Figura 1-13.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por P.Colosky et al. Imagen tomada de [12].



**Figura 1-14.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por W.Stewart. Imagen tomada de [74].



## 2. Mecanismo de la Prensa de Banco

### 2.1. Relevancia del capítulo

La importancia de este capítulo se debe a la necesidad de un conocimiento amplio de la documentación cuantitativa cómo cualitativa, generada a lo largo de años en relación con la prensa de banco. Dado que es el punto de partida para el reconocimiento de patrones que adviertan de una situación de riesgo; la cual, de no ser identificada oportunamente, abre las puertas a un abanico potencial de lesiones.

Se considera primordial que, por medios investigativos, se logre tener claridad de las variables propias de la prensa de banco mientras es desarrollado. Estas deben ser medibles, y a partir de las cuales se puedan reconocer indicios de cierto nivel de riesgo. Dichas características sustentarán las decisiones tomadas en el ámbito de diseño.

### 2.2. Consideraciones previas

La primera investigación científica realizada sobre la prensa de banco fue llevada a cabo en el año 1984, por M.Madsen et al., [49]. A partir de la cual, una gran cantidad de estudios le prosiguieron con la intención de extraer e interpretar aquellos patrones cinemáticos que caracterizan dicho ejercicio. No obstante, con el tiempo se generó gran polémica alrededor del significado de los mencionados patrones y la forma en que a partir de ellos se podría determinar un fallido intento por levantar la carga. Lo cual representa el riesgo principal cuando este ejercicio es practicado.

El desarrollo de la investigación presentada en este capítulo se efectuó con la finalidad de la capacitación autónoma, sobre la interpretación de las variables cinemáticas medibles durante el desarrollo de la prensa de banco. Entendimiento a partir de la cual, se puedan implementar más adelante las herramientas apropiadas para determinar con cierto nivel de certeza, el riesgo de fallo que se manifieste durante la ejecución del ejercicio.

Cabe resaltar, para efectos de decisiones futuras sobre los métodos de cuantificación a implementar para la prensa de banco, el enfoque investigativo dado especialmente hacia recopilar

los estudios cuyo énfasis analítico se diera alrededor de la carga. Lo anterior previsto así, por la simplicidad a la hora de serle modelado su comportamiento cinemático.

Poca trascendencia se le dio al estudio del cuerpo cuando la prensa de banco es ejecutada. Esto debido a la concordancia generalizada de diversos expertos en biomecánica al referirse sobre el análisis cuantitativo del sistema músculo-esquelético cómo inefectivo al momento de estudiar un ejercicio cualquiera [3, 5]. Lo anterior causado en gran medida por la compleja interacción muscular que se presenta durante los ejercicios multi-articulados [1].

## 2.3. Elementos influyentes

Con la única intención de informar al lector, se presenta a continuación una serie de estudios que le han permitido a la comunidad deportiva reconocer particulares elementos influyentes en el éxito de la prensa de banco. Dichos elementos afectan el rendimiento de la persona en lo que se refiere a cantidad de repeticiones y magnitud de peso levantado.

La mente es uno de los aspectos más influyentes durante el desarrollo de la prensa de banco. Diversos estudios han podido identificar cómo la psicología humana está íntimamente asociada con el desempeño deportivo durante este ejercicio [39, 45, 60].

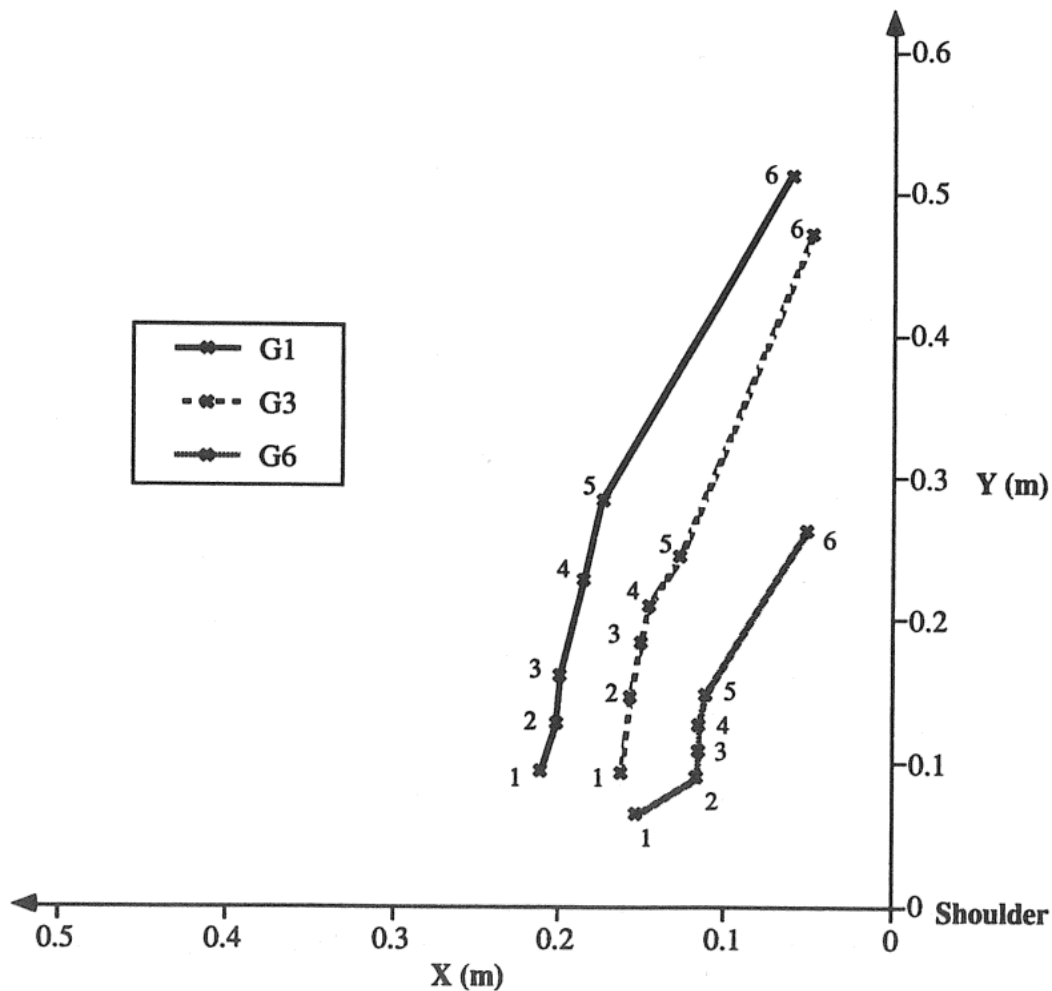
De manera similar a la relevancia mental expuesta anteriormente, una afección psicológica fue detectada exclusivamente en el género masculino. El cual, por influencia de prejuicios alrededor de la masculinidad, se ve impulsado en exceder sus capacidades físicas y reprimir la necesidad de pedir auxilio, creando un ambiente propicio para que sea dada una lesión [63].

Un factor determinante en la ejecución de la prensa de banco es el espaciamiento utilizado entre manos para sujetar la barra. Dicha afirmación surgió del estudio realizado por C.Green [28], en el cual se comparó la magnitud de la fuerza desarrollada por el deportista al usar sobre la carga, distintas distancias entre los puntos de agarre. Cómo resultado de la anterior investigación, se consiguieron los patrones plasmados en las figuras **2-2** (Fuerza media ejecutada (eje de ordenadas) contra el porcentaje de distanciamiento entre muñecas respecto de la anchura biacromial<sup>1</sup> (abscisa)) y **2-1** (desplazamiento de la carga en el plano sagital<sup>2</sup>). Sobre los gráficos presentados, se observó una tendencia de acercar la barra hacia los hombros en la medida que dicha separación entre muñecas fuese más grande (figura **2-1**). Por otro lado se encontró un rango de distanciamiento idóneo entre manos para favorecer la producción muscular de fuerza sobre la carga; distancia que corresponde entre el 165 % y

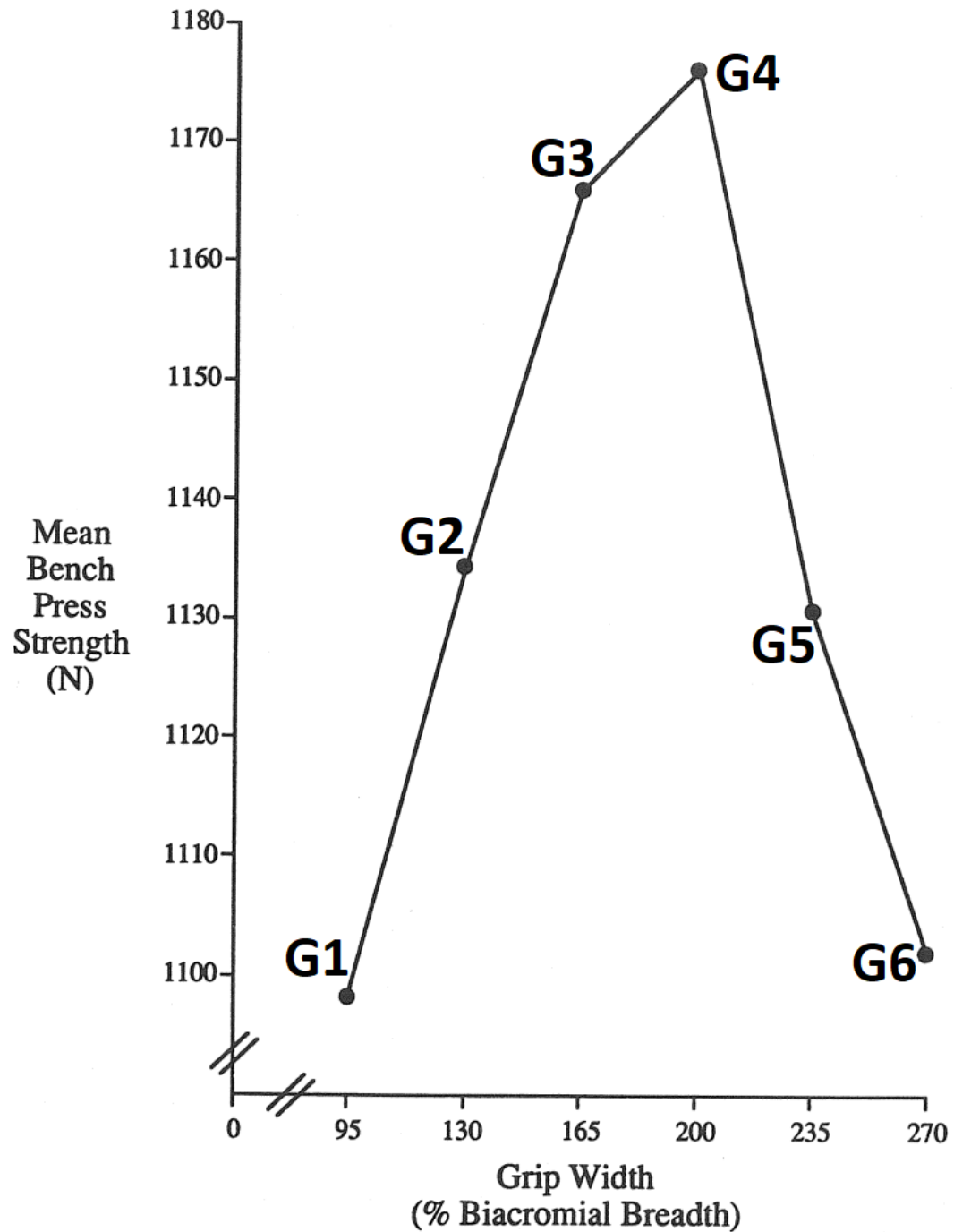
<sup>1</sup>Medida antropométrica correspondiente con la separación entre hombros

<sup>2</sup>Plano de división del cuerpo humano en las mitades izquierda y derecha

200 % de la anchura biacromial (puntos "G3" y "G4" en la figura 2-2).



**Figura 2-1.:** Patrones de desplazamiento de la barra, sobre el plano sagital, encontrados en el estudio de C.Green [28], para las separaciones de agarre G1, G3 y G6, durante la ejecución de la prensa de banco. El seccionamiento del movimiento (números del 1 al 5) corresponden con la elevación de la carga, desde el punto más bajo (1) hasta la extensión completa de los brazos (5), por recomendación de [49]. Imagen tomada de [28].



**Figura 2-2.:** Fuerza media en la prensa de banco ejercida por las personas acordes con las distancias de agarre G1 a G6 en el estudio de Green et al., [28]. Figura tomada de [28].

## 2.4. Patrones generales del movimiento

Se llevó a cabo una rigurosa investigación de los estudios realizados hasta el momento sobre la prensa de banco, a través del cual, el autor obtuvo criterio para interpretar los diferentes patrones encontrados alrededor de este ejercicio.

### Curvas cinemáticas

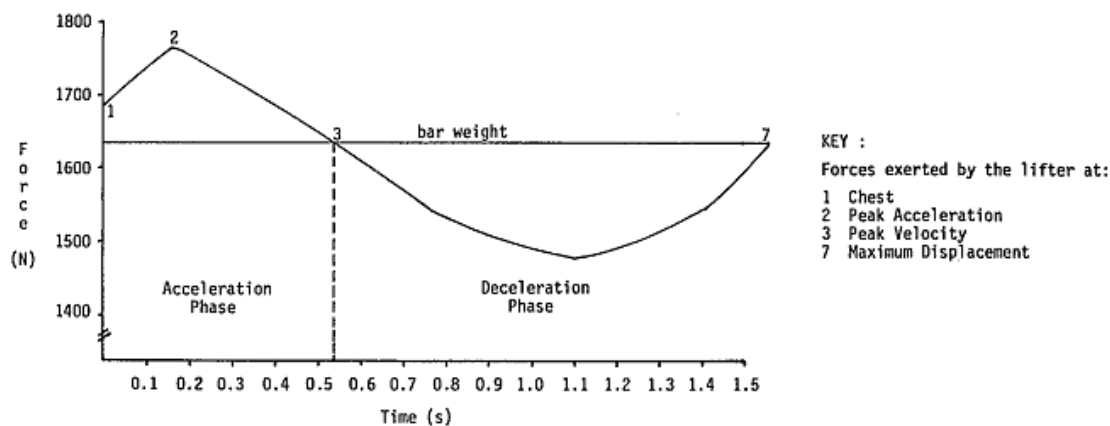
Una gran cantidad de estudios enfocados en el estudio cinemático de la barra fueron revisados, los cuales analizaron la prensa de banco sobre 3 condiciones diferentes. Según la capacidad para sobrellevar la cantidad de peso asignado, se identificó una situación de: **Carga leve** cuando la persona lidia con la carga en notoria facilidad, **carga máxima** cuando sobrellevar el peso implicó la máxima capacidad muscular, y **carga excedida** en dónde la magnitud de la masa ha superado la fuerza disponible del individuo.

Los autores de cada uno de los estudios hallados implementaron en su metodología, muestras poblacionales heterogéneas en cuanto a sexo y experiencia en el desarrollo de la prensa de banco. A pesar de las diferencias mencionadas, los resultados obtenidos para la mayoría de las investigaciones demostraron gran parentesco en las curvas resultantes de desplazamiento espacial, velocidad y aceleración en el tiempo.

Para cada una de las condiciones determinadas (carga leve, máxima y excedida), hubo una concordancia general respecto de los patrones cinemáticos determinados. Cabe recalcar la relevancia de este hecho, a causa de presentarse la mencionada similitud sin importar las diferencias de muestra poblacional ni de recursos utilizados para cuantificar el comportamiento dinámico de la barra.

### Patrón de fuerza en carga leve

En el estudio de B.Elliot et al., [23], se pudo identificar por primera vez el patrón de fuerza/-tiempo, efectuado por parte de la persona, cuando esta es enfrentada ante una carga leve en la prensa de banco. Dicho patrón resalta por demostrar durante la fase de subida de la barra (figura 2-3), un trazado sencillo caracterizado por la presencia de 2 curvas únicamente; una de aceleración correspondiente con el inicio de la elevación de la carga, y otra de desaceleración, que representa la finalización del ejercicio, cuando los brazos han sido extendidos completamente.



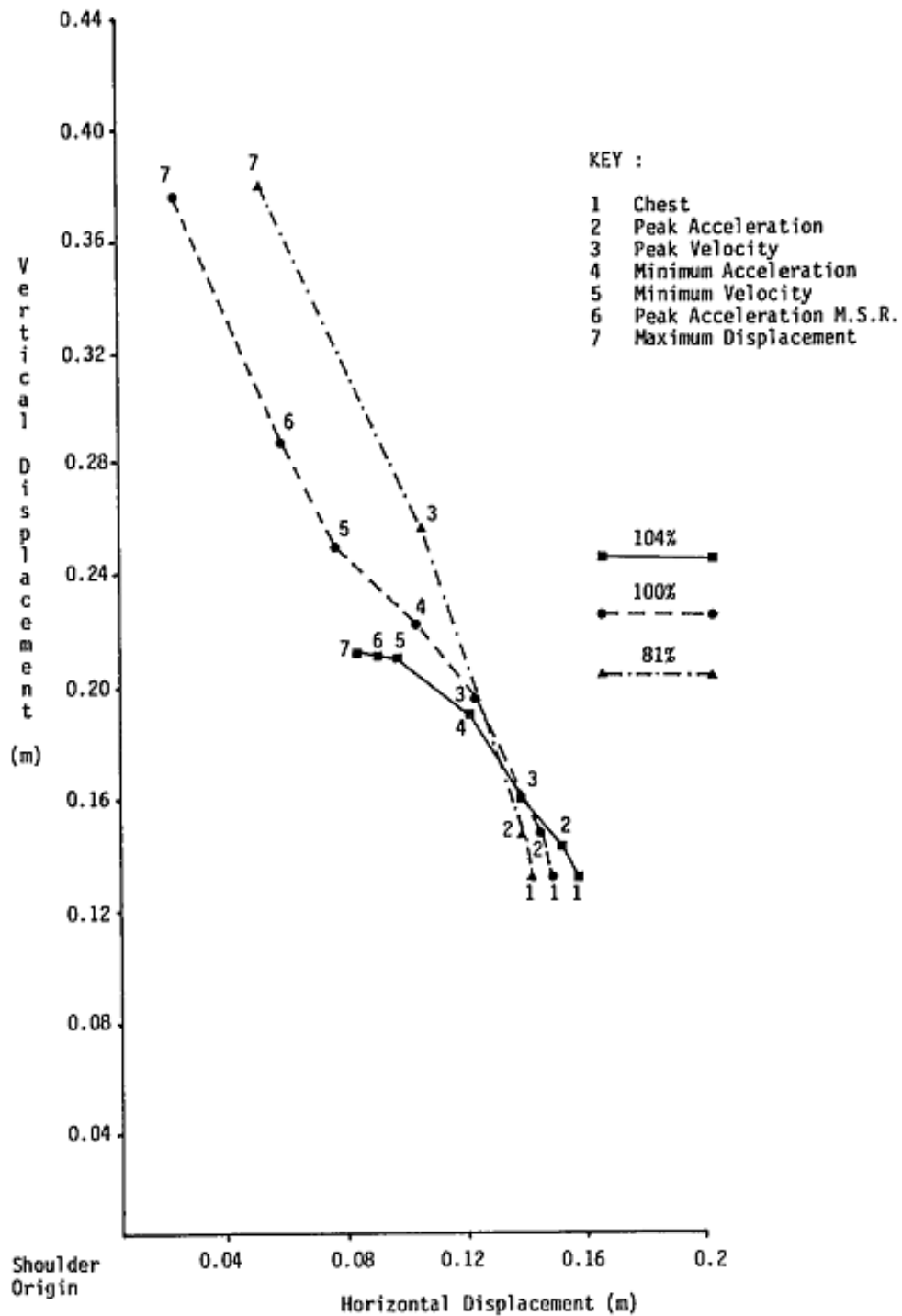
**Figura 2-3.:** Curva representativa de la fuerza ejercida por el individuo sobre una carga leve, obtenida como resultado del estudio hecho por B.Elliot et al., [23]. Graficada únicamente la etapa de subida. Imagen tomada de [23]

### Patrón de velocidad en carga leve

Dos estudios con enfoque de análisis diferente sobre la prensa de banco demostraron curvas similares de velocidad/tiempo al tratar con cargas leves. Uno de ellos realizado por M.Duffey et al., [22], en el cual se observó cómo evoluciona la curva de velocidad de subida de la barra en una serie de repeticiones (ver curva compuesta por puntos "•" en la figura 2-14). Por otro lado se encuentra la investigación de H.Król et al., [46], donde se comparó el comportamiento de la misma variable cinemática en función de determinadas fracciones del valor correspondiente con la carga máxima de la persona (ver segmento de subida para el 70% y el 80% de 1RM en la figura 2-13). De las curvas señaladas, se reconoce un patrón caracterizado por un progresivo incremento en la velocidad, de gradiente considerablemente mayor al inicio, hasta que su magnitud se reduce abruptamente al final del levantamiento.

### Patrón de trayecto en carga leve

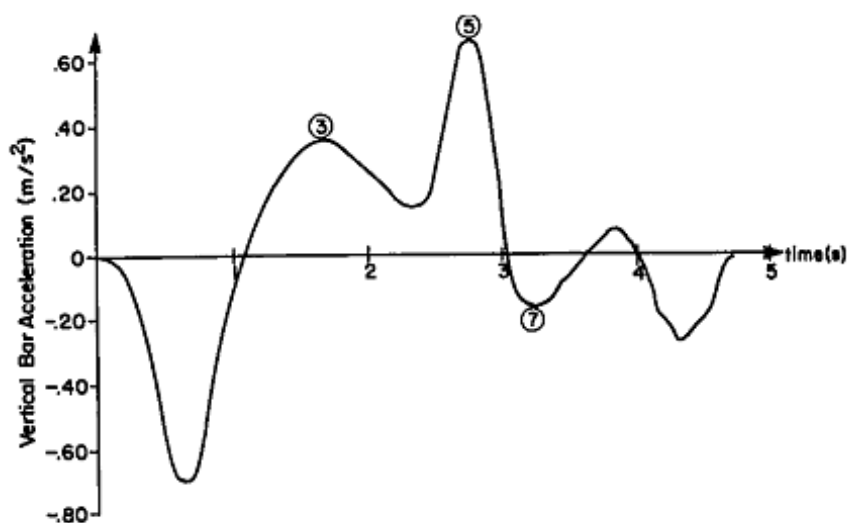
En la figura 2-4 del estudio de B.Elliot et al., [23], se puede observar el patrón de trayectoria en el plano sagital identificado durante la elevación de la barra cuando es dispuesta con carga leve (81% de la carga máxima del individuo). De este comportamiento se destaca una ruta sencilla, simplificable por medio de 2 rectas de pendiente pronunciada.



**Figura 2-4.:** Trayectoria de la carga en el plano sagital, obtenidas como resultado del estudio hecho por B.Elliot et al., [23], para carga leve (81%), máxima (100%) y excedida (104%). Graficada únicamente la etapa de subida. Imagen tomada de [23]

### Patrón de fuerza en carga máxima

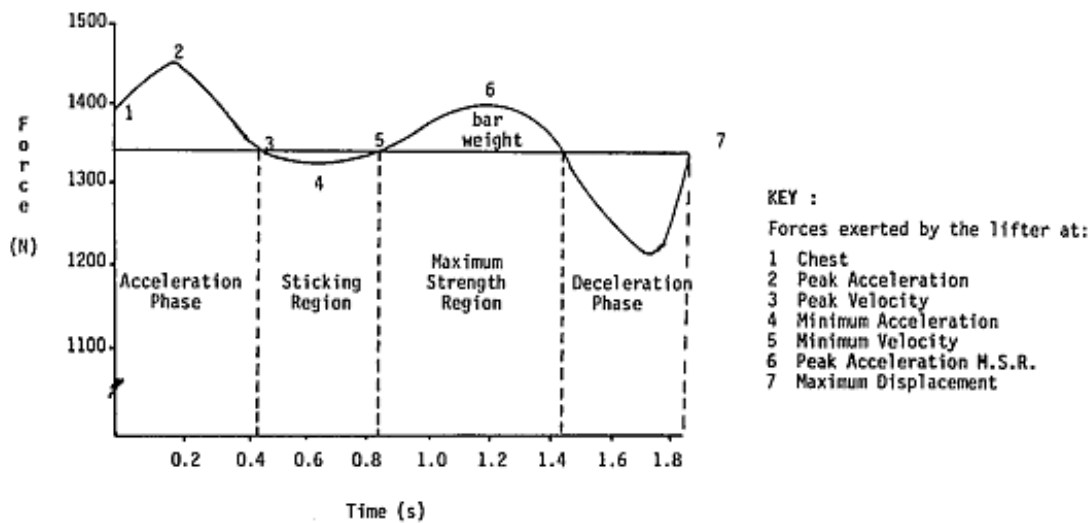
La cinemática de la fuerza ejercida sobre una carga máxima fue identificada indirectamente a través de la curva de aceleración/tiempo<sup>3</sup> observable en la figura 2-5, descubierta en el estudio de N.Madsen et al., [49]. Dicho resultado coincide con el patrón determinado por B.Elliot et al., [23] en la curva fuerza/tiempo de la figura 2-6. Del comportamiento revelado en los estudios mencionados anteriormente, se evidencia el mismo comportamiento oscilatorio alrededor del valor correspondiente con aceleración cero (abscisa en la figura 2-5 y recta "bar weight" en la figura 2-6). Del mencionado comportamiento se destacan por su amplitud, los picos de aceleración y desaceleración generados respectivamente al inicio y al final del levantamiento.



**Figura 2-5.:** Curva representativa del patrón aceleración/tiempo de la barra, para el caso de carga máxima, determinada en el estudio de N.Madsen et al., [49]. Etapa de bajada:  $0s \rightarrow \pm 2.5s$ , etapa de subida:  $\pm 2.5s \rightarrow \pm 4.7s$ . Imagen tomada de [49].

<sup>3</sup>La fuerza ejercida por la persona es consecuencia directa de la aceleración que la carga experimente

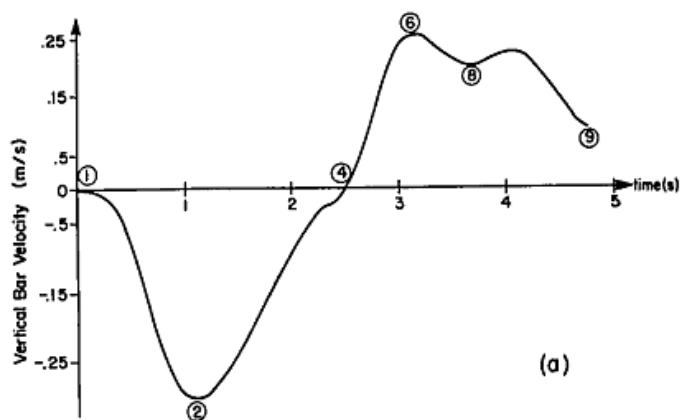




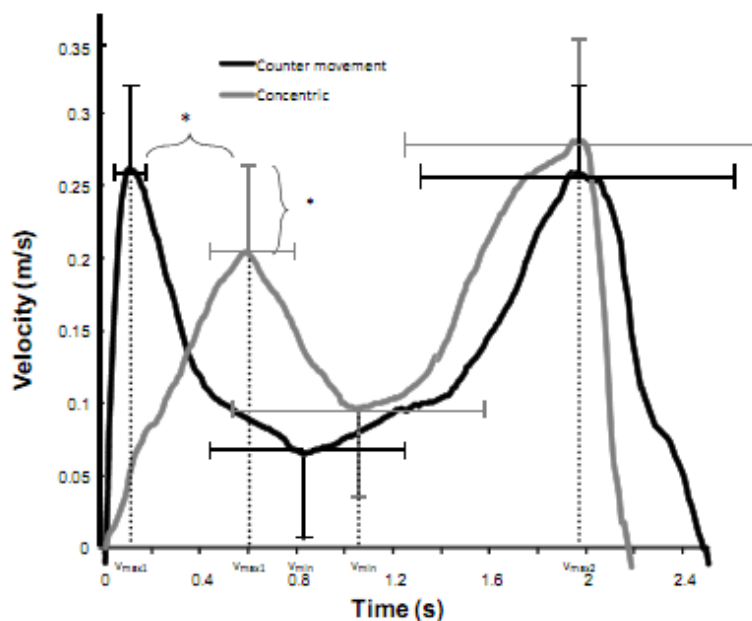
**Figura 2-6.:** Curva representativa de la fuerza ejercida por el individuo sobre una carga máxima, obtenida como resultado del estudio hecho por B.Elliot et al., [23]. Graficada únicamente la etapa de subida. Imagen tomada de [23]

### Patrón de velocidad en carga máxima

Cuatro estudios lograron determinar un comportamiento de velocidad muy similar durante la etapa de subida de una carga máxima, en el cual se reconocen 2 picos separados por una momentánea reducción de la rapidez de subida en la barra. Respecto de las investigaciones que lograron determinar este patrón, se encuentran los estudios de R.Van Den Tillaar et al., [79] en la figura 2-8, de H.Król et al., [46] en la figura 2-13, de M.Duffey et al., [22] en la figura 2-14 y el de N.Madsen et al., [49] en la figura 2-7.



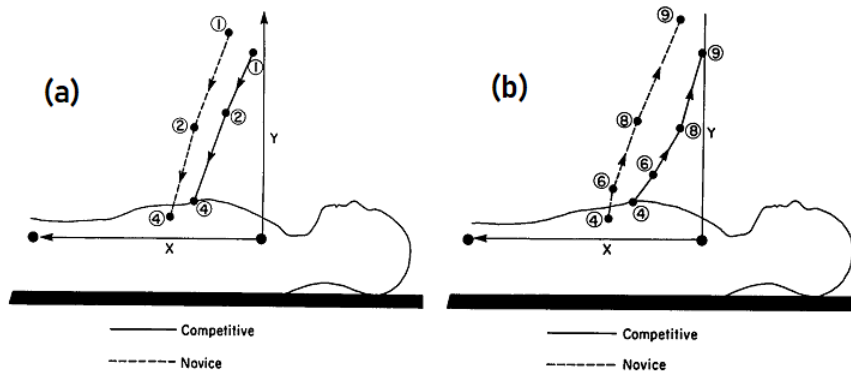
**Figura 2-7.:** Curva representativa del patrón velocidad/tiempo de la barra, para el caso de carga máxima, determinada en el estudio de N.Madsen et al., [49]. Etapa de bajada:  $0s \rightarrow \pm 2.2s$ , etapa de subida:  $\pm 2.2s \rightarrow \pm 4.7s$ . Imagen tomada de [49].



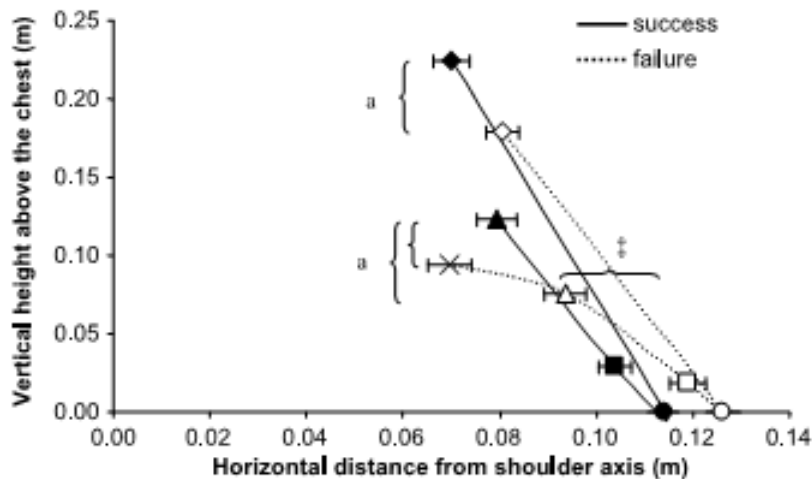
**Figura 2-8.:** Curva representativa del patrón de velocidad/tiempo durante la subida del peso en el caso de carga máxima, obtenida como resultado del estudio hecho por R.Van Den Tillaar et al., [79]. En negro el patrón correspondiente con el desarrollo normal del ejercicio, luego de haber descendido la carga hasta el nivel del pecho, y en gris siendo la prensa de banco reducida a sólo la extensión de los brazos. Imagen tomada de [79].

### Patrón de trayecto en carga máxima

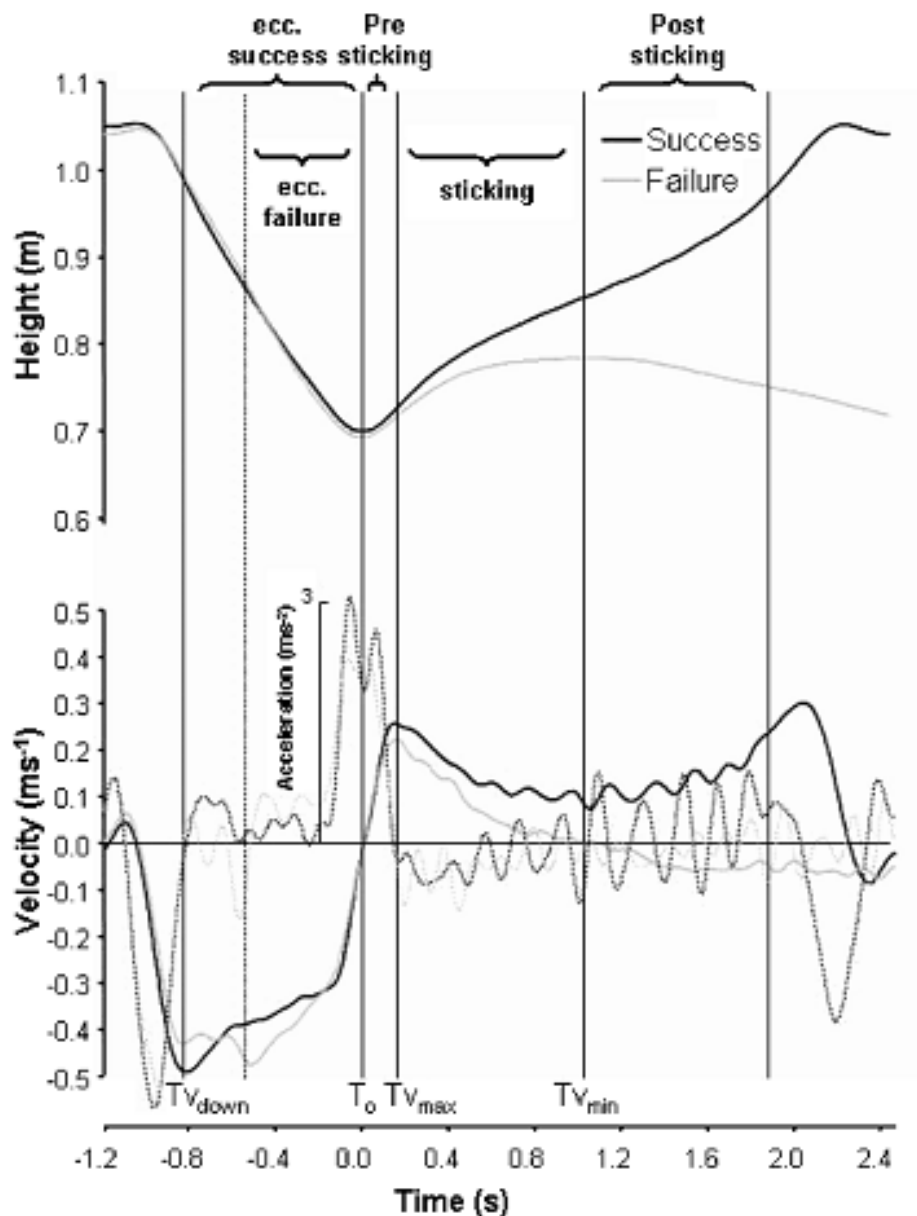
El análisis de la trayectoria sobre una carga máxima ha demostrado la capacidad del individuo de mantener una constante elevación de la barra, a la par que esta tiende a acercarse horizontalmente hacia los hombros. Las gráficas presentadas en la figuras 2-4 del estudio de B.Elliot et al., [23], 2-9 del estudio de N.Madsen et al., [49] y 2-10 con 2-11, ambas del estudio de R.Van Den Tillaar et al., [78] dan fe de ello.



**Figura 2-9.:** Trayectoria representativa de la barra en el plano sagital, para carga máxima en bajada (a) y subida (b), distintiva para expertos (línea continua) y novatos (línea discontinua) en la prensa de banco. Obtenidas como resultado del estudio hecho por N.Madsen et al., [49]. Imagen tomada de [49].



**Figura 2-10.:** Trayecto representativo para los casos de carga máxima (línea continua, símbolos negros) y excedida (línea punteada, símbolos blancos) en el estudio de R.Van Den Tillaar et al., [78]. ◆: Inicio de bajada, •: Altura al nivel del pecho, ■: velocidad máxima de subida, ▲: velocidad mínima de subida o finalización y x: Estancamiento en el levantamiento. Imagen tomada de [78].

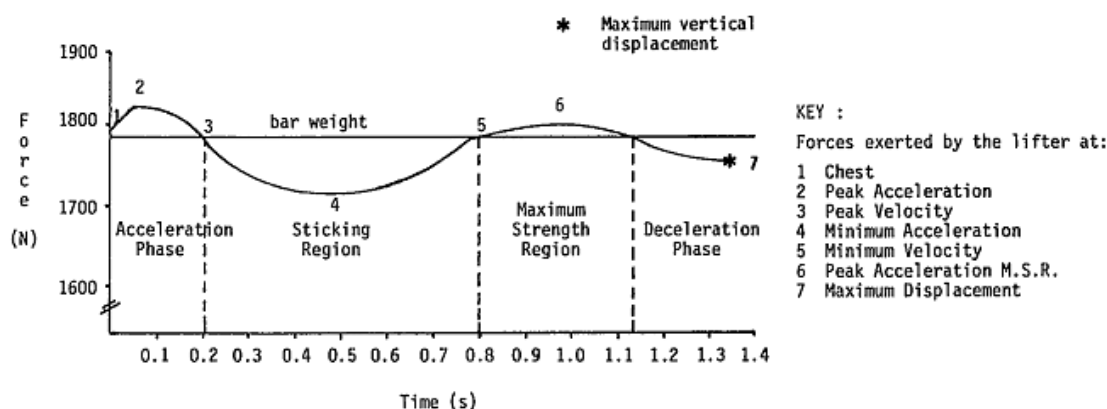


**Figura 2-11.:** Curvas de altura (gráfico superior), velocidad (gráfico inferior) y aceleración (línea punteada en gráfico inferior) obtenidas como resultado del estudio hecho en [78] para carga máxima (línea oscura) y carga excedida (línea clara). Etapa de bajada: antes de  $T'_0$ , etapa de subida: después de  $T'_0$ . Imagen tomada de [78].

### Patrón de fuerza en carga excedida

En el estudio de B.Elliot et al., [23] se logró determinar el comportamiento característico de fuerza ejercida por la persona sobre una carga excedida. Este comportamiento se puede ver en la figura 2-12, donde se evidencia un comportamiento oscilatorio similar al revisado

anteriormente en el patrón de fuerza en carga máxima, con la diferencia de que en este caso no se completa la curva de desaceleración final.



**Figura 2-12.:** Curva representativa de la fuerza ejercida por el individuo sobre una carga excedida, obtenida como resultado del estudio hecho por B.Elliot et al., [23]. Graficada únicamente la etapa de subida. Imagen tomada de [23]

### Patrón de trayecto en carga excedida

Cuando se superan las capacidades del individuo para levantar la carga, esta pierde la aceleración de subida y eventualmente la altura también. El efecto mencionado se puede observar en la gráfica de altura/tiempo sobre la figura 2-11, obtenida durante el estudio de R.Van Den Tillaar [78]. Otro efecto propio del trayecto en el caso de carga excedida, es la tendencia de dirigir la barra horizontalmente hacia los hombros, patrón visto en los estudios de R.Van Den Tillaar et al., en la figura 2-10 y de B.Elliot en la figura 2-4.

### Segmentación de la curvas

Aunque de los estudios consultados se observa una sólida correspondencia entre las curvas cinemáticas de carga leve, máxima y excedida, en la documentación revisada se ha encontrado asimismo discrepancia en la forma en que dichas curvas han de ser interpretadas. Lo anterior a causa de que los autores hayan propuesto individuales formas de subdividir e interpretar el desarrollo de la prensa de banco según su propio criterio. Dichas postulaciones serán presentadas a continuación:

#### Criterio de N.Madsen et al.,

En el estudio de N.Madsen et al., [49] se propuso la segmentación adoptada por C.Green [28], y dispuesta sobre las figuras 2-7, 2-5, 2-9, 2-2 y 2-1. Este modo de segmentación consta de 9 puntos, definidos según sucesos cinemáticos clave manifestados durante el ejercicio:

Los puntos "STRT", "MXVL", "MXAL", "CHST", "MXAR", "MXVR", "MNAR", "MNVR" y "END", descritos a continuación.

**Los 9 puntos clave en la prensa de banco según N.Madsen et al., [49].:**

- STRT (1): Inicio del ejercicio, brazos completamente estirados y barra en reposo.
- MXVL (2): La barra alcanza la máxima velocidad de bajada.
- MXAL (3): La barra alcanza la máxima desaceleración mientras sigue bajando.
- CSHT (4): Llegada de la barra al tórax.
- MXAR (5): Máximo local de aceleración ascendente después de llegar al tórax.
- MXVR (6): Máxima velocidad ascendente después de llegar al tórax.
- MNAR (7): Mínimo local de aceleración ascendente después de llegar al tórax.
- MNVR (8): Mínimo local de velocidad después de llegar al tórax.
- END (9): Final del ejercicio, brazos completamente estirados y barra en reposo.

**Criterio de B.Elliot y G.Wilson et al.,**

En las investigaciones de B.Elliot y G.Wilson et al., [23,83] se determinaron 7 puntos clave según los cuales, las curvas cinemáticas de fuerza en el tiempo (figuras **2-3**, **2-6** y **2-12**) y trayectoria (figura **2-4**) serían fraccionadas. Dichos puntos dividirían las mencionadas gráficas en 2 etapas para carga leve y 4 etapas tanto para cargas máxima como excedida. Los puntos y segmentos mencionados serán descritos a continuación:

**Los 7 puntos clave en la prensa de banco según B.Elliot y G.Wilson et al., [23,83]:**

- Chest (1): Barra en la altura mínima posible, al nivel del pecho.
- Peak acceleration (2): Aceleración máxima al inicio de la subida.
- Peak velocity (3): Velocidad máxima de subida.
- Minimum acceleration (4): Aceleración mínima local percibida.
- Minimum velocity (5): Velocidad mínima percibida.
- Peak acceleration M.S.R (6): Aceleración local máxima, debida al reflejo monosináptico por estiramiento (M.S.R).
- Maximum displacement (7): Altura máxima posible, brazos en extensión completa

**Los 4 segmentos clave en la prensa de banco según B.Elliot y G.Wilson et al., [23, 83]:**

- Acceleration phase: Aceleración inicial producto de un empuje con fuerza mayor al peso de la carga.
- Sticking region: Región del ejercicio en el que al individuo se le dificulta particularmente superar el peso de la carga. (Tema abordado con mayor detalle más adelante).
- Maximum strength region: Región de mayor desarrollo de fuerza muscular para el levantamiento de la carga.
- Deceleration phase: Desaceleración de la carga al final del levantamiento.

### **Criterio de R.Van Den Tillaar et al.,**

En las gráficas presentadas sobre las figuras **2-11** y **2-10** se implementó la segmentación propuesta en el estudio de R.Van Den Tillaar et al., [78]. Para este autor, la cinemática de la prensa de banco debe ser dividida en 4 secciones delimitadas por 4 puntos, los cuales abarcan la totalidad de la trayectoria de la barra, desde que esta desciende. Los mencionados parámetros de segmentación se presentan a continuación:

**Los 4 puntos clave en la prensa de banco según R.Van Den Tillaar et al., [78]:**

- $T_{v_{down}}$ : Máxima velocidad de bajada.
- $T_0$ : Punto de altura mínima.
- $T_{v_{max}}$ : Máxima velocidad de subida.
- $T_{v_{min}}$ : Mínima velocidad local de subida.

**Los 4 periodos clave en la prensa de banco según R.Van Den Tillaar et al., [78]:**

- Periodo excéntrico: de  $T_{v_{down}}$  a  $T_0$ .
- Presticking period: de  $T_0$  a  $T_{v_{max}}$ .
- Sticking period: de  $T_{v_{max}}$  a  $T_{v_{min}}$ .
- Poststicking period: de  $T_{v_{min}}$  y duración del mismo tiempo que la "sticking period".

## Patrones secundarios

Con el propósito de informar al lector, se presenta a continuación una serie de patrones adicionales a los observados en las curvas cinemáticas expuestas anteriormente. Dichos patrones han sido clasificados como "aspectos secundarios" debido a la reducida relevancia que tienen en torno al reconocimiento de una situación de riesgo sobre la prensa de banco, por métodos cuantitativos.

### Patrones secundarios reconocidos en la prensa de banco:

- Las personas experimentadas en el desarrollo de la prensa de banco tienden a emplear mayor tiempo para completar un ciclo completo (bajada y subida de la carga) del ejercicio [49].
- El patrón cinemático de la barra durante la bajada no se ve afectado por la capacidad del individuo para soportar la carga, sea esta leve, máxima o excedida.
- El momento de fuerza sobre el eje del hombro no es un factor crítico en la ejecución de la prensa de banco [28].
- Las mediciones de actividad muscular no son representativas del desarrollo del ejercicio [23, 83].
- A mayor carga, mayores índices de actividad muscular sobre los tríceps [46].
- Las personas experimentadas en el desarrollo de la prensa de banco desarrollan un patrón de fuerza más homogéneo (menor diferencia entre fuerza máxima y mínima) [49].
- Conforme más repeticiones de prensa de banco son ejecutadas, más se aleja el patrón de subida de una trayectoria rectilínea [22].

## 2.5. Teoría del fallo en la prensa de banco

Muchos de los estudios consultados se han motivado en determinar las causas principales de fallo durante la ejecución de la prensa de banco. Sobre lo cual, cada autor ha señalado un aspecto específico, que según su propio criterio, es causante crucial del estancamiento durante la elevación de la barra, cuando esta le representa al individuo una carga excedida.

En esta sección se aborda la importante polémica que la "teoría de fallo en la prensa de banco" ha generado. Para lo cual se contrastarán las hipótesis más importantes alrededor del tema.



## Periodo, punto o región pegajosa

Sobre las curvas cinemáticas presentadas anteriormente se ha visto un patrón distintivo durante los levantamientos con carga máxima y excedida, el cual es crítico identificar. Esto debido a que por lo menos la mitad de los levantamientos fallidos en la prensa de banco ocurren después y por causa de este efecto [78]. Dicho patrón corresponde con la disminución del impulso de subida de la barra (velocidad en las figuras **2-13 2-14 2-8**; aceleración en las figuras **2-5 2-6 2-12**). Este efecto ha sido nombrado de diferentes maneras según el contexto en que haya sido ubicado: "periodo pegajoso" (sticky period) cuando se considera en un marco temporal, "punto pegajoso" (sticky point) cuando se entiende cómo un instante de la trayectoria de la carga o "región pegajosa" (sticky region) cuando se le sitúa dentro de un segmento en el recorrido del cuerpo levantado.

A la disminución en el impulso de elevación de la carga se le han atribuido históricamente diversas causas. Para abordar la discrepancia que se ha generado alrededor del mencionado efecto, se han agrupado dichas postulaciones según el contexto temporal o espacial en que hayan sido ubicadas. Lo anterior con el motivo de dar orden a los conceptos propuestos en el estado del arte consultado, y llegar a la postura que se adecúe mejor al contexto de diseño del proyecto.

### Sticky point

La primera vez que se hizo referencia a la disminución en el impulso de subida de la carga fue en 1962, durante el estudio de D.Kloppenburg [42]. Dónde se denominó cómo "Sticking Point" al momento en que las capacidades corporales del individuo le impiden lidiar con una de las siguientes situaciones: realizar más repeticiones de levantamiento con una misma carga, o efectuar el mismo número de repeticiones con una carga mayor.

N.Madsen et al., [49] se refiere al "punto pegajoso" cómo aquel instante en que la fuerza transmitida hacia la carga es mínima. Fenómeno que sería reconocido cómo el valor más bajo dentro de una importante disminución en la aceleración de subida de la carga (figura **2-5**). El autor de esta teoría responsabiliza a la posición poco ventajosa para el desarrollo de fuerza, que el individuo es obligado a adoptar cuando la barra se encuentra en el punto de altura más baja (al nivel del tórax, punto 4 en la figura **2-9**).

En el estudio de J.Kompf [45] se reconoció cómo "punto pegajoso" al patrón de caída en la fuerza de empuje dirigida hacia la barra. A este efecto se le atribuye la fatiga muscular o MMF<sup>4</sup> cómo principal obstáculo a la hora de enfrentar una magnitud de peso que le repre-

---

<sup>4</sup>Momentary Muscular Failure: momento en que la fuerza muscular se ha reducido al punto de no poder ejercer la fuerza esperada

sente al individuo una carga excedida.

### **Sticky region**

Los estudios realizados por B.Elliot et al., [23] y G.Wilson et al., [83] describen la dificultad para levantar la carga cómo una "región pegajosa", durante la cual, la capacidad del individuo de desarrollar fuerza mecánica se ve reducida. A esta disminución se le justificó cómo el efecto de una transición dada entre 2 escenarios convenientes para el levantamiento de la carga; transición durante la cual, las extremidades superiores se encuentran ubicadas en una posición mecánica poco provechosa para transmitir fuerza. Respecto de los escenarios convenientes para el levantamiento de la carga, el primero de ellos corresponde con impulso contribuido por la energía almacenada en los tendones (MSR: Muscle Stretch Reflex) [10], y el segundo con la adopción de postura biomecánica ventajosa para continuar con el levantamiento de la barra (maximum strength region). Ver figuras **2-6** y **2-12**.

### **Sticky period**

La particular dificultad en el levantamiento de cargas máxima y excedida, ha sido reconocida por R.Van Den Tillaar [78] desde una postura ampliamente conocida y adoptada por otros autores (H.Król [46]), en la cual se denomina el mencionado efecto cómo un "periodo pegajoso". Esta teoría se caracteriza por la detección de una importante reducción en la velocidad de subida de la barra (entre  $T_{V_{max}}$  y  $T_{V_{min}}$  de la figura **2-11**) provocada por el surgimiento de un punto de aceleración ascendente mínima. La razón de dicho surgimiento es, según R.Van Den Tillaar [78], por demora en la transición de la máxima activación muscular, de los tríceps a los deltoides y pectorales.

### **Postura tomada**

El análisis del estado del arte consultado le ha permitido al autor conseguir el criterio suficiente para adoptar una postura propia respecto de la adecuada interpretación de la mencionada dificultad en el levantamiento de la carga. Dicha postura, justificada a continuación, fue tomada para efectos de compatibilidad con las intenciones de diseño en este proyecto.

La postura tomada en torno a la enigmática región, periodo o punto pegajoso fue fundamentada en aquellas hipótesis que facilitarían el diseño del proyecto. Facilidad que se vería reflejada desde la simplicidad adquisitiva de la información cuantitativa suficiente para identificar una situación de riesgo durante la ejecución de la prensa de banco.

Teniendo en cuenta el vínculo existente entre la trayectoria espacial de la barra, y el contexto temporal en que evoluciona la postura corporal del deportista para levantar la carga, se considera pertinente entender el efecto "pegajoso" cómo una asociación entre las posturas que lo describen cómo una región y aquellas que se refieren a él cómo un periodo. Recalcando la facultad de ambas percepciones, de contar con métodos cuantitativos para identificar el mencionado efecto.

El primer aspecto cuantitativo asociado directamente con el desempeño deportivo durante la prensa de banco, y a partir de cuyo seguimiento se podría estimar cierto nivel de riesgo de fallo en el levantamiento de la carga es la aceleración. Puesto que a través del seguimiento de dicha variable, es posible reconocer tanto la disminución en la velocidad de subida, cómo de la fuerza ejercida sobre la carga; efecto que, entre más tiempo sea prolongado, da cuenta de la mayor probabilidad que el individuo tiene de ceder ante el peso que espera levantar [23,83].

El segundo aspecto cuantitativo asociado con la dificultad en el levantamiento de la carga es la región transitoria de desventaja mecánica para ejercer fuerza, reconocida inicialmente por B.Elliot et al., y G.Wilson et al., [23, 83]. Dicha región, a pesar de ser compuesta por un rango específico de posiciones articulares difíciles de cuantificar, puede ser identificada a partir de la medición de la posición de la barra: análogamente entre los 2 y los 13 centímetros de distancia del pecho [79].

## Efecto de la fatiga

Los ejercicios de entrenamiento muscular no suelen componerse de una única fase concéntrica<sup>5</sup> y excéntrica<sup>6</sup>, sino por el contrario de varias repeticiones sucesivas de estas. Debido a lo anterior, se determina la necesidad de conocer la evolución de la prensa de banco hasta culminar en el fallo del levantamiento de la carga por fatiga, cómo lo plantea la "American College of Sports Medicine" para un efectivo desarrollo muscular [64, 65]. Esto con la intención de complementar la información cuantitativa hasta el momento adquirida para identificar el riesgo de lesión durante la ejecución de la prensa de banco.

El estudio de M.Duffey et al., [22] analiza la incidencia de la fatiga muscular sobre la fase concéntrica en el levantamiento de la carga. Esta información se obtuvo por medio de la medición de la curva de velocidad de la barra conforme una carga del 75 % de la carga máxima era levantada en repetidas ocasiones hasta llegar al fallo muscular.

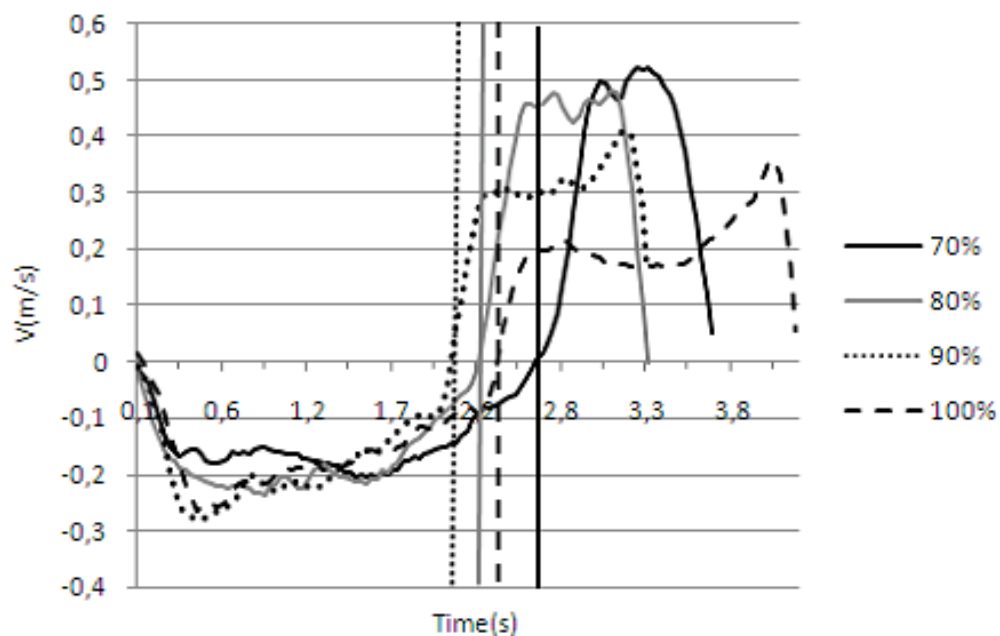
En el estudio mencionado anteriormente se encontró que, conforme se desarrollaba el ejerci-

---

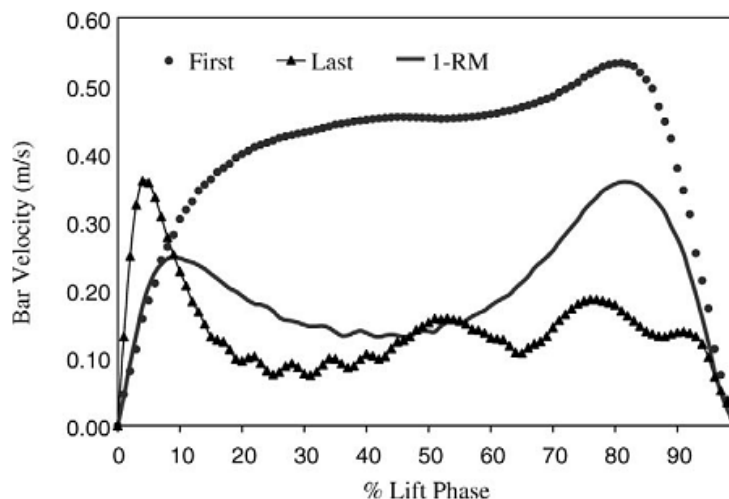
<sup>5</sup>Contracción muscular

<sup>6</sup>Relajación muscular

cio con carga leve, el patrón cinemático de la primera repetición (acorde con una cantidad de peso pequeña) se convertía progresivamente en uno propio de carga máxima. Esta transformación puede evidenciarse en la figura 2-14, dónde la velocidad de la barra medida en una única repetición con carga máxima se contrasta con el obtenido en la primera y última repetición de una serie. Cabe agregar la concordancia de dicha transición con el comportamiento observado en el estudio de H.Król et al., [46], en dónde se comparan las curvas de velocidad correspondientes con porcentajes del 70 %, 80 %, 90 % y 100 % de una repetición con carga máxima (figura 2-13).



**Figura 2-13.:** Curvas representativas de velocidad/tiempo según fracciones del 70 %, 80 %, 90 % y 100 % de la carga máxima, obtenidas como resultado del estudio hecho por H.Król et al., [46]. Las divisiones verticales marcan el cambio de trayectoria de la barra, de bajada a subida, en cada uno de los porcentajes de la carga máxima. Imagen tomada de [46].



**Figura 2-14.:** Curvas representativas de velocidad en la subida de la barra. Obtenidas durante el estudio de M.Duffey et al., [22] para contrastar el comportamiento cinemático de una repetición en carga máxima (1-RM) (línea continua) junto con el resultado de la primera (línea de círculos "•") y la última repetición (línea de triángulos "▲") de una secuencia efectuada con carga leve. Imagen tomada de [22]

Además del efecto detectado sobre la curva de velocidad en el tiempo, otras tendencias fueron identificadas por M.Duffey et al., [22] y H.Król et al., [46] a lo largo de una serie de repeticiones en la prensa de banco. Estas se presentan a continuación:

- El tiempo empleado para terminar cada repetición aumenta.
- Se reduce el pico de velocidad de subida.
- El pico de velocidad de subida ocurre con mayor antelación (líneas verticales en la figura 2-13).
- Se mantiene mayor cercanía de la barra con los hombros.

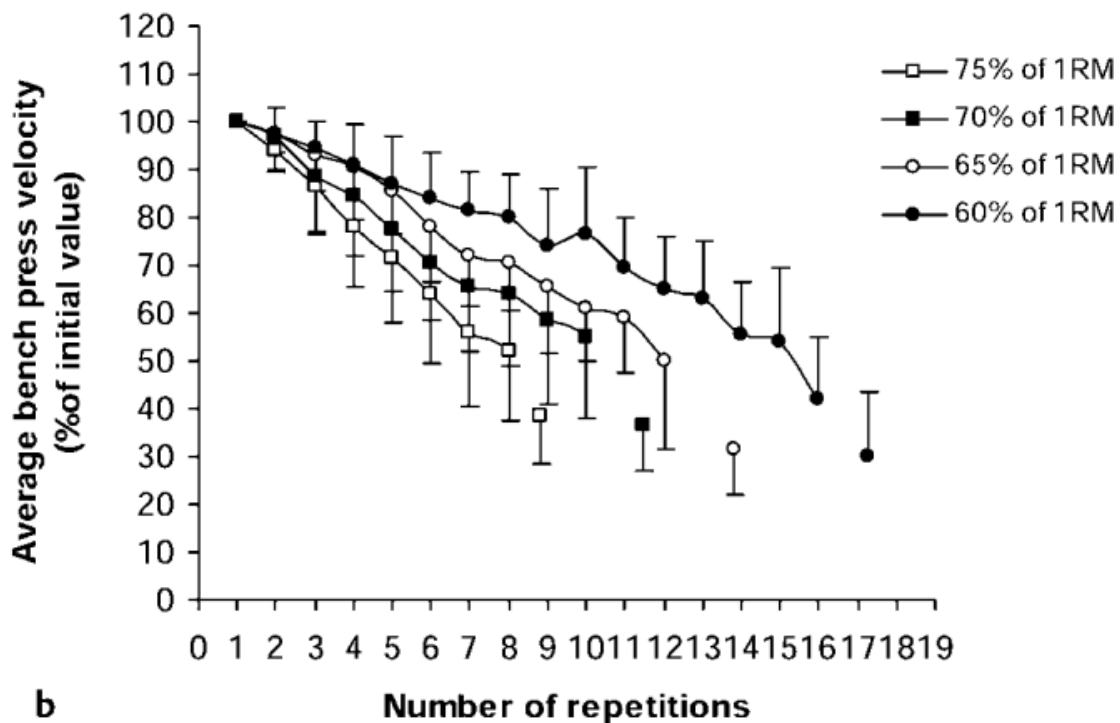
## Estimación de límite de repeticiones

A favor de aumentar la seguridad de quienes se ejerciten a través de la prensa de banco, es indispensable reconocer una situación de riesgo cuanto antes. Para lo cual una estimación de la cantidad máxima de repeticiones, antes de fallar en el levantamiento de la carga puede ser muy conveniente.

En el trabajo de M.Izquierdo [33] se estudió la disminución de la velocidad de subida de la barra por repetición, dentro de series efectuadas con diferentes porcentajes de una carga

máxima (60 %, 65 %, 70 % y 75 % en la figura 2-15). Dicho estudio propuso una ecuación estadística, a partir de la cual se podría estimar un umbral mínimo de repeticiones faltantes, dentro de las cuales se asegura el valor de velocidad que representa seguridad en la ejecución de la prensa de banco. Para M.Izquierdo, un levantamiento fallido se confirma cuando se reconoce una pausa de más de 1 segundo en la barra.

Por otro lado, C.Ridgely asegura que por medio de una regresión lineal se podría estimar el límite de repeticiones que un individuo podría ejecutar [66]. Dicho método implicaría el previo registro personal de 2 ejecuciones en la prensa de banco; uno con carga máxima (1RM) y otro con la carga suficiente que le permita a la persona completar 2 repeticiones únicamente (2RM). Información con la cual, la ecuación de una recta sería calculada y posteriormente usada para estimar la cantidad máxima de repeticiones que el individuo podría ejecutar con menos peso.



**Figura 2-15.:** Evolución de la velocidad media de la barra en la prensa de banco conforme el número de repeticiones aumenta (en porcentajes del valor medido en la primera repetición) obtenidas como resultado del estudio hecho en [33], a cargas del 60, 65, 70 y 75 % de 1RM. Imagen tomada de [33]

## 2.6. Prevención de accidentes

Una importante cantidad de información valiosa respecto de la evasión de accidentes y superación del "efecto pegajoso" fue recopilada durante el desarrollo de este capítulo. Con el fin de registrar dicho conocimiento e informar al lector, a continuación se presenta una serie de recomendaciones a ser implementadas en el contexto deportivo de entrenamiento con pesas:

### Recomendaciones:

- Se recomienda un descenso suave en la etapa excéntrica de la prensa de banco, pues de este modo se reduciría la fuerza necesaria para detener y posteriormente elevar la carga [49]
- Un agarre más amplio de la barra permitiría un mejor desempeño en el actuar de los músculos involucrados en la prensa de banco [49]. En concordancia con los hallazgos de C.Green [28] (Manos ubicadas en posiciones G3 y G4).
- J.Kompf et al., [45] presenta 5 recomendaciones para el entrenamiento:
  1. **Trabajo aislado:** Identificar y fortalecer el músculo menos desarrollado al ejecutar un ejercicio para aumentar el desempeño en este [1]. Dicha identificación es propia de cada persona.
  2. **Repeticiones parciales y entrenamiento isométrico:** Desarrollar ocasionalmente las repeticiones en el rango donde se encuentra la "región pegajosa" (2 y 13 cm según R.Van Den Tillaar [79]) para mayor exigencia muscular [50]. También se consideran los entrenamientos isométricos<sup>7</sup> como benéficos para el desarrollo de fuerza [27, 34, 41]. Según C.Thepaut-Mathieu [76] y J.Knapik [43], ejercicios desarrollados en sección limitada de ROM<sup>8</sup> (repeticiones parciales y ejercicio isométrico) aportan hasta en un 10 % o 20 % de la formación de fuerza. [43, 76].
  3. **Momento:** El uso de músculos ajenos al ejercicio puntual que se quiera desarrollar, para apoyarlo mediante "empujones", permite estimular de manera significativa el sistema músculo esquelético. Considerar también el uso de cargas pequeñas para ser levantadas con potencia explosiva.
  4. **Alteración de la técnica:** Modificar la técnica de levantamiento con regularidad daría la posibilidad de adaptarse al impacto del "efecto pegajoso" en cuanto al momento y posición biomecánica en que se produce. Lo anterior debido a la alteración de los momentos particulares en que los músculos se encuentran en una posición mecánica desfavorable [23, 28]. Por otro lado, cambiar conscientemente

<sup>7</sup>Ejercicios que consisten en mantener estática la carga

<sup>8</sup>Amplitud de movimiento articular (Range Of Motion): rango de desplazamiento angular de que puede recorrer una articulación

tiempo bajo tensión isométrica serviría para el desarrollo de fuerza muscular [1]. Cabe recalcar el especial cuidado y modo progresivo con el que se deben desarrollar los cambios mencionados para evitar lesión alguna.

5. **Resistencia variable:** Agregar elementos que varíen la fuerza de la carga durante el ejercicio han demostrado ser efectivos para el desarrollo de fuerza (i.e resortes o cadenas acopladas a las pesas) [7, 55].
  - R.Van Den Tillaar et al., [79] recomienda, para mejorar el desempeño en la prensa de banco, entrenar regularmente este ejercicio manteniendo la barra en los alrededores de la "sticky region"; es decir entre los 3 y 16 cm de distancia del pecho.
  - M.Duffey [22] le sugiere a entrenadores y principiantes, prestar mayor atención en la ejecución de una apropiada trayectoria de barra más que en llegar al fallo muscular, en pro de evitar accidentes y mejorar el desempeño durante la prensa de banco. Lo anterior se fundamenta en las postulaciones de P.Komi [44], y T.Moritani et al., [54] en cuanto a que los primeros avances en el entrenamiento con pesas se deben a una adaptación psicológica sobre la ejecución correcta del ejercicio.
  - J.Lander et al., [48] recomienda mantener un ángulo no mayor de 45 grados entre el brazo y el tórax durante el desarrollo de la prensa de banco. Esto para evitar la posición "antinaural" de las articulaciones del hombro.



## 3. Diseño

### 3.1. Relevancia del capítulo

Se resalta la importancia de este capítulo por conformar el objetivo central del proyecto ("asistir la tarea que el observador debe realizar durante el ejercicio de la prensa de banco para reducir los riesgos de accidente, mediante el diseño de un sistema mecánico inteligente"). El cual, por los métodos explicados a continuación, será materializado en términos de asignación de un buen enfoque de diseño y recursos, según las condiciones de funcionamiento esperadas.

El desarrollo de este capítulo será conforme con la metodología sugerida por G.Dieter y L.Schmidt [20], a través de la cual se consolidó el diseño del componente físico del proyecto. Este componente es segmentado en 2 partes, cada una enfocada en asistir al observador sobre las puntuales insuficiencias tenga a la hora de supervisar la prensa de banco.

Cómo primer enfoque de trabajo se plantea un **diseño mecánico**, por medio del cual se complementa al observador en su tarea de auxiliar al levantador cuando a este último se le ha resbalado la carga, o se encuentra atrapado por ella. Dicha asistencia se justifica en el tiempo de reacción humana que es insuficiente para socorrer oportunamente la caída de la carga sobre el levantador; así cómo también es insuficiente la fuerza del asistente para remover el peso implicado.

Cómo segundo enfoque de trabajo se plantea un **diseño electrónico**, por medio del cual se pretende identificar y alertar al observador del riesgo que amenace la integridad del levantador. Lo anterior a causa de la dificultad humana de percibir patrones distintivos de un próximo fallo durante la ejecución de la prensa de banco, y así proceder con la asistencia correspondiente.

### 3.2. Pasos de diseño

Buscando familiarizar al lector con la metodología acogida para conformar tanto el componente mecánico cómo el electrónico, se precisa de una explicación general de los pasos

sugeridos por G.Dieter y L.Schmidt [20] para encaminar efectivamente el enfoque de diseño y recursos, de modo que se cumpla adecuadamente con las expectativas del producto diseñado. La metodología implementada se subdivide y organiza cómo se presenta a continuación:

1. **Diseño conceptual (Conceptual Design):** Inicio del proceso de diseño, dónde ideas de posibles soluciones brotan y se contrastan para seleccionar la más adecuada.
  - a) Identificación de las necesidades de cliente (Identification of customer needs): Se identifica al cliente y las exigencias que este imponga sobre el producto por diseñar, conocidas cómo "CR's" (Customer Requirements).
  - b) Definición del problema (Problem definition): Definir con claridad la totalidad del problema, incluyendo objetivos clave que pongan las bases de cambio entre el estado actual de la problemática y uno mejor, al cual se desea llegar con el proyecto.
  - c) Recolección de información (Gathering information): Recolección de productos similares o relacionados al que se quiere desarrollar. Cómo fuentes se pueden tomar: elementos comerciales, artículos académicos, patentes, vídeos, blogs de diseño u otros. A partir de esta investigación se genera un criterio de diseño asociado al problema que se desea enfrentar.
  - d) Conceptualización (Conceptualization): Planteamiento de diversas soluciones factibles a la problemática identificada anteriormente (denominados "conceptos"). Pueden ser ideas propias o incluso la implementación de productos ya existentes.
  - e) Selección del concepto (Concept selection): Comparación, evaluación y selección del concepto más adecuado a las exigencias de cliente. Además puede darse la modificación y evolución del seleccionado en un diseño todavía mejor.
  - f) Características de ingeniería (Engineering characteristics): Establecer el modelo matemático del concepto. Puede incluir la definición de geometría, restricciones, leyes físicas, diagramas de cuerpo libre y/o ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento del sistema, según se considere necesario.
  - g) PDS - Especificaciones para el diseño de producto (Product Design Specification): Breve documento dónde se incluyen las especificaciones y limitaciones más importantes del diseño seleccionado. Debe tener un especial enfoque en las exigencias de cliente definidas anteriormente.
  - h) Revisión del diseño (Design review): Revisión del diseño en pro de la identificación de estrategias para minimizar tiempo de mecanizado, recursos, equipo y dinero necesario para completar el proyecto.
2. **Materialización del diseño (Embodiment design):** Se formalizan aspectos puntuales del diseño.

- a) **Arquitectura del producto (Product architecture):** División del diseño general en subsistemas. También se decide cómo los componentes físicos que componen el producto deben organizarse y combinarse para cumplir con sus tareas funcionales.
  - b) **Diseño de piezas y componentes (Configuration design of parts and components):** Se diseñan piezas especiales y se escogen los elementos comerciales necesarios. Asimismo, se determinan las características de los componentes y cómo se relacionan entre sí. Cabe agregar en esta fase el inicio de la selección de materiales candidatos.
  - c) **Diseño paramétrico de partes (Parametric design of parts):** Se definen puntualmente las dimensiones y tolerancias de las piezas, además de una selección final del material y procesos de manufactura. Se realizan también exámenes de parte, ensamble y sistema para validar su desempeño frente a los esfuerzos que se puedan presentar.
3. **Diseño de detalle (Detail design):** Descripción formal de la totalidad del proyecto. Esta sección está compuesta por los siguientes entregables:
- Planos de ensamble y piezas.
  - Verificación de cumplimiento de las exigencias de cliente.
  - Especificación detallada del producto, incluyendo la evolución de este desde su diseño conceptual.
  - Costo estimado.
  - Revisión final del diseño.

### 3.3. Diseño mecánico

#### Diseño conceptual

Esta fase es la considerada cómo la de mayor cuidado e importancia. Lo anterior debido a su repercusión sobre el resto de las etapas de diseño (Materialización del diseño y Diseño de detalle), puesto que toda decisión que aquí se defina, guiará el camino que tomará el proyecto, afectándolo en materia de tiempo y recursos económicos.

Conociendo la importancia de esta fase en el diseño, con mucho cuidado cada decisión fue tomada con la precaución de haber adquirido previamente un criterio en el diseño de elementos mecánicos en torno al entrenamiento con pesas y mecanismos de seguridad, consolidándose así, una propuesta integral frente a las exigencias de cliente más importantes. Para llegar al resultado mencionado anteriormente se siguieron los pasos sugeridos por G.Dieter y L.Schmidt [20], cómo se presenta a continuación:

### Identificación de las necesidades de cliente

**Lluvia de ideas** Por recomendación de G.Dieter y L.Schmidt [20], la identificación de necesidades de cliente parte de una recopilación extensa de todas aquellas falencias que pueden, en mayor o menor medida, presentarse en el ámbito que se desea mejorar, para este caso: la seguridad que el observador ofrece sobre la ejecución de la prensa de banco. Para lo cual se concibió apropiado una lluvia de ideas (Brainstorming)<sup>1</sup> sobre lo que el cliente (observador y levantador) pueda necesitar.

La lluvia de ideas sobre críticas, falencias y complementos que pueden darse en el entorno de la ejecución y supervisión de la prensa de banco, fue alimentada con experiencias personales y entrevistas de instructores y colegas en el entrenamiento con pesas. Como resultado del ejercicio, un total de 53 ideas se determinaron; y aunque ninguna fue discriminada, sí se resaltaron las que estuvieran asociadas con ámbitos de seguridad.

**Diagrama de Afinidad** Posteriormente los elementos producto de la lluvia de ideas fueron organizados en lo que G.Dieter y L.Schmidt llaman "Diagrama de Afinidad" (Affinity Diagram). Esta es una tabla que permite concretar con mayor facilidad las exigencias de cliente (CR's), al agrupar por columnas, las ideas con características similares.

Los 53 elementos de la lluvia de ideas fueron agrupados en la "Affinity Diagram" presentada en la tabla **3-1** compuesta por 4 columnas, cada una nombrada haciendo alusión a: **Intervención** sobre el el ejercicio si se ve amenazada la integridad del levantador, **Advertencia** dirigida al observador sobre el nivel de riesgo de fallo que perciba el levantador, **Plus Seguridad** haciendo énfasis a elementos que apoyen en menor medida la seguridad del deportista, y finalmente el grupo **Plus confort**, en el que se enfrascaron todas aquellas ocurrencias que llamen la atención por la comodidad que ofrecerían a los practicantes de la prensa de banco.

Intervención	Advertencia	Plus Seguridad	Plus confort
Protección anti-caídas	Alerta de fallo	Estimulación psicológica	Comodidad
Asistencia de levantamiento	Corrección de postura	Estimulación auditiva, visual y táctil	Comodidad visual
Forzamiento de postura adecuada	Corrección de técnica	Supervisión de técnica	Confianza visual
Aseguramiento voluntario de la carga	Corrección de respiración	Supervisión de postura	Iluminación

<sup>1</sup>Lista extensa que recopila todas las ideas espontáneas que surjan.

<p>Aseguramiento rápido frente a caída libre</p> <p>Aseguramiento frente a desvíos de la barra</p>	<p>Corrección de buen agarre a la barra</p> <p>Concentración de spotter</p> <p>Contacto de emergencias</p>	<p>Supervisión de respiración</p> <p>Supervisión de buen agarre a barra</p> <p>Supervisión de apoyo pedal</p> <p>Antideslizamiento en barra</p> <p>Protección para muñecas</p> <p>Protección para codos</p> <p>Protección para hombros</p> <p>Protección para dedos</p> <p>Protección para rostro</p> <p>Protección para tórax</p> <p>Estabilidad del banco</p> <p>Ventilación</p> <p>Apoyo para la cabeza</p> <p>Apoyo para el cuello</p> <p>Cálculo automático del peso cargado</p> <p>Estimación de peso y cantidad de repeticiones</p> <p>Piso despejado</p> <p>Muñequeras</p> <p>Fiabilidad en el aseguramiento de discos</p>	<p>Protección de olores</p> <p>Historial de desempeño</p> <p>Visibilidad gráfica de desempeño y evolución</p> <p>Saber fuerza máxima ejercida (entendible, con analogías)</p> <p>Protección de olores</p> <p>Aislamiento de ruido</p> <p>Cálculo de la fuerza ejercida</p> <p>Ubicación sencilla de discos de peso</p> <p>Ubicación sencilla de barra</p> <p>Ubicación sencilla de spotter</p> <p>Consejos de mejora</p> <p>Protección de distracciones</p>
--	--	--	---

---

**Tabla 3-1.:** Diagrama de afinidad desarrollado para el diseño mecánico. Tabla elaborada por el autor

### Definición del problema

Con la intención de encaminar el diseño del producto hacia responder las exigencias de cliente más relevantes en materia de seguridad, 12 elementos críticos fueron destacados del diagrama de afinidad. Esto debido a su cooperación para poner en riesgo la seguridad de los practicantes de la prensa de banco. Respecto de los elementos destacados, estos se presentan a continuación:

1. Carencia de una barrera protectora, no interferente con el desarrollo normal de ejercicio, que proteja al levantador cuando la carga que está suportando le represente un peligro para su integridad.
2. Limitaciones del ser humano para asistir de manera efectiva a las personas que se encuentren desarrollando la prensa de banco, a causa de: Dificultad para identificar una situación de riesgo, distracciones que afecten la atención del observador, carencia del tiempo de reacción suficiente para proceder con una asistencia oportuna, y finalmente insuficiencia de la fuerza mecánica para proteger al levantador de una carga elevada.
3. Barreras de comunicación entre las necesidades de asistencia del levantador y su respectivo observador. Las cuales son causadas por un incremento en la dificultad de la vocalización cuando una actividad de fuerza como la prensa de banco se está llevando a cabo. Por otro lado, se han encontrado que los prejuicios sobre la masculinidad asimismo obstaculizan la solicitud de asistencia, incrementando los índices de lesión [63].
4. Sobreestimación por parte del levantador, de la cantidad de peso que es capaz de levantar. Esto implicándole un riesgo enorme desde el momento en que ha retirado la barra de sus soportes.
5. Adopción de posturas "antinaturales<sup>2</sup>" dañinas para las articulaciones del hombro, muñecas y codos, revisadas en el estudio de J.Lander et al [48].
6. Agarre erróneo de la barra, afectando la salud de las muñecas del levantador.

---

<sup>2</sup>Posiciones corporales perjudiciales para las articulaciones, durante la realización de ciertas actividades

7. Resbalamiento de la carga sobre el levantador. Esto fomentado por la tendencia de agarrar la barra sin la incorporación del pulgar. Situación que es común incluso hasta en el entorno profesional.
8. Inestabilidad de equipos de entrenamiento. El descuido y la falta de mantenimiento de los bancos sobre los que se desarrolla el ejercicio, conllevan a que estos pierdan la solidez y estabilidad de su estructura.
9. Resbalamiento de los discos de peso ubicados a los laterales de la barra. La situación anterior sucede cuando la carga es accidentalmente inclinada respecto del suelo, ocasionando que los discos se desajusten y caigan desde una altura importante. Lo anterior representando un gran peligro tanto para el levantador, cómo para quienes se encuentren a sus alrededores.

**Conclusión de la problemática** La seguridad de las personas inmersas en el entorno de entrenamientos hipertróficos con pesas se ve duramente amenazada cuando es el tronco superior ejercitado por medio de la prensa de banco. Dicha afirmación se ratifica con la falta de garantías para la salud evidenciada a través de la lista de elementos críticos presentada anteriormente. Últimos que fueron extraídos con la ayuda de la herramienta "diagrama de afinidad" expuesta en la tabla **3-1**.

**Propuesta** Se pudo distinguir un precario compromiso con la salud de las personas por parte de los equipos ofrecidos para el ejercicio de la prensa de banco en modalidad de peso libre. Esta problemática se pretende abordar mediante el establecimiento de 2 soluciones clave: La primera, ofrecer una protección efectiva entre la carga y la anatomía del levantador, afectando lo menos posible el desempeño normal del ejercicio, y la segunda, fortalecer el débil lazo que asocia las exigencias de apoyo por parte del levantador hacia su correspondiente observador. Por otro lado, aspectos menos críticos en materia de seguridad, incluidos en el diagrama de afinidad (tabla **3-1**), serán relevados cómo proyectos posteriores complementarios.

**Despliegue de la función calidad** Buscando comunicar las exigencias de cliente con los aspectos de ingeniería más relevantes con los cuales darles respuesta, se aplicó parte de la herramienta conocida cómo "Despliegue de la Función Calidad" (QFD - Quality Function Deployment). Dicha herramienta es recomendada por G.Dieter y L.Schmidt [20] para componer un proyecto de diseño óptimo, separando la evolución de este en las siguientes 4 etapas:

1. **Casa de la calidad (HOQ - House of Quality)**: Realiza una comparación entre las CR's, calificadas según su grado de importancia de 1 (menor) a 5 (mayor), y una

lista de características de ingeniería (EC's - Engineering Characteristics). Esto con la intención de identificar, de entre todas las EC's, cuáles tienen mayor relevancia a la hora de satisfacer las demandas de cliente.

2. **Desarrollo de parte (Part deployment):** Implica un enfrentamiento entre las ponderaciones de las EC's de la etapa anterior, con una lista de características de acabado o funcionamiento de piezas, ensamblajes y sub-ensamblajes. Lo anterior esperando concebir aquellas características que aportan en mayor medida hacia cumplir las EC's de mayor peso.
3. **Planeación de procesos (Process planning):** Se da una comparación entre las características validadas en la etapa anterior, con una lista de métodos de manufactura. Esperando concretar aquellos métodos de fabricación por medio de los cuales, a los componentes se les pueda dar origen de forma óptima en cuanto al cumplimiento de las características que deben tener.
4. **Planeación de producción (Production planning):** Se considera cómo un refinamiento de la producción, pues enfrenta los métodos de manufactura con requerimientos empresariales puntuales, permitiendo reconocer aspectos que de ser mejorados, optimizarían la producción en materia de tiempo, calidad y economía.

En este proyecto se tuvo en cuenta solamente la primera etapa "casa de la calidad - HOQ". La cual fue implementada en esta fase de diseño conceptual para determinar los más importantes de una serie de aspectos de ingeniería propuestos por el autor.

En correspondencia con la casa de la calidad desarrollada, sobre la figura **3-1** se expone el resultado obtenido. Además, se presentan a continuación las 10 demandas de cliente incluidas sobre el esquema, y a lo que se refiere cada una:

#### **Demandas de cliente (CR's):**

1. CTQ CR's<sup>3</sup> (puntaje = 5):
  - **Velocidad de reacción:** Tiempo transcurrido entre la manifestación del peligro y el accionamiento de seguridad. Crítico debido a la importancia de frenar a tiempo la amenaza, protegiendo a quien desarrolla el ejercicio.
  - **Límite de peso soportado:** Máxima cantidad de peso resistido por la barrera de seguridad. Su magnitud es esencial para asegurar la protección de las personas, independientemente de la magnitud de la carga con la que hayan decidido entrenar.

---

<sup>3</sup>Critical To Quality Customer Requirements: Las demandas de cliente críticas para la calidad



- **Adaptabilidad a prensas de banco:** Facultad del proyecto que le permita adaptarse y complementar el equipo ya existente para prensa de banco. Lo anterior con la intención de que el equipamiento tradicional no tenga que ser reemplazado. Este concepto lograría como efecto secundario un mayor impacto en el mercado, al ser una idea innovadora y rentable en el negocio de los equipos de entrenamiento.

2. CR's (puntaje = 4):

- **Ergonomía:** En el diseño son contempladas medidas antropométricas<sup>4</sup>. Lo anterior de gran importancia puesto a que el sistema no debería en ningún momento incomodar, ni atentar contra la fisionomía del usuario por obligarle a este, a adoptar posturas antinaturales.
- **Durabilidad:** El sistema es diseñado para durar en el tiempo, enfrentando los efectos debilitantes de carga estática, de fatiga y de fluencia lenta.

3. CR's (puntaje = 2):

- **Baja interferencia con el ejercicio:** El desarrollo mecánico no afecta el desempeño natural de la prensa de banco en modalidad de peso libre. Esto considerando los resultados encontrados por M.Cotterman et al [16] sobre el mayor desarrollo muscular a través de ejercicios con pesas en modalidad libre (FW - Free Weight), que con trayectorias pre-guiadas, propias de las máquinas de entrenamiento (EM -Exercise Machine, SM - Smith Machine).
- **Economía:** El costo de los materiales y producción del equipo no debe implicar un obstáculo para su rentabilidad.

4. CR's (puntaje = 1):

- **Portabilidad:** El producto finalizado debe poder ser transportado con facilidad cada vez que se requiera.
- **Estética:** El diseño debe ser atractivo y agradable a la vista de los consumidores.
- **Protección contra líquidos:** Al sistema debe limitársele la filtración de elementos líquidos oxidantes que lo afecten en su rendimiento.

---

<sup>4</sup>Medidas humanas

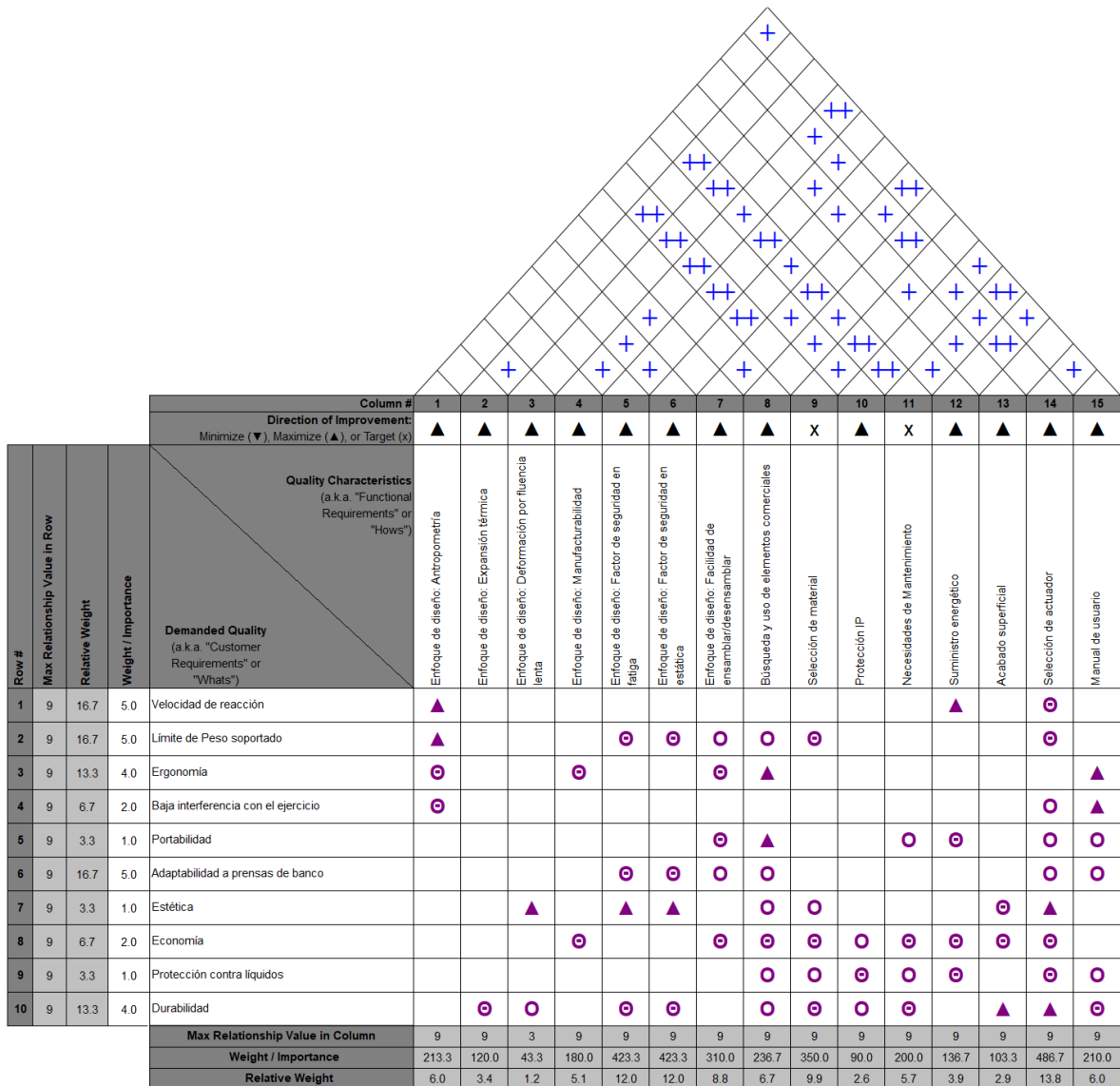


Figura 3-1.: Casa de la calidad desarrollada para el diseño mecánico. Esquema elaborado por el autor.

Cómo resultado de la casa de la calidad elaborada, se presenta a continuación la clasificación de las características de ingeniería (EC's) según su puntaje de relevancia. Además de a qué hace alusión cada una:

**Características de ingeniería (EC's):**

1. **Selección de actuador (Puntaje = 13.8):** Identificación del elemento activo en el aseguramiento de la carga

2. **Enfoque de diseño en factor de seguridad estática y dinámica (Puntaje = 12.0):** Consideración de cargas estáticas como de cargas fluctuantes para la generación de un diseño con un factor de seguridad adecuado para ambos casos. Estudiar la posibilidad de vida infinita para esfuerzos de operación bajo el límite de fatiga.
3. **Selección de material (Puntaje = 9.9):** Estudio de los materiales candidatos a ser implementados en los componentes del sistema, considerando aspectos tales como: facilidad de manufactura, impacto medioambiental, costo y disponibilidad en cantidad y tamaño del suministro.
4. **Enfoque de diseño en facilidad de ensamble y desensamble (Puntaje = 8.8):** consideración de geometrías y relaciones de posición que permitan componer una estructura global sencilla de ensamblar como de desensamblar; útil de ser necesario un mantenimiento.
5. **Búsqueda y uso de elementos comerciales (Puntaje = 6.7):** Investigación y selección de elementos comerciales ya existentes, regulados, de calidad y apropiados para implementar en el diseño.
6. **Enfoque de diseño en antropometría (Puntaje = 6.0):** Las medidas de piezas y sus disposiciones en ensambles son acordes con las proporciones y rangos de movimiento articular de las personas.
7. **Manual de usuario (Puntaje = 6.0):** Documento explicativo de precauciones, recomendaciones e indicaciones puntuales, que le convienen al usuario tener en cuenta respecto del uso del equipo.
8. **Necesidades de mantenimiento (Puntaje = 5.7):** identificación de las revisiones que a futuro tengan que realizarse sobre el sistema. Cabe agregar la importancia de facilitar el acceso a las áreas de manutención desde el diseño conceptual.
9. **Enfoque de diseño en manufacturabilidad (Puntaje = 5.1):** Diseño de piezas fácilmente mecanizables, evitando el uso de geometrías innecesariamente complejas que eleven los costos de producción. Se recomienda considerar medidas comerciales de suministro de materia prima, como de herramientas de mecanizado para esto.
10. **Enfoque de diseño en expansión térmica (Puntaje = 3.4):** Prever cambios de tolerancias en los elementos por expansión térmica. Se considera como aspecto poco relevante por las mínimas variaciones en la atmósfera donde se desempeña esta clase de equipos.
11. **Protección IP (Puntaje = 2.6):** Sellamiento de ranuras y huecos por donde puedan filtrarse líquidos y partículas al interior del producto. Este concepto no se considera crítico debido a la baja correlación de dichos elementos con el uso o ambiente de trabajo

en el que este equipo se desenvolvería. Además, cabe aclarar la exclusividad de este parámetro de ingeniería para con sistemas electrónicos, contraria a esta sección en dónde se concibe un diseño netamente mecánico.

**PDS Preliminar** En busca de delimitar el diseño conceptual, una versión preliminar del documento PDS (especificaciones para el diseño de producto) debe ser formulado [20]. En dicho ejercicio deben presentarse de manera general las características de ingeniería destacadas y tener contempladas las demandas de cliente más relevantes.

**NOTA:** Hay que aclarar, que en este segmento de diseño, las falencias asociadas con facilitar la comunicación entre practicante y "spotter", fueron por el momento prescindidas, dada la facilidad de abordarlas por medios electrónicos; proceso que se llevará a cabo más adelante.

- Identificación del producto:
  - Nombre: Soporte Mecánico.
  - Funciones básicas:
    - Aportar una barrera confiable entre la persona y la carga cuando esta última represente una amenaza para la integridad del levantador.
    - Facilitar la liberación de la persona en caso de que esta se encuentre atrapada por el peso cargado.
  - Características especiales:
    - No interferente con la ejecución normal de la prensa de banco en modalidad de peso libre.
    - Adaptable cómo complemento a los equipos de prensa de banco ya existentes.
  - Potencia de actuador: No se contemplan actuadores ajenos al cuerpo humano.
  - Acometida energética: No requiere.
  - Ambiente de trabajo: Uso exclusivo en interiores.
  - Entrenamiento de usuario requerido:
    - Conocimiento básico de la ejecución de la prensa de banco.
    - Conocimiento general del funcionamiento y uso del equipo "soporte mecánico".
- Descripción física:
  - Dimensiones externas generales: 1300x1300x2000mm
  - Restricciones de uso: 500Kgf cómo peso máximo de aseguramiento y liberación.
- Ciclo de vida:

- Vida útil: Por definir.
- Calendario de mantenimiento: Por definir.
- Requerimientos sociales, políticos y legales:
  - Estándares: Por definir.
  - Responsabilidades para con el producto: Restricción de su uso para fines deportivos, exclusivamente en el contexto de levantamiento de pesas sobre la prensa de banco en modalidad de peso libre.
- Especificaciones de manufactura:
  - Requerimientos de manufactura: Capacidad de soldadura y mecanizado confiables.
  - Proveedores: Rodamientos, perfiles de barra, cadenas y poleas.

### Recolección de información

Se realizó una amplia investigación de los productos, proyectos, patentes e ideas que se relacionaran de alguna manera con la solución al problema que se desea enfrentar. Para lo cual se consultaron fuentes de cualquier índole; desde manuales de productos comerciales y patentes publicadas en Google Académico, hasta foros para la divulgación de ideas<sup>5</sup> y vídeos de inventores aficionados en Youtube. Terminada esta actividad, se consiguió experiencia de segunda mano en el diseño de equipos de seguridad para la prensa de banco, además de ideas con las cuales cumplir con las exigencias de cliente definidas anteriormente.

De la investigación realizada sobre equipos de seguridad para la prensa de banco, se identificaron 2 aspectos diferenciadores: aquellos cuyo concepto se centra en complementar los equipos clásicos de la prensa de banco, y aquellos que los reemplazan. A continuación se presentarán brevemente los ejemplos más relevantes:

#### Equipos complementarios:

Se identificaron 3 proyectos que recurren a la potencia de actuadores externos para asistir al levantador en el manejo de la carga. El primero de ellos basado en la implementación de un mecanismo hidráulico, realizado por B.William [81] (figura 3-5). Asimismo otros 2 apoyados en la potencia de motores eléctricos, realizados por M.Slawinski [73] (figura 3-6) y S.William [82] (figura 3-7).

Por otro lado, se encontraron 2 equipos comerciales poco interferentes con el desarrollo de la prensa de banco que ofrecen un sistema de aseguramiento instantáneo frente caídas precipitadas de la carga. El primero de ellos basado en un sistema de abrazaderas de cuerda que se

---

<sup>5</sup>[www.halfbakery.com](http://www.halfbakery.com), [www.reddit.com](http://www.reddit.com)

encarga de frenar la barra, cuando de ella ha perdido el agarre [72] (figura 3-9). El segundo es un mecanismo que asegura la carga de manera similar al equipo anterior, pero simulando mediante barras y collarines la libertad omnidireccional de la barra [70] (figura 3-11).

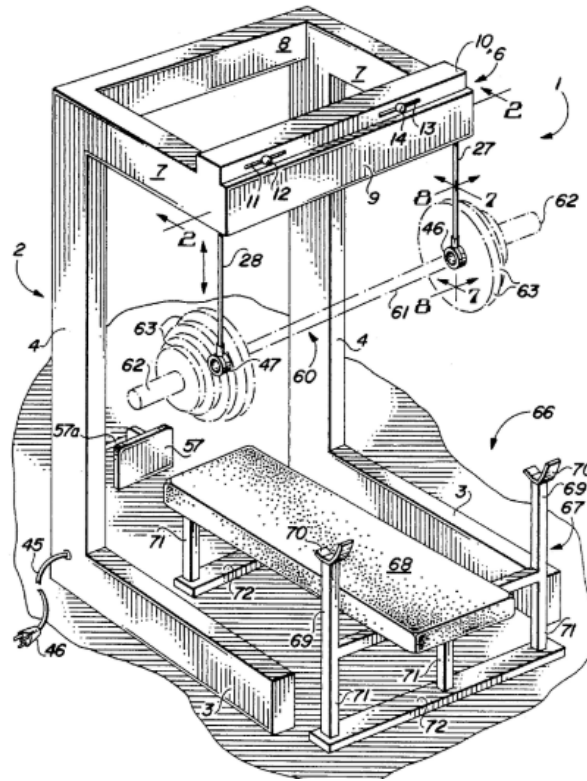
#### Equipos sustitutos:

Se encontraron diseños sustitutos de los modelos antiguos de prensa de banco que ofrecen ventajas puntuales para la seguridad del levantador. Uno de ellos observado sobre los modelos de banco ofrecidos por las empresas "Matrix" [51] y "Wilder Fitness" [80], el cual provee al usuario de un brazo rotatorio que le permite ubicar con facilidad la barra en una posición "no antinatural" antes de iniciar el ejercicio (figura 3-12). Por otro lado, de la empresa "Maxx-Bench" [52], se extrajo un diseño que asegura al levantador dejándolo caer suavemente a un nivel inferior del que lo hará la carga, última que reposará sobre soportes estáticos (figura 3-8).

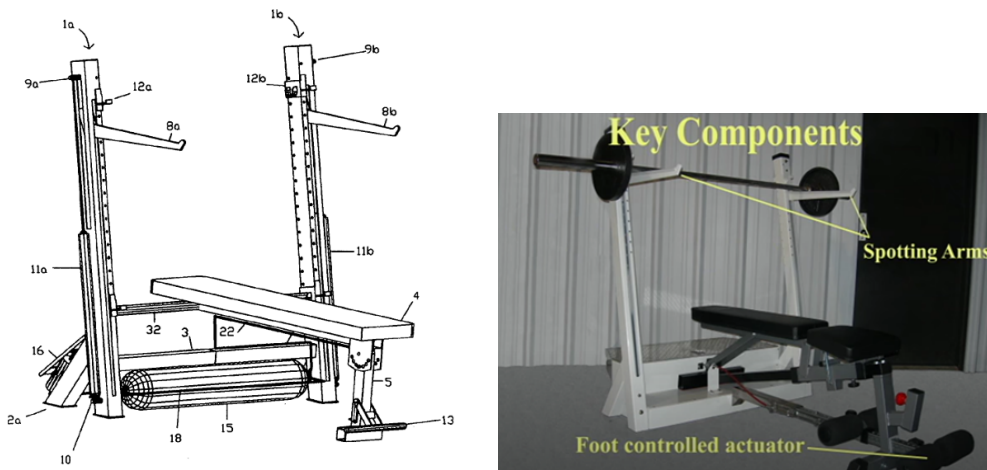
Se encontró asimismo una tendencia de diseño enfocada en reemplazar al observador, a causa de incluir medios para asistir el manejo de la carga cuando el levantador es incapaz de hacerlo por sí mismo. Se encontraron 3 modelos que implican sistemas neumáticos: los de W.Brawner [9] (figura 3-4) y 3-10 de una única activación, y el de J.Nash [58] (figura 3-2) de asistencia gradual. Así como también otros 3 que implican la fuerza de las extremidades inferiores para que el levantador se "autoasista" en el ejercicio: el de Z.Karl [40] (figura 3-13), el de B.Sang [69] (figura 3-14) y el de J.Ferris y J.Donovan [25] (figura 3-15).



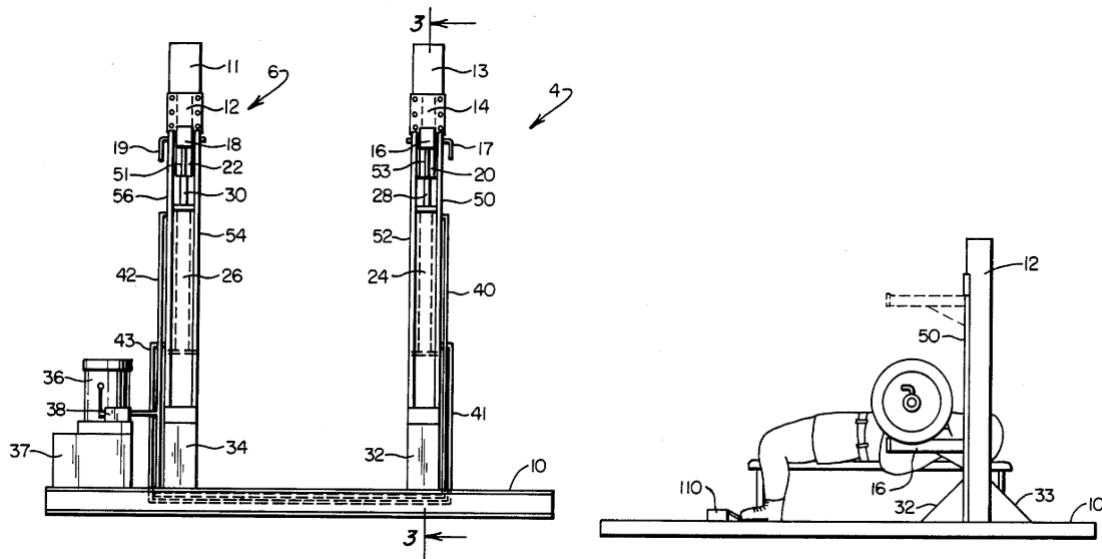
**Figura 3-2.:** Equipo comercial "Falcon" [58], poseedor de cables tensores que asisten mediante neumática el levantamiento de la carga según la indicación del usuario. Así como el aseguramiento de la carga al no detectarse agarre sobre esta. Imagen tomada de [58].



**Figura 3-3.:** Esquema del aparato para seguridad de la prensa de banco, diseñada por S.William [82]. Imagen tomada de [82].

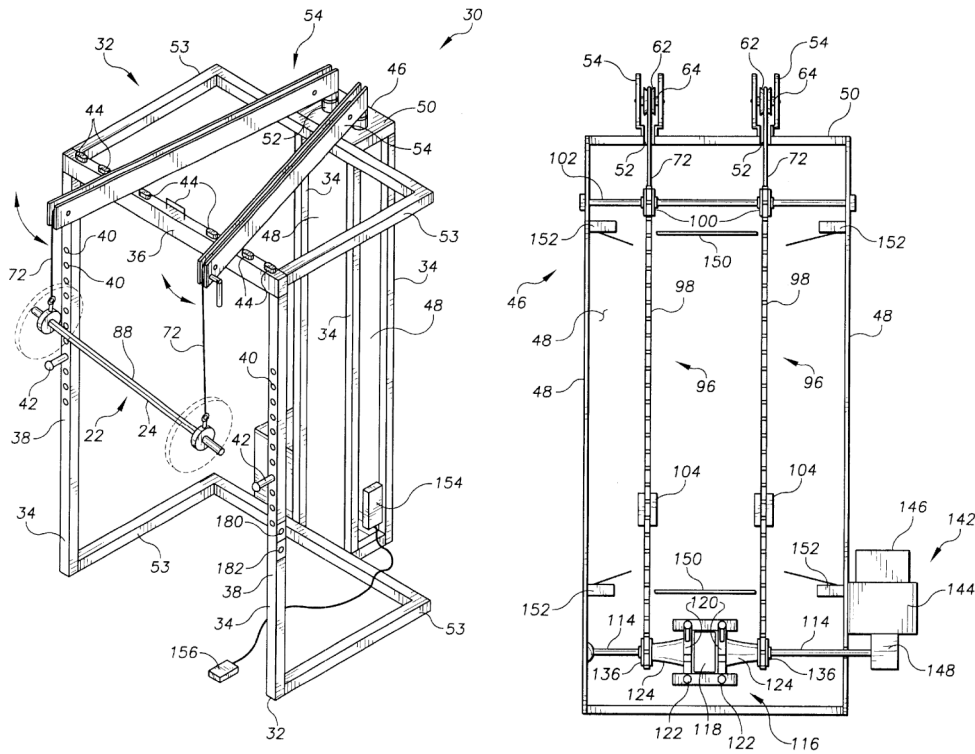


**Figura 3-4.:** Patente de W.Brawner [9] desarrollada más adelante en elemento comercial [8], cuyo diseño emplea un sistema hidráulico (acumulador '15', bomba '16', salida '18', cilindros actuadores '11a' y '11b') asociado a los soportes laterales ('8a' y '8b') que se elevan mediante aire comprimido con una fuerza ajustada previamente al levantamiento, y la cual es liberada con el impacto del pie sobre la palanca '13'. Imágenes tomadas de [9] y de [8].

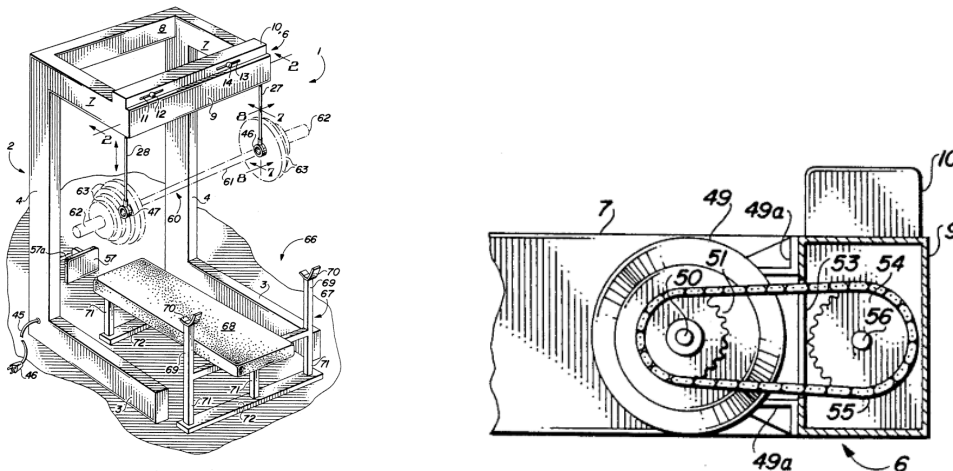


**Figura 3-5.:** Patente enfocada en suplir los altos requerimientos de fuerza durante el levantamiento de potencia (Powerlifting), cuyo diseño emplea un sistema hidráulico (bomba '36', reserva '37', válvula '337' y cilindros '26', '24') comunicante con los soportes laterales ('16' y '18'). Cuya subida es para ambos medida según la indicación del pedal '110' [81]. Imagen tomada de [81].

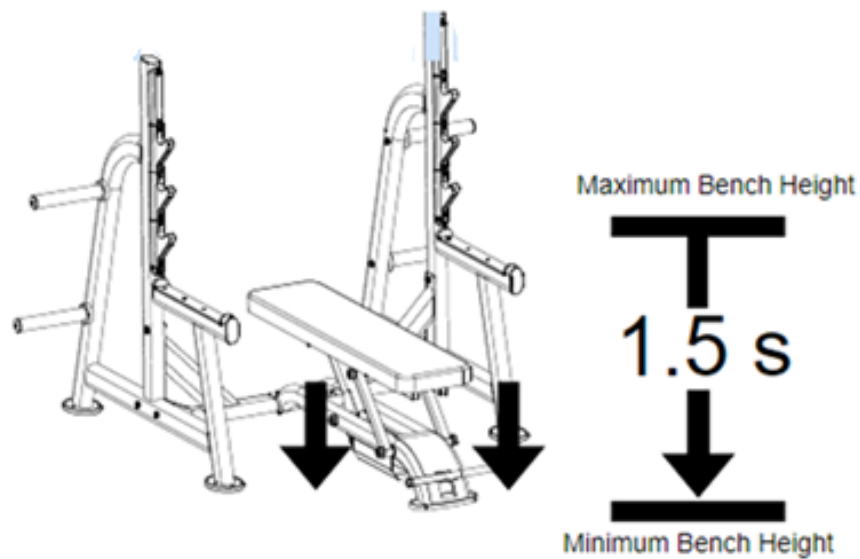




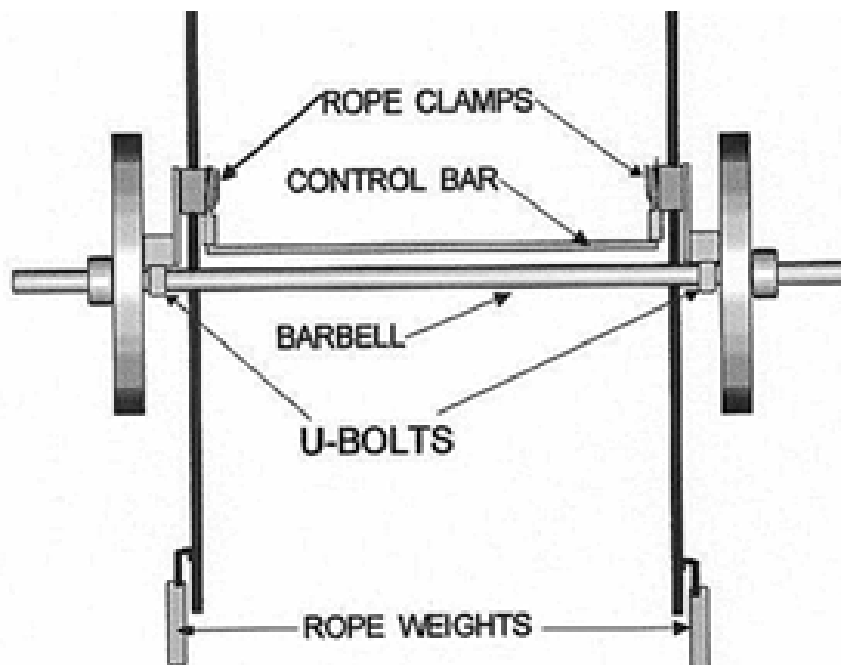
**Figura 3-6.:** Patente cuyo diseño emplea un motor eléctrico '144' para asistir al levantador en el manejo de la barra '24', mediante la tensión de las cuerdas '72'. Esto en la medida que el pedal '156' sea presionado [73]. Imagen tomada de [73].



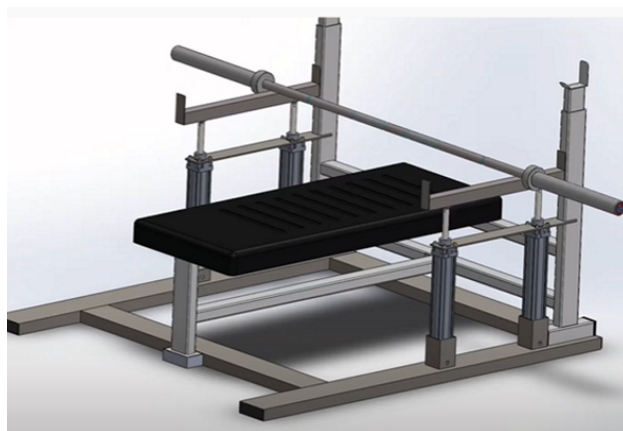
**Figura 3-7.:** Patente cuyo diseño emplea un motor eléctrico '49', ubicado detrás del brazo tipo yugo '9', encargado de levantar la barra '61' mediante el tensionamiento de las cuerdas ('28', '27'). Esto en la medida de la presión dada con los pies sobre la plataforma '57' [82]. Imagen tomada de [82].



**Figura 3-8.:** Equipo comercial para prensa de banco [52] de la marca "MaxxBench", cuyo concepto de protección se enfoca en dejar caer con cuidado el levantador, mientras la carga es frenada por un par de soportes estáticos. Lo anterior según la indicación de la persona mediante un pedal. Imagen tomada de [52].



**Figura 3-9.:** Complemento al equipo tradicional para la prensa de banco [72], que emplea un sistema de abrazaderas de cuerda (Rope clamps) encargadas de comunicar la barra (Barbell) con una guía de cuerdas, las cuales permiten el libre movimiento de la carga, sólomente mientras la barra de control (Control bar) se encuentre presionada. Imagen tomada de [72].



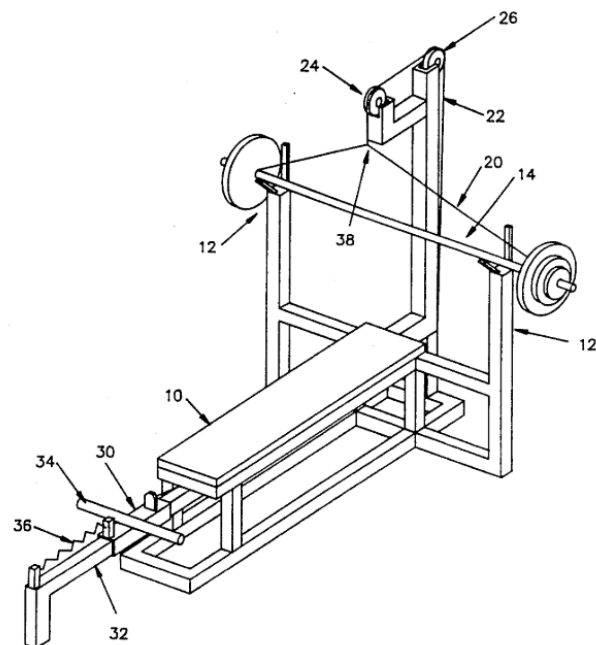
**Figura 3-10.:** Concepto que emplea barreras de seguridad laterales, soportadas en actuadores neumáticos para proteger y asistir con el levantamiento de la carga [19]



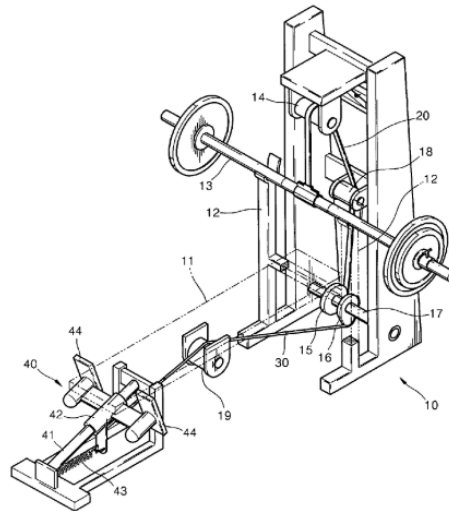
**Figura 3-11.:** Equipo comercial [70] que dispone de un ajuste automático para la barra cuando es soltada; además de la posibilidad de asistencia en su levantamiento mediante contrapesos. Por otro lado, es capaz de simular con barras deslizantes todos los grados de libertad presentes en el desarrollo de la prensa de banco en modalidad de peso libre. Imagen tomada de [70].



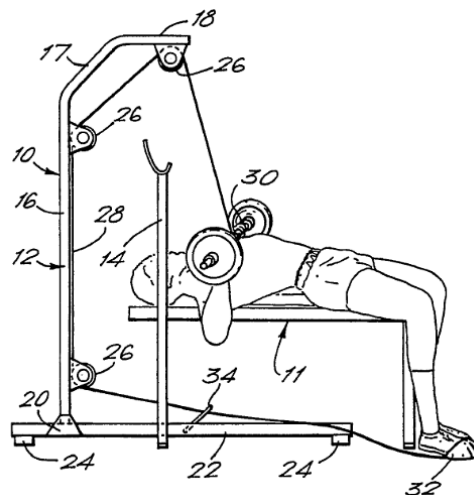
**Figura 3-12.:** Equipos para la prensa de banco, de las marcas "Matrix" [51] y "Wilder Fitness" [80]. Los cuales ofrecen un complemento que permite acomodar en una posición "no antinatural" la barra, antes de dar inicio al ejercicio. Imágenes tomadas de [51] y [80].



**Figura 3-13.:** Diseño de prensa de banco que posee una barra de empuje pedal '34' asociado a un sistema de poleas ('22', '24', '26'), a través de la cual, por medio de las extremidades inferiores, el levantamiento de la barra '14' puede ser "auto asistido" [40]. Imagen tomada de [40].



**Figura 3-14.:** Diseño de prensa de banco que posee una plataforma de empuje pedal '64' asociado a un sistema de poleas ('19', '30', '16', '18', '20', '14'), a través de la cual, por medio de las extremidades inferiores, el levantamiento de la barra '13' puede ser "auto asistido" [69]. Imagen tomada de [69].



**Figura 3-15.:** Diseño de equipo para prensa de banco, con un complemento que posee un acople al pie '32' asociado a un sistema de poleas ('26', '28'), a través de la cual, el levantamiento de la barra '30' puede ser "auto asistido" [25]. Imagen tomada de [25].

## Conceptualización

El objetivo de esta sección es proponer diversas alternativas que cumplan con el objetivo de diseño y las demandas de cliente. Dichas alternativas deben desarrollarse teniendo en cuenta las características de ingeniería más relevantes según la calificación obtenida en la Casa de la Calidad (tabla **3-1**); tarea que requiere de mucha creatividad para ser efectuada adecuadamente.

**Método morfológico de diseño** De las diferentes herramientas para la intensificación de la creatividad propuestos por G.Dieter y L.Schmidt [20] (i.e Brainstorming, Refinamiento, 6 key questions, Five Why's, checklist, Edward de Bono, entre otros), fue seleccionada la conocida como "Método Morfológico de Diseño" (Morphological Method for Design). Esta se caracteriza por potenciar la creatividad mediante la formulación de gran cantidad de ideas diferentes, en un proceso que evite el rechazo de algunas de ellas, por muy descabelladas o insensatas que parezcan.

El Método Morfológico de Diseño se basa en la elaboración de una tabla compuesta por "n" columnas y " $m_{(n)}$ " filas. Las columnas corresponden con los "n subproblemas" en los que el objetivo de diseño pueda ser descompuesto. Por otro lado, las " $m_{(n)}$ " filas de cada columna reflejan posibles soluciones para cada uno de los subproblemas. Ahora bien, terminada esta tabla, la forma en que todas las propuestas integrales serían formuladas, es mediante la combinación indiscriminada de cada "subsolución  $m_{(n)}$ " para cada subproblema.

Aterrizando el Método Morfológico de Diseño sobre el proyecto, se explicarán a continuación los "subproblemas" identificados. De igual forma, posteriormente se presenta la tabla **3-2**, correspondiente con el método de diseño desarrollado:

**NOTA:** Se debe aclarar la diferencia existente entre los "subproblemas" del Método morfológico de diseño y la lista de CR's presentada anteriormente, respecto a que: mientras los subproblemas son definidos por el diseñador según la forma en que él planea dividir el diseño del equipo, las CR's son proporcionadas por el cliente, en cuanto a sus intereses de desempeño por parte del producto.

- **Re-acomodación de carga:** Ubicar nuevamente la carga sobre los soportes del equipo para prensa de banco.
- **Acople con BP's<sup>6</sup>:** Diseño estructural ajustable a los modelos de equipo para prensa de banco ya existentes, los cuales suelen diferir en su geometría.

---

<sup>6</sup>BP's: Bench Press (Prensa de Banco)

- **Liberación barra contra cuerpo:** Liberar al levantador de la barra, cuando esta persona es incapaz de manejar la carga por si misma.
- **Acomodación pre-excéntrica:** Ubicar la barra en un punto de partida "no antinatural".
- **Ubicación anatómica adecuada:** Adoptar y mantener durante el ejercicio posturas "no antinaturales".
- **Accionamiento automático:** Activación automática de la barrera de seguridad cuando la carga represente una amenaza para la integridad del levantador.
- **Accionamiento manual:** El equipo debe disponer de un medio a través del cual, el levantador pueda activar conscientemente, una barrera de seguridad que lo proteja de la carga.
- **Mínima intervención con el ejercicio:** El diseño no debe interferir, en la medida posible, con el desarrollo normal del ejercicio ni con la trayectoria típica de la barra.

#	Re- acomodación de carga	Acople con BP's	Liberación barra con- tra cuerpo	Acomodación pre- concéntrico	Ubicación anatómica adecuada	Accionamiento automático	Accionamiento manual	Mínima interven- ción con el ejercicio
1	Elevación de soportes	Amarre con correas	Bajada de banco	Soporte rota- tivo	Camisa para Prensa de banco	Abrazaderas en barra	Palanca de pies (bajada)	Safety Stands
2	Motor con ca- ja reductora	Estructura tras barra	Elevación corta de la barra	Soporte con cuerdas	Bandas para prensa de banco	Abrazaderas en cuerda	Palanca de pies (subida)	Libertad om- nidireccional por barras
3	Auto soporte con las pier- nas	Estructura delante de barra			Limitadores de apertura de codos	Espera de tiem- po límite	Plataforma de empuje pedal	Soporte con cuerdas
4	Elevación neumática de safety stands	Safety Stands				Detección de patrones de fallo	Extensor de ro- dilla	
5	Auto-ayuda pedal	Abrazaderas en cuerda				Centrifugal Clutch	Interruptor en barra	
6	Elevación manual con poleas						Interruptor en cabeza o boca	
7	Método clási- co							

**Tabla 3-2.:** Método morfológico de diseño aplicado al presente caso de diseño mecánico. Tabla elaborada por el autor.



**Diseños realizados** En congruencia con el desarrollo creativo de soluciones, a continuación se presentarán las ideas más relevantes, formuladas a partir del método morfológico de diseño (tabla 3-2). Cabe aclarar que dichas ideas fueron recopiladas según la cantidad de "subproblemas" abordados, en el grupo de **conceptos individuales** (hasta dos subproblemas) o de **conceptos compuestos** (tres o más subproblemas).

#### CONCEPTOS INDIVIDUALES:

##### **Primer concepto: Soportes de seguridad con acople lateral (figura 3-16)**

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-16.

Este concepto se fundamenta en el producto comercial popularmente conocido como soportes de seguridad (safety stands). El cual consiste de una pareja de apoyos ubicados a ambos lados del levantador, con el fin de determinar el tope inferior del movimiento de la carga. Dicho tope es ajustado a la altura preferida por el usuario (distancia "B" en la figura 3-16), antes de que se inicie el ejercicio.

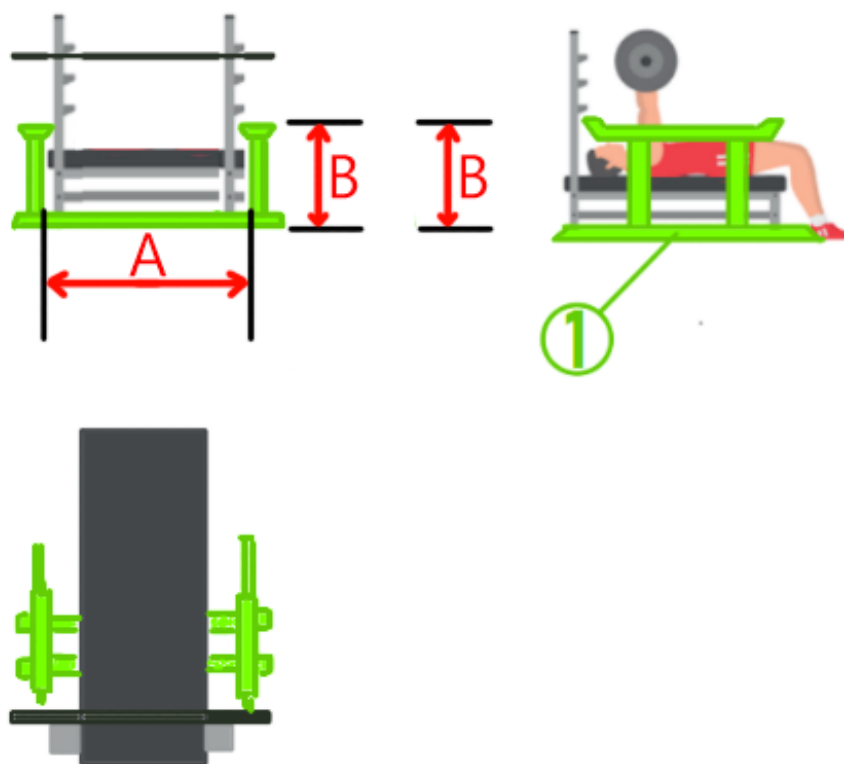
Este modelo se diferencia de los soportes de seguridad comerciales en ser constituido por un sólo cuerpo, cuyo ancho de separación entre apoyos (distancia "A" en la figura 3-16) puede ser modificada. Lo anterior buscando incrementar la estabilidad estructural de los modelos encontrados en el mercado.

#### **Soluciones brindadas**

- Re-acomodación de carga: No aporta.
- Acople con BP's: La forma estructural (1) fue pensada para ser compatible con todos los equipos para prensa de banco, debajo de los cuales se disponga del espacio suficiente para ubicar un mecanismo que provea la facultad de modificar la distancia entre topes de seguridad (A).
- Liberación barra contra cuerpo: No aporta
- Acomodación Pre-excéntrica: No aporta.
- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: No aporta.
- Accionamiento manual: No aporta.
- Mínima intervención con el ejercicio: La altura de los soportes (B) es ajustada personalmente por el levantador, de forma que le interfiera lo menos posible durante el ejercicio.

### Contras

- Incomodidad durante la transición entre las etapas de bajada (excéntrica) y subida (concéntrica) de la barra. Lo anterior por la posibilidad de presentarse choques entre la carga y los soportes de la estructura (1), causados por un equivocado ajuste de la altura de los soportes (B).
- PELIGRO: Posible atrapamiento de la carga entre el equipo para prensa de banco y la estructura diseñada (1). Cuestión que dificultaría alejar el peso levantado de la región del cuello y rostro del levantador. Lo anterior a causa del espacio libre entre las barras del equipo para prensa de banco y el soporte de seguridad (1).



**Figura 3-16.:** Boceto de los soportes de seguridad con acople lateral. 1: Estructura, A: Separación entre topes de seguridad, B: Altura de topes de seguridad. Imagen elaborada por el autor.

### Segundo concepto: Brazos de seguridad (figura 3-17)

Nota: Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-17.

Este concepto fue inspirado en el diseño de taburetes levadizos de altura ajustable. Los cuales, mediante una geometría similar a la presentada en la figura **3-17**, son capaces de ser asegurados por fricción a una viga vertical.

El diseño de los "brazos de seguridad" contempla la elevación vertical de un par de barras horizontales (esquema de la figura **3-17**), que se extienden por debajo y a los extremos izquierdo y derecho de la carga. Dicha elevación sería llevada a cabo mediante una fuerza que libere los mencionados brazos del acople que tienen con una viga estática.

Respecto del funcionamiento de este diseño, los brazos de soporte (1) deberían ser adaptados a una estructura externa al equipo para prensa de banco, que incluyan las vigas verticales (3) sobre las cuales se asegurarían dichos brazos. Respecto del aseguramiento de los brazos de soporte (1), este se origina cuando predomina el impacto del peso de la carga "W" sobre el contacto con las vigas de la estructura (3). Situación en la que se origina el torque (B), causante de la fuerza normal "Fn(B)" que a su vez provoca la fuerza de rozamiento "Fr(Fn(B))" sobre las uniones fijas (4). Restringiendo el desplazamiento de los mencionados brazos de soporte.

Por otro lado, cuando la fuerza "Fe" (2) predomina sobre el contacto con la estructura (3) se genera el torque (A). Último que, en caso de ser mayor en magnitud que el momento (B), liberaría los brazos (1) del aseguramiento por fricción. Lo anterior gracias a que el torque (A), causante de la fuerza normal "Fn(A)" **no** provoca ninguna fuerza de rozamiento, ya que los apoyos sobre las uniones en que se da el contacto poseen rodamientos (5).

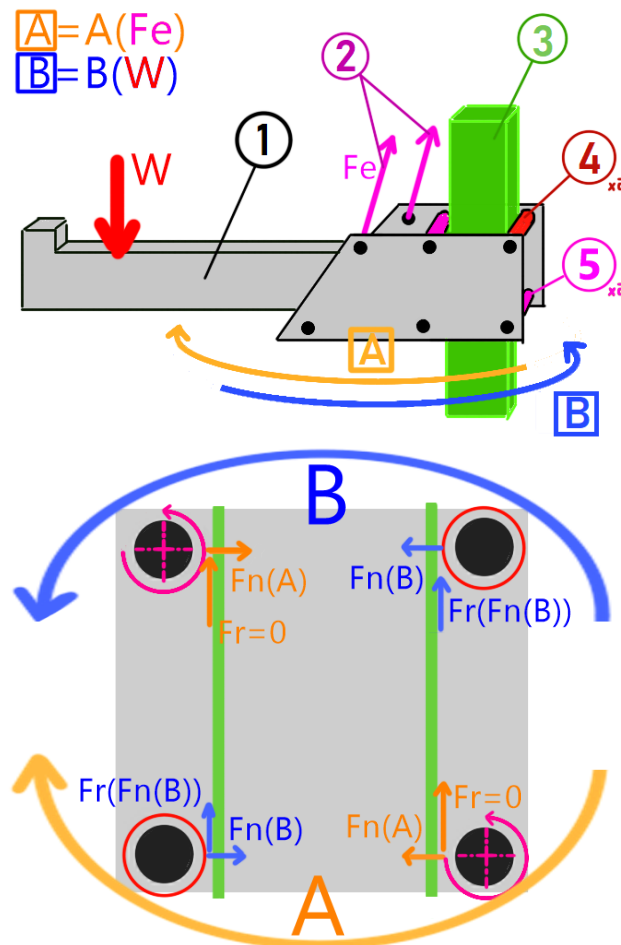
### Soluciones brindadas

- Re-acomodación de carga: Los brazos de soporte (1) facilitarían la reacomodación del peso de la carga "W" sobre los soportes propios de los equipos clásicos para prensa de banco. Lo anterior mediante una fuerza proveniente de un suministro externo al usuario "Fe" (2).
- Acople con BP's: No aporta.
- Liberación barra contra cuerpo: El sistema de elevación de los brazos de soporte ayudarían a liberar al levantador de una carga sobre la que ya no tiene capacidad de levantar.
- Acomodación Pre-excéntrica: No aporta.
- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: No aporta.

- Accionamiento manual: No aporta.
- Mínima intervención con el ejercicio: No aporta.

### Contras

- El grado de interferencia del equipo está sujeto al error en la estimación del usuario sobre la altura inicial de los brazos de soporte.
- Fragilidad de la estructura ante fuerzas elevadas o impactos. Esto debido principalmente por los concentradores de esfuerzo en las uniones (piezas "4" y "5").



**Figura 3-17.:** Boceto conceptual de los "brazos de seguridad". 1: Brazos de soporte, 2: Fuerza externa, 3: Vigas estructurales, 4: Uniones rígidas, 5: Uniones con rodamiento. Imagen elaborada por el autor.

Tercer concepto: Soportes limitantes de amplitud de movimiento articular (figura 3-18)

**Nota: Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-18.**

Este concepto fue considerado cómo corrección de la tendencia que tiene levantador, de ubicar de forma "antinatural" el manguito rotador<sup>7</sup>. Para lo cual el estudio de J.Lander et al [48] recomienda mantener un ángulo que no supere los 45 grados entre el brazo y el tórax durante el levantamiento de la carga (2).

El "soporte limitante de ROM" busca evitar que el levantador abra los brazos más de 45 grados respecto del tórax; valor que de ser sobrepasado implicaría una posición "antinatural" dañina para sus hombros. Con el fin de llevar a cabo esta tarea, se consideraron cojines adaptables (1) a las dimensiones antropométricas del levantador, que limiten dicha apertura sobre sus extremidades superiores.

### Soluciones brindadas

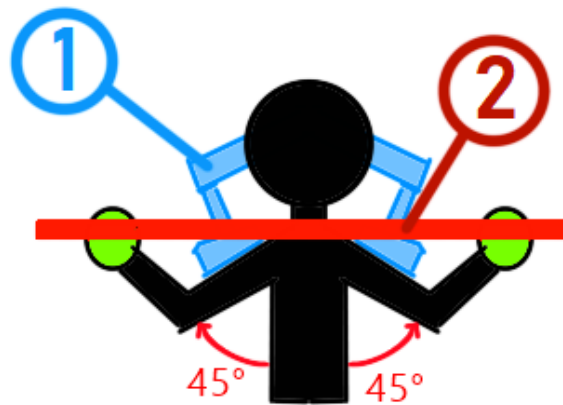
- Re-acomodación de carga: No aporta.
- Acople con BP's: No aporta.
- Liberación barra contra cuerpo: No aporta.
- Acomodación Pre-excéntrica: La amplitud de los brazos es obligada a ser adoptada correctamente antes de iniciar con el ejercicio.
- Ubicación anatómica adecuada: Los limitadores de ROM (1) obligarían al levantador a mantener una postura sana durante la ejecución de la prensa de banco.
- Accionamiento automático: No aporta.
- Accionamiento manual: No aporta.
- Mínima intervención con el ejercicio: No aporta.

### Contras

- PELIGRO: La limitación del movimiento de los brazos afectaría la habilidad del levantador para estabilizar la carga; implicándole a esta persona el riesgo de no poder controlar el peso durante la ejecución del ejercicio.

---

<sup>7</sup>conjunto de músculos, tendones y huesos que componen el hombro



**Figura 3-18.:** Boceto conceptual de los "soportes limitantes de ROM". 1: Cojines limitantes de ROM, 2: Barra para pesas. Imagen elaborada por el autor.

#### **Cuarto concepto: Estructura externa (figura 3-19)**

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-19.

Esta idea surgió al descubrir la compatibilidad de muchos de los soportes para bolsa de boxeo con los equipos para prensa de banco. Lo anterior en cuanto a la concordancia entre el punto desde el que el mencionado soporte mantiene elevada la bolsa, que compagina con la posición desde la cual el observador asiste al levantador en la elevación de la barra (2). Esto sin que se superpongan los apoyos que ambas estructuras tienen con el suelo.

La estructura externa (1) aporta al proyecto una base estructural, sobre la cual se podrían acomodar los componentes faltantes para afrontar los subproblemas faltantes. Cabe aclarar la función del elemento de ajuste (3), el cual se acopla a la altura de la cara inferior del banco, con la intención de aportar estabilidad a la estructura diseñada.

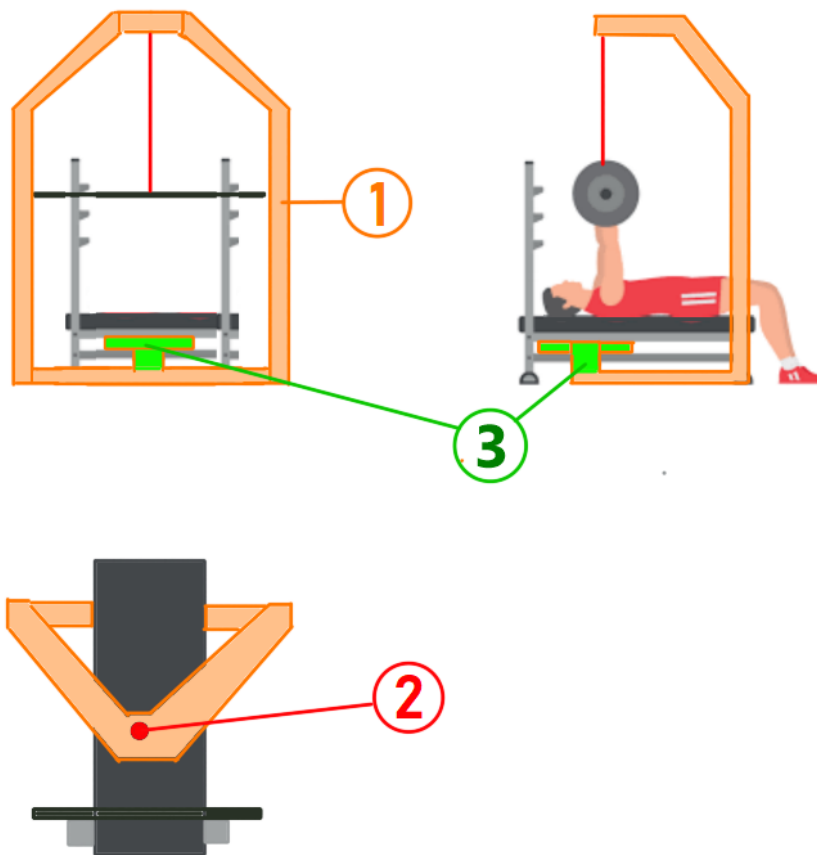
#### **Soluciones brindadas**

- Re-acomodación de carga: No aporta.
- Acople con BP's: La forma y dimensiones de la estructura externa (1) son definidas teniendo en cuenta varios modelos de equipo para prensa de banco. Lo anterior a fin de asegurar que dicha estructura sea compatible con casi cualquier aparato para entrenamiento con la prensa de banco. Por otro lado, el elemento de ajuste (3) es graduable a la altura que se requiera.
- Liberación barra contra cuerpo: No aporta.
- Acomodación Pre-excéntrica: No aporta.

- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: No aporta.
- Accionamiento manual: No aporta.
- Mínima intervención con el ejercicio: La forma de la estructura externa (1) no representa ningún obstáculo para el desarrollo natural del ejercicio ni para el equipo de prensa de banco.

### Contras

- El elemento de ajuste (3) podría afectar la estabilidad del equipo para prensa de banco.
- Este modelo estructural (1) debería ser mejorado para asegurar la compatibilidad con otros modelos de equipo para prensa de banco.



**Figura 3-19.:** Boceto conceptual de la "estructura externa". 1: Estructura, 2: Punto de soporte de la carga, 3: Ajuste con el equipo para prensa de banco. Imagen elaborada por el autor.

### CONCEPTOS COMPUESTOS:

#### Primer concepto compuesto: figura 3-20

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-20.

El diseño mecánico presentado en la figura 3-20 fue el primer acercamiento a un sistema que pudiera satisfacer todos los subproblemas considerados en el método de diseño morfológico (figura 3-2). La intención de este concepto fue enfocada en proveer al observador de una ayuda en el levantamiento de la carga (2) mediante poleas estimuladas por un actuador eléctrico, cuya activación fuera automática u ordenada por el levantador.

El levantamiento de la carga (2) es asistido mediante un sistema de acople elástico (5) entre el actuador y el sistema de poleas (4). Lo anterior a fin de no sustituir toda fuerza ejercida en conjunto por el observador y el levantador, sino apoyarles en una parte de esta para facilitarles el manejo de la carga. Cabe agregar que, cómo actuador fue seleccionado un motor eléctrico (8) asociado, mediante un acople rígido (7), a una reducción de transmisión basado en tornillo de potencia (6).

Respecto de la activación del sistema, 2 alternativas fueron consideradas. Una de ellas automática, en la cual el equipo mismo determina el momento propicio de iniciar la asistencia, según la detección de irregularidades en el levantamiento de la carga gracias a un sistema sensorial (3). Por otro lado, la activación alternativa aplica cuando el levantador lo indique mediante alguno de los interruptores dispuestos sobre la barra (1).

#### Soluciones brindadas

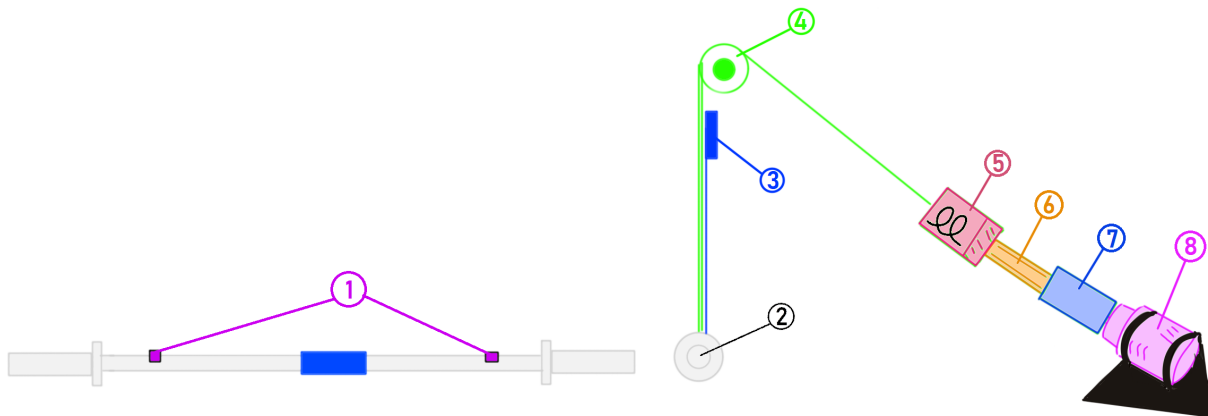
- Re-acomodación de carga: El sistema de asistencia facilitaría el acercamiento de la carga hacia los soportes del equipo para prensa de banco.
- Acople con BP's: No aporta.
- Liberación barra contra cuerpo: El sistema de asistencia facilitaría la liberación del levantador cuando este se encuentre atrapado por la barra.
- Acomodación Pre-excéntrica: No incluido; sin embargo, un freno mecánico sobre el sistema de transmisión, o eléctrico sobre el motor (8), puede adaptarse para acomodar la carga en una posición segura, previo al inicio del ejercicio.
- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: Detección de patrones de fallo o espera de tiempo límite para la finalización de una repetición, por medio de un sistema electrónico (3).



- Accionamiento manual: El accionamiento de cualquiera de los interruptores (1) ubicados sobre la carga (2) supliría este subproblema.
- Mínima intervención con el ejercicio: Los elementos constituyentes son ajenos tanto a la estructura del equipo para prensa de banco cómo al desarrollo normal del ejercicio.

### Contras

- Contaminación auditiva del motor eléctrico (8).
- La reducción de transmisión por tornillo de potencia (6) en conjunto con el acople flexible (5), no ofrecen un apoyo inmediato sobre el levantamiento de la carga.
- Elevado costo del sistema de potencia y control del actuador (8).
- PELIGRO: Posibilidad de que al levantador se le resbale la barra al intentar accionar los interruptores (1).
- PELIGRO: Riesgo de que el sistema deje caer la carga sobre el levantador. Esto debido al que los acoples rígidos, cómo el considerado a implementar entre el tornillo de potencia (6) y el rotor del motor (8), **no** están diseñados para sujetar de forma axial los componentes.



**Figura 3-20.:** Boceto conceptual de la primera idea compuesta desarrollada. 1: Interruptores, 2: Carga, 3: Sensores, 4: Polea, 5: Acople flexible, 6: Tornillo de potencia, 7: Acople rígido, 8: Motor eléctrico. Imagen elaborada por el autor.

### Segundo concepto compuesto: figura 3-21

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-21.

Este concepto considera la estabilidad del equipamiento tradicional para la prensa de banco. Lo hace apoyando la estructura (3) sobre los soportes traseros del mencionado equipamiento mediante correas (3.A), con el fin de ahorrar la implementación de materiales adicionales en el fortalecimiento y estabilización de dicho armazón (3). Es sobre este último elemento en el que se ubicarían los elementos faltantes para complementar la asistencia en el levantamiento de la carga.

La asistencia al levantamiento de la carga se hace posible mediante un motor eléctrico (4), cuya potencia es comunicada a la carga mediante la cuerda tensora (5), en la dirección definida por los anillos directores (3.B). Dicha asistencia es iniciada por decisión del levantador, quien activa el actuador (4) mediante un pedal (1) (elevación de la plataforma móvil (1.B), respecto de la estática (1.A)).

A propósito de las facilidades que este sistema brinda para adaptarse al contexto de la prensa de banco, la estructura (3) gozaría de uniones flexibles para ser ajustada a diferentes distancias entre soportes verticales. Por otro lado, el pedal de accionamiento a la asistencia (1) sería amarrado a la medida del pie con la correa (1.C) y ubicado en la posición preferida por el usuario, mediante un mecanismo telescópico (2) (extensión del elemento móvil (2.B) respecto del estático (2.A)).

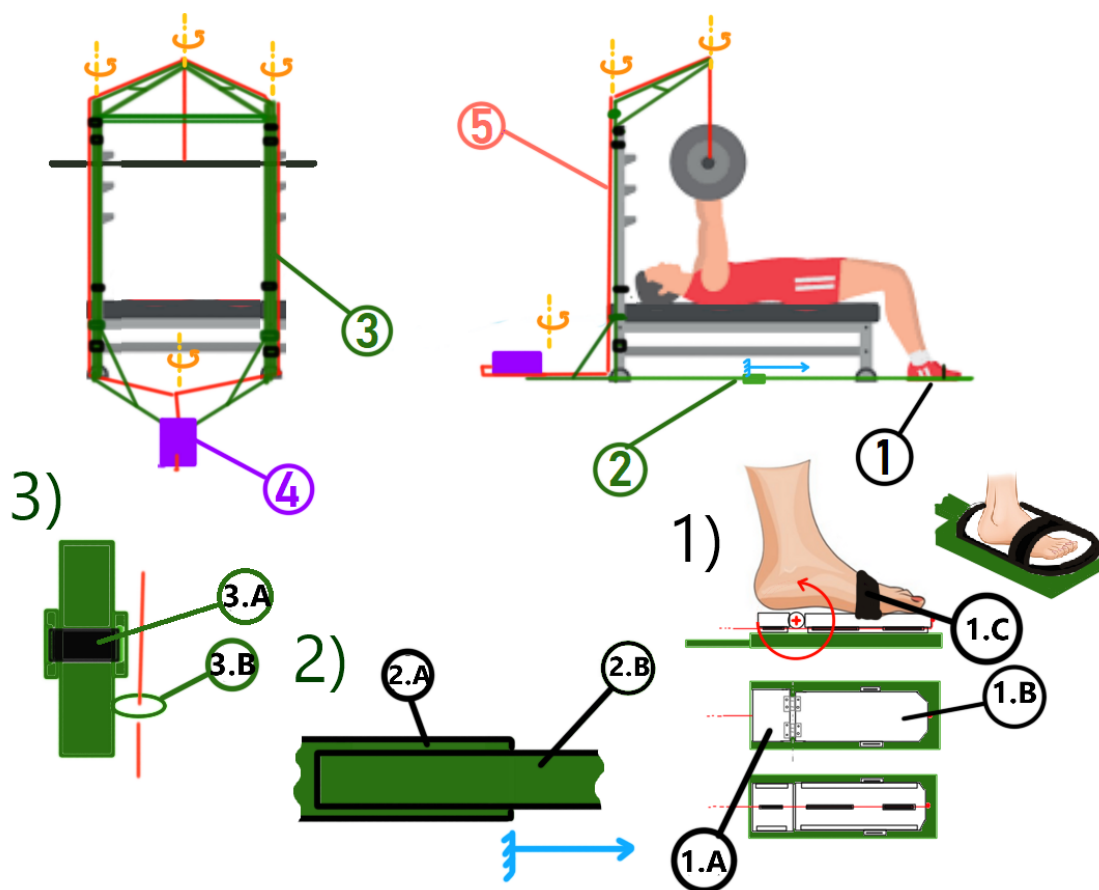
### Soluciones brindadas

- Re-acomodación de carga: Se facilitaría la colocación de la barra sobre los soportes del equipo para prensa de banco mediante la activación del sistema de asistencia en el levantamiento de la carga
- Acople con BP's: Este sistema dispone de diversas características que lo harían adaptable al contexto de ejecución de la prensa de banco.
- Liberación barra contra cuerpo: Se facilitaría la liberación de peso sobre el levantador, mediante la activación del sistema de asistencia en el levantamiento de la carga.
- Acomodación Pre-excéntrica: La configuración del brazo superior de la estructura (3), permite acomodar la carga en una posición adecuada para el inicio del ejercicio
- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: No aporta.
- Accionamiento manual: El accionamiento del motor eléctrico (4) mediante el pedal (1), le garantizaría al levantador y su observador, la inmediata activación del sistema de asistencia. Esto sin interferir con el desarrollo normal del ejercicio.

- Mínima intervención con el ejercicio: No hay presencia de elementos obstaculizantes con el desplazamiento normal de la barra o la estructura del equipo para prensa de banco.

## Contras

- Contaminación auditiva del motor eléctrico (4).
- Debilidad y desgastamiento de las uniones rotacionales en la estructura (3).
- Elevado costo del sistema de potencia y control del actuador (4).
- Dificultad para ubicar el pie sobre el accionamiento "manual" en caso de no haber sido, previo al ejercicio, posicionado apropiadamente.
- Estructura no apta para todos los modelos de equipo para prensa de banco (supone brazos de soporte de la carga **estrictamente rectos y verticales**). Cabe señalar la condición de muchos modelos que incluyen soportes para discos e incluso una plataforma dónde se ubicaría el observador, justo en el lugar dónde parte de la estructura (3) y el motor (4) deberían ser ubicados.



**Figura 3-21.:** Boceto conceptual de la segunda idea compuesta desarrollada. 1: Pedal inverso (1.A: Plataforma estática, 1.B: Plataforma móvil, 1.C: Correa), 2: Mecanismo telescópico (2.A: Segmento estático, 2.B: Segmento móvil), 3: Estructura (3.A: Correas de ajuste, 3.B: Anillos directores), 4: Motor eléctrico, 5: Cuerda. Imagen elaborada por el autor.

### Tercer concepto compuesto: figura 3-22

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-22.

Esta idea fue desarrollada pensando en agregar la posibilidad de asistencia al concepto de la figura 3-16. Motivo por el cual un sistema hidráulico fue considerado para dicho fin.

De manera similar al diseño de los "soportes de seguridad con acople lateral" (figura 3-16), se considera también en este concepto la compatibilidad con el entorno de desarrollo de la prensa de banco. Es por esto que se mantiene la posibilidad de adecuar la distancia de separación entre los soportes (1) mediante la viga de largo ajustable (6). También se ofrece la opción de modificar la altura inicial de dichos soportes (1) a través del sistema de pasadores (1.A, 1.B, 1.C). Por otro lado, se ofrece al levantador la opción de acomodar el pedal (5)

en la posición que prefiera, a través del mecanismo telescópico con pasador (4) (elemento móvil (4.c) que se extiende desde el componente estático (4.B), y se asegura mediante el pasador (4.A))

Este diseño le ofrece al usuario la opción de elevar los soportes (1) a través del sistema hidráulico (2), el cual es estimulado por el levantador. La forma en que dicha estimulación se lleva a cabo es mediante el repetitivo uso del pedal (5) para transmitirle potencia al pistón de entrada (2.B). Dicho par de elementos son asociados a través de la palanca (2.A) y la polea (3).

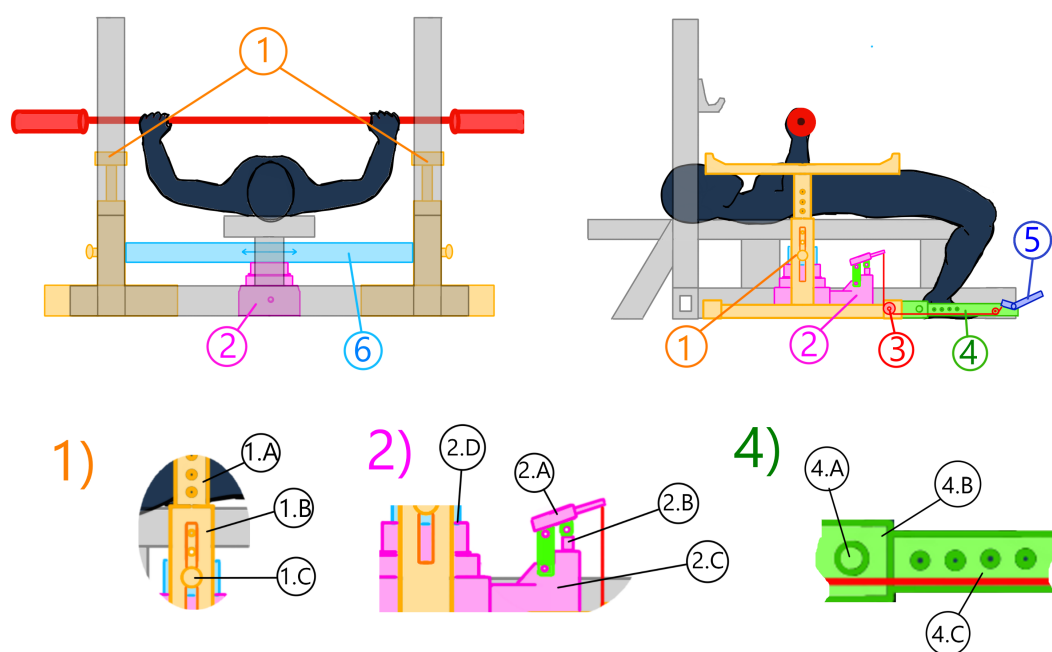
### Soluciones brindadas

- Re-acomodación de carga: Mediante la activación del servicio de asistencia, se facilitaría la colocación de la barra sobre los soportes del equipo para prensa de banco.
- Acople con BP's: El diseño presentado no debería interferir con el desarrollo normal del ejercicio ni con el equipo para la prensa de banco.
- Liberación barra contra cuerpo: La activación del sistema para asistencia es indicada por el levantador, cuando este considere necesario que se le apoye en la liberación de la carga.
- Acomodación Pre-excéntrica: No aporta.
- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: No aporta.
- Accionamiento manual: La palanca (5) fue dispuesta para que con facilidad el levantador pudiera indicar el accionamiento de la asistencia, sin perjudicar su desempeño durante el ejercicio.
- Mínima intervención con el ejercicio: No hay presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento normal de la barra o el cuerpo del usuario durante el desarrollo del ejercicio.

### Contras

- Incomodidad durante la transición entre las etapas de bajada (excéntrica) y subida (concéntrica) de la barra. Lo anterior por la posibilidad de presentarse choques entre la carga y los soportes de la estructura (1), causados por un equivocado ajuste de la altura de los soportes (1.A, 1.B, 1.C).
- Costos de mantenimiento y reemplazo del sistema hidráulico (2).

- El grado de interferencia del sistema con el ejercicio está sujeto al error en la estimación del usuario sobre la altura inicial de los soportes (1.A, 1.B, 1.C).
- PELIGRO: Posible atrapamiento de la carga entre el equipo para prensa de banco y la estructura de los soportes (1). Cuestión que dificultaría alejar el peso levantado de la región del cuello y rostro del levantador. Lo anterior a causa del espacio libre entre las barras del equipo para prensa de banco y los mencionados soportes.



**Figura 3-22.:** Boceto conceptual de la tercera idea compuesta desarrollada. 1: Soportes de seguridad (1.A: Parte móvil, 1.B: Parte estática, 1.C: Pasador), 2: Actuador hidráulico (2.A: Palanca, 2.B: Pistón de entrada, 2.C: Cuerpo, 2.D: Pistón de salida), 3: Polea, 4: Mecanismo telescópico (4.A: Pasador, 4.B: Segmento estático, 4.C: Segmento móvil), 5: Pedal. Imagen elaborada por el autor.

#### Cuarto concepto compuesto: figura 3-23

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-23.

En el concepto de la figura **3-23** se considera una estructura de ancho variable (7), ubicada frente a los soportes de carga propios de los equipos tradicionales para prensa de banco. Es sobre dicha estructura que los elementos faltantes para abordar los subproblemas faltantes son dispuestos.

Este diseño ofrece al usuario una asistencia en el levantamiento de la carga; servicio que precisa de 2 condiciones: Primero un aferramiento de la carga, y segundo un accionamiento del actuador encargado de ofrecer dicha asistencia. A continuación se explicará en qué consiste cada una.

La condición de aferramiento implica que el sistema diseñado tenga una firme sujeción del peso implicado en el ejercicio. Para lo cual se consideró la unión de un barrote estático (5) con la carga, mediante un conjunto de carrete retráctil y correa (4), propio de los cinturones de seguridad. Lo anterior buscando que, en caso de resbalársele al usuario la carga, el embrague inercial del mencionado conjunto frenara el desplazamiento de la barra, impidiendo que esta impacte al levantador.

Por otro lado, la condición de accionamiento del actuador implica que el usuario presione el interruptor (8). Este accionamiento daría inicio al levantamiento del barrote (5), previamente estático y al que estaría ligada la carga. Dicho levantamiento se logra mediante el actuador (2), el cual tensiona, a través del eje (3), la cuerda (7) desde la que cuelga el barrote (5).

### Soluciones brindadas

- Re-acomodación de carga: Mediante la activación del servicio de asistencia, se facilitaría la colocación de la barra sobre los soportes del equipo para prensa de banco.
- Acople con BP's: El diseño presentado no debería interferir con el desarrollo normal del ejercicio ni con el equipo para la prensa de banco.
- Liberación barra contra cuerpo: La activación del servicio de asistencia le permitiría al levantador, ser liberado por la carga que lo pueda estar afectando.
- Acomodación Pre-excéntrica: El usuario puede valerse del aseguramiento entre la carga y el barrote (5), para acomodar en una posición "no antinatural" la barra, antes de dar inicio al ejercicio.
- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: El aseguramiento automático de la carga se presenta únicamente cuando se ha perdido el agarre de la barra, implicando la caída libre de esta y por lo tanto la aceleración suficiente para inducir el frenado mediante el embrague inercial del cinturón de seguridad (4).
- Accionamiento manual: El interruptor para accionamiento manual (8) gozaría de la libertad para ser ubicado libremente en el suelo, con el fin de que sea fácilmente presionado tanto por el levantador cómo por el observador. Cabe resaltar la condición de activar el servicio de asistencia **únicamente** cuando los embragues inerciales (de

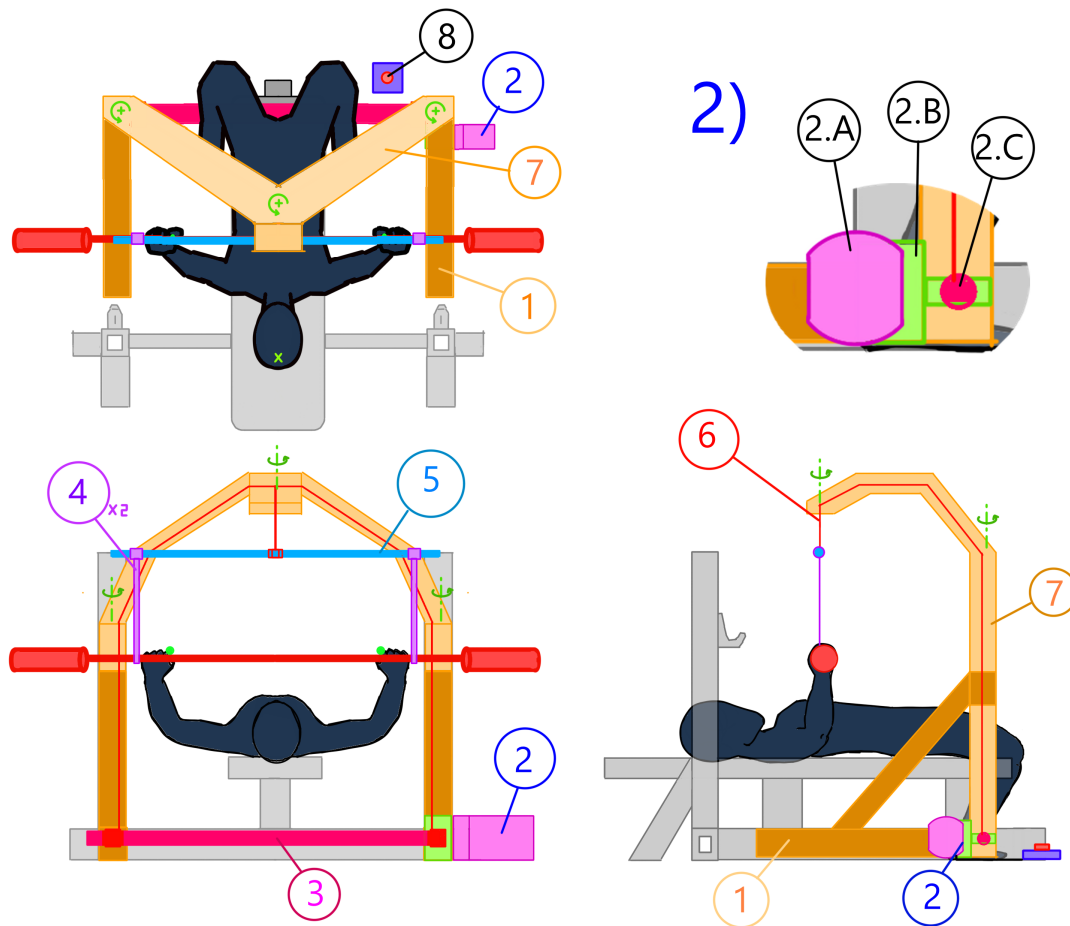
4) ya hayan aferrado la carga al barrote (5). Esto para que la elevación del mencionado barrote (5) pueda ser transmitida hacia el peso del que se espera apoyo en el levantamiento.

- Mínima intervención con el ejercicio: No hay presencia de elementos obstaculizantes con el desplazamiento normal de la barra o el cuerpo del usuario durante el desarrollo del ejercicio.

### Contras

- Si el accionamiento del actuador (2) no es detenido a tiempo, eventualmente el barrote (5) impactará con la estructura (7).
- La asistencia en el levantamiento de la carga no será posible si el barrote (5) ya se encuentra en el tope máximo de subida.
- Contaminación auditiva por parte del actuador (2).
- Los resortes de tracción en el carrete del embrague inercial (4) pueden tirar un poco de la barra.
- PELIGRO: El servicio de asistencia es inútil si se acciona el actuador (2) mientras el embrague inercial (de 4) aún no haya asegurado la carga. Esto debido a que, sin el mencionado aseguramiento, el sistema terminaría por elevar el barrote (5) sin tener vinculada la carga.
- PELIGRO: Con facilidad, el aseguramiento por embrague inercial (de 4) puede ser liberado accidentalmente.
- PELIGRO: La fuerza requerida durante el servicio de asistencia debe ser asumida exclusivamente por el actuador (2). Esto debido a que el aseguramiento por embrague inercial (de 4) puede ser liberado si se empuja la carga mientras está asegurada.





**Figura 3-23.:** Boceto conceptual de la cuarta idea compuesta desarrollada. 1: Pie de la estructura, 2: Actuador (2.A: Motor eléctrico, 2.B: Caja reductora, 2.C: Acople con eje), 3: Eje, 4: Conjunto de carrete y correa, 5: Barrote, 6: Cuerda, 7: Estructura, 8: Interruptor. Imagen elaborada por el autor.

#### Quinto concepto compuesto: figura 3-24

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-24.

Se concibió un esquema caracterizado por una estructura de cuatro apoyos (3), con un sistema que le permitiría al usuario liberarse de la carga con gran facilidad y sin la necesidad de suministro energético. Estas características fueron motivadas en reducir los momentos flectores en el armazón que soportaría la carga, así como en evitar el gasto que implica la implementación de un actuador de cualquier tipo.

El diseño estructural (3) considerado para este caso consiste de una plataforma soportada en 4 apoyos, sobre los cuales se distribuiría equitativamente la carga. Esta estructura goza además, de tener dichos apoyos unidos a la plataforma de manera articulada (ejes de rotación en

color rojo), lo que le permitiría ajustarse a la media de diversos equipos para prensa de banco.

Este diseño ofrece al usuario una asistencia en el levantamiento de la carga; servicio que precisa de 2 condiciones: Primero un aferramiento de la carga, y segundo un repetitivo accionamiento del mecanismo para asistencia (1) por parte del levantador. A continuación se explicará en qué consiste cada una.

La condición de aferramiento implica que el sistema diseñado tenga una firme sujeción del peso implicado en el ejercicio con un barrote estático (2), del que cuelgan las cuerdas (5) que guiarán de manera flexible el trayecto de la carga. Para la tarea de sujeción se consideró un sistema de abrazaderas (4) sujetas a la barra mediante un acople (4.C), el cual aferra dicha barra a un par de cuerdas guía (5) en el momento en que de dicho elemento se haya perdido el agarre (detectado cuando la varilla de accionamiento (4.A) y la barra del ejercicio son soltadas).

Respecto del mecanismo para liberar la carga del usuario, la fuerza necesaria para dicha tarea proviene del levantador, quien mediante el repetitivo presionamiento del mecanismo para asistencia (1), y con la ayuda del trinquete antiretorno (6), logra tensionar la cuerda (6). Dicha cuerda sería dispuesta con poleas de forma que se obtenga una ventaja mecánica de 4 a 1.

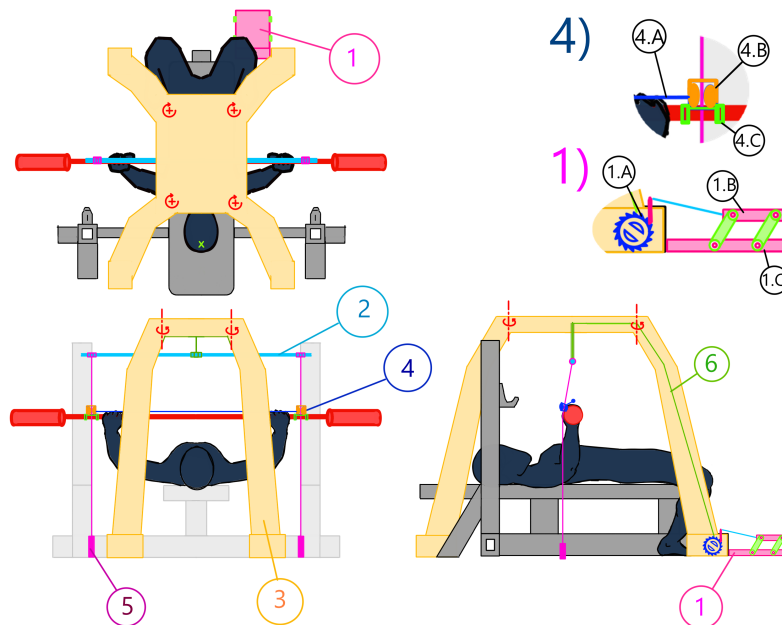
### Soluciones brindadas

- Re-acomodación de carga: Mediante la activación del servicio de asistencia, se facilitaría la colocación de la barra sobre los soportes del equipo para prensa de banco.
- Acople con BP's: El diseño presentado no debería interferir con el desarrollo normal del ejercicio ni con el equipo para la prensa de banco.
- Liberación barra contra cuerpo: La activación del servicio de asistencia le permitiría al levantador, ser liberado por la carga que lo pueda estar afectando.
- Acomodación Pre-excéntrica: El usuario puede valerse del aseguramiento entre la carga y el barrote (2), para acomodar en una posición "no antinatural" la barra, antes de dar inicio al ejercicio.
- Ubicación anatómica adecuada: No aporta.
- Accionamiento automático: El modelo de aseguramiento de la carga mediante abrazadera de cuerda (4) se presenta únicamente cuando el levantador ha perdido el agarre de la barra en conjunto con la varilla de accionamiento (4.A).
- Accionamiento manual: El usuario puede hacer uso de las abrazaderas de cuerda (4) para detener la barra conscientemente; para lo cual le basta únicamente con soltar intencionalmente la varilla de accionamiento (4.A).

- Mínima intervención con el ejercicio: No hay presencia de elementos obstaculizantes con el desplazamiento normal de la barra o el cuerpo del usuario durante el desarrollo del ejercicio.

### Contras

- El costo de la estructura de soporte y sus articulaciones puede resultar sumamente elevado.
- Aspecto poco estético de la estructura de soporte.
- La metodología seleccionada para orientar la trayectoria de la barra implica una pequeña interferencia en el desarrollo del ejercicio. Esto considerando el contacto constante entre la carga y las cuerdas guía (5), últimas que deben mantenerse tensionadas mediante contrapesos.



**Figura 3-24.:** Boceto conceptual de la quinta idea compuesta desarrollada. 1: Mecanismo para asistencia (1.A: Trinquete, 1.B: Lámina móvil, 1.C: Lámina base), 2: Barrote, 3: Estructura, 4: Abrazaderas de cuerda (4.A: Varilla de accionamiento, 4.B: Abrazaderas, 4.C: Acople a la barra), 5: Cuerdas guía, 6: Polea para ventaja mecánica de 4:1. Imagen elaborada por el autor.

### Selección del concepto

En esta sección se concreta el concepto general del diseño mecánico. Para lo cual se necesita realizar la evaluación, comparación e incluso modificación de las propuestas generadas previamente. Esto con el fin de extraer el diseño más adecuado para satisfacer las demandas de cliente.

**Modelo de decisión** En esta etapa del diseño conceptual es fundamental tomar decisiones acertadas. Razón por la cual, fue de gran importancia implementar el "modelo de decisión" planteado por G.Dieter y L.Schmidt [20]. Según el cual, partiendo de la evaluación del panorama en que se va a desenvolver el proyecto, las decisiones técnicas de diseño, que permeen el desempeño de dicho producto pueden ser justificadas. Este modelo de decisión se basa en los siguientes 6 elementos básicos:

1. **Cursos alternativos de acción (Alternative courses of action):** Existencia de diferentes alternativas técnicas por escoger. Ejm: Material, proveedor, concepto de diseño, entre otras.
2. **Estados de la naturaleza (States of nature):** Se refiere al ambiente físico en dónde la decisión toma lugar, y sobre la que el "curso alternativo de acción" escogido se desenvolverá. Ejm: Ambiente cerrado, abierto, lluvioso, oxidante, entre otros.
3. **Resultado (Outcome):** Son las consecuencias de la alternativa técnica seleccionada, y el ambiente físico dónde se implementó. Ejm: Presencia o no de: corrosión, deformación elástica o plástica, entre otros.
4. **Objetivo (Objective):** Es el desempeño deseado de la alternativa técnica seleccionada sobre el ambiente físico en que se va a desenvolver.
5. **Utilidad (Utility):** Es la medida de satisfacción respecto del resultado de la decisión técnica tomada.
6. **Estado de conocimiento (States of knowledge):** Es el nivel de certidumbre que se tiene respecto del comportamiento del "Estado de la naturaleza" (expresada ocasionalmente en términos de probabilidad). Según el nivel de certeza de dicho comportamiento, un modelo de decisión puede ser clasificado en:
  - **Decisión bajo certeza (Decision under certainty):** Se tiene completa confianza de que una decisión tomada producirá el efecto esperado. Esto debido a que el estado de la naturaleza es estable y está bajo control. Ejm: Sitio cerrado, piso sólido, humedad controlada, entre otros.

- **Decisión bajo incertidumbre (Decision under uncertainty):** El estado de la naturaleza es fluctuante; sin embargo, para cada variable se dispone de un valor probabilístico para su ocurrencia. Ejm: Se conoce la probabilidad de lluvia, de nivel de marea, entre otros.
- **Decisión bajo riesgo (Decision under risk):** No se tiene confianza del efecto que un curso de acción producirá. Esto debido a que pueden presentarse 2 o más resultados, de los que no se conoce su probabilidad de ocurrencia.
- **Decisión bajo conflicto (Decision under conflict):** El curso de acción tomado entra en conflicto con el de otras personas, cuyas intenciones son competitivas para con el proyecto propio.

**Herramientas para tomar de decisiones** En el libro de G.Dieter y L.Schmidt [20] se proponen varias herramientas que buscan facilitar la toma de decisiones. Dichas herramientas se basan en información cuantitativa para evaluar los **resultados** que generarían todos los  **cursos alternativos de acción**, y así identificar el más acorde con el **objetivo** planteado. Dicha información cuantitativa corresponde con los valores probabilísticos del **estado de conocimiento** sobre el **estado de la naturaleza**, y también de la cuantificación de las repercusiones que cada curso de acción tendrá para con el proyecto.

**Diagrama de Pugh** El diagrama de Pugh (Pugh Chart) es una de las herramientas recomendadas para la toma de decisiones en un ambiente de **decisión bajo certeza**. Se caracteriza por basarse en las CR's definidas anteriormente, para comparar desde la perspectiva del cliente los diseños generados. Esto con el fin de evaluar cuantitativamente cada opción; resaltando de esta manera los que atiendan más apropiadamente las exigencias del usuario. La generación y aplicación de este diagrama (en forma de tabla) se basa en el siguiente procedimiento:

#### **Pasos para generar y aplicar el diagrama de Pugh:**

1. Se dispone la primera columna del diagrama de Pugh de la misma manera que las demandas de cliente (y sus respectivas valoraciones) fueron ubicadas en la casa de la calidad (HOQ).
2. Se agrega una columna en blanco por cada alternativa de diseño disponible. Cada una de estas debe ser titulada con el nombre e imagen que represente el concepto al que pertenece.
3. Tomar un tiempo para reflexionar sobre el funcionamiento de cada uno de los diseños alternativos.

4. De todos los conceptos se seleccionará el considerado como superior, para definirlo como referencia valorativa (no tiene valoración cuantitativa).
5. Se realiza una comparación individual entre cada uno de los conceptos restantes y el diseño escogido como referencia. Para lo cual, cada fila es calificada según su efectividad relativa<sup>8</sup> para responder las demandas de cliente. Dicha calificación se expresa con los símbolos: "+", "-" o "=", si el concepto evaluado responde a la demanda de cliente de mejor, peor o igual manera que la referencia.
6.
  - A cada concepto se le suma la cantidad de "+" y de "-" obtenidos. Cada uno de ellos multiplicado por la valoración de demanda de cliente respectiva. El resultado obtenido se coloca debajo de cada columna.
  - Verificar que la referencia valorativa sea superior a los demás conceptos, revisando que sus puntajes negativos ("-") superen al puntaje positivo ("+") correspondiente. En caso de no suceder esto, continuar:
7.
  - Se seleccionará como nueva referencia valorativa aquel concepto que haya obtenido el puntaje positivo ("+") más alto, en conjunto con el negativo ("-") más bajo.
  - Repetir Pasos 5 y 6.
8. (Paso adicional) Examinar formas de mejorar el concepto seleccionado, el cual deberá ser la misma referencia valorativa. Para esta tarea puede ser de gran ayuda revisar las características de los conceptos descartados.

**Nota:** En caso de que un concepto adquiriera un puntaje positivo ("+") igual al negativo ("-"), se considerará un "empate" entre este y el concepto seleccionado como referencia valorativa. Situación que requerirá de que se consideren criterios ajenos al diagrama de Pugh para decidir entre uno o el otro.

**Aplicación del Modelo de decisión** De los diseños generados, fueron identificadas 4 partes funcionales (Estructura, Actuador, Accionamiento Manual y Accionamiento Automático). Cada una de estas encargada de cumplir un rol específico dentro del conjunto de "subproblemas" en el método morfológico de diseño, cómo se presenta a continuación:

- **Estructura:**
  - Acople con BP
  - Ubicación anatómica adecuada



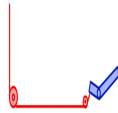

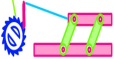
---

<sup>8</sup>Respecto de la referencia




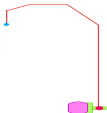
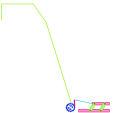
- Mínima intervención con el ejercicio
  
- **Actuador:**
  - Re-acomodación de carga
  - Liberación barra contra cuerpo
  - Mínima intervención con el ejercicio
  
- **Accionamiento Manual:**
  - Acople con BP
  - Ubicación anatómica adecuada
  - Mínima intervención con el ejercicio
  
- **Accionamiento Automático:**
  - Acople con BP
  - Ubicación anatómica adecuada
  - Accionamiento automático
  - Mínima intervención con el ejercicio

El entorno en que se desempeñará el sistema de seguridad para la prensa de banco (i.e. gimnasio cerrado, uso en interiores, etc) implica un **estado de la naturaleza** estable y controlado. En dónde se propicia un ambiente de **decisión bajo certeza**. Razón por la cual se seleccionó el diagrama de Pugh como herramienta de decisión para concretar el concepto general del diseño mecánico.

Con el objetivo de seleccionar el concepto más adecuado para cada una de las partes funcionales: Estructura, actuador, accionamiento manual y accionamiento automático, 4 contrastes deberán ser realizados. Razón por la cual 4 diagramas de Pugh fueron desarrollados: la tabla **3-5** para "estructura", **3-3** para "actuador", **3-4** para "accionamiento manual" y **3-6** "accionamiento automático".

Val (CR's) Customer Requirements					
	1er C.C.	2do C.C.	3er C.C.	4to C.C.	5to C.C.
5.0 Velocidad de reacción	+	-	*	=	=
5.0 Límite de Peso soportado	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
4.0 Ergonomía	-	-	*	=	=
2.0 Baja interferencia con el ejercicio	-	-	*	=	=
1.0 Portabilidad	+	+	*	+	-
5.0 Adaptabilidad a prensas de banco	-	=	*	-	=
1.0 Estética	+	+	*	+	+
2.0 Economía	+	-	*	-	-
1.0 Protección contra líquidos	-	=	*	-	-
4.0 Durabilidad	-	-	*	-	-
	<b>POSITIVOS:</b>	9.0	2.0	2.0	1.0
	<b>NEGATIVOS:</b>	16.0	17.0	12.0	8.0

**Tabla 3-4.:** Diagrama de Pugh implementado para seleccionar el mejor concepto en el aspecto de **accionamiento manual**. Tabla elaborada por el autor.



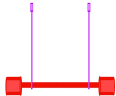
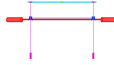
Val (CR's) Customer Requirements					
	1er C.C.	2do C.C.	3er C.C.	4to C.C.	5to C.C.
5.0 Velocidad de reacción	+	+	-	+	*
5.0 Límite de Peso soportado	+	+	+	+	*
4.0 Ergonomía	-	-	+	-	*
2.0 Baja interferencia con el ejercicio	-	-	-	-	*
1.0 Portabilidad	-	-	-	-	*
5.0 Adaptabilidad a prensas de banco	-	-	-	-	*
1.0 Estética	-	-	-	-	*
2.0 Economía	-	-	-	-	*
1.0 Protección contra líquidos	-	-	-	-	*
4.0 Durabilidad	-	-	-	-	*
	<b>POSITIVOS:</b>	10.0	10.0	9.0	10.0
	<b>NEGATIVOS:</b>	20.0	20.0	21.0	20.0

**Tabla 3-3.:** Diagrama de Pugh implementado para seleccionar el mejor concepto en el aspecto de **actuador**. Tabla elaborada por el autor.



Val (CR's) Customer Requirements	1er C.I.	2do C.I.	4to C.I.	2do C.C.	3er C.C.	4to C.C.	5to C.C.
5.0 Velocidad de reacción	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
5.0 Límite de Peso soportado	+	-	=	-	+	*	+
4.0 Ergonomía	-	-	=	=	-	*	=
2.0 Baja interferencia con el ejercicio	-	-	=	=	-	*	=
1.0 Portabilidad	+	+	-	+	-	*	-
5.0 Adaptabilidad a prensas de banco	-	-	-	-	-	*	-
1.0 Estética	=	=	=	=	+	*	-
2.0 Economía	+	=	+	=	-	*	-
1.0 Protección contra líquidos	-	=	+	=	-	*	=
4.0 Durabilidad	+	-	=	-	-	*	+
	<b>POSITIVOS:</b> 12.0	1.0	3.0	1.0	6.0		9.0
	<b>NEGATIVOS:</b> 12.0	20.0	6.0	14.0	19.0		9.0

**Tabla 3-5.:** Diagrama de Pugh implementada para seleccionar el mejor concepto en el aspecto de **estructura**. Tabla elaborada por el autor.

Val (CR's) Customer Requirements				
	1er C.C.	2do C.C.	4to C.C.	5to C.C.
5.0 Velocidad de reacción	-	-	=	*
5.0 Límite de Peso soportado	N.A	N.A	N.A	N.A
4.0 Ergonomía	+	+	=	*
2.0 Baja interferencia con el ejercicio	=	=	-	*
1.0 Portabilidad	-	-	=	*
5.0 Adaptabilidad a prensas de banco	-	-	=	*
1.0 Estética	+	-	+	*
2.0 Economía	-	-	-	*
1.0 Protección contra líquidos	-	-	=	*
4.0 Durabilidad	=	-	-	*
	<b>POSITIVOS:</b>	5.0	4.0	1.0
	<b>NEGATIVOS:</b>	14.0	19.0	8.0

**Tabla 3-6.:** Diagrama de Pugh implementado para seleccionar el mejor concepto en el aspecto de **accionamiento automático**. Tabla elaborada por el autor.

Los diagramas de Pugh correspondientes con cada parte funcional del proyecto fueron desarrollados. A partir de estos, se justificaron las decisiones presentadas a continuación:

#### Decisiones tomadas:

- **Actuador:** Se determinó mediante el diagrama de Pugh de la tabla **3-3**, el actuador más adecuado para ser implementado. El cual corresponde con el concepto de "auto-asistencia" favorecida por el conjunto de polea y trinquete antiretorno, inmerso en el quinto concepto compuesto (elemento "6" y "1.A" de la figura **3-24**).
- **Accionamiento Manual:** Se determinó mediante el diagrama de Pugh de la tabla **3-4**, el accionamiento manual más adecuado para ser implementado. El cual consiste del pedal y la polea presentes en el tercer concepto compuesto (elementos "3" y "5" en la figura **3-22**).
- **Accionamiento Automático:** Se determinó mediante el diagrama de Pugh de la tabla **3-6**, el accionamiento automático más adecuado para ser implementado. El cual consiste del sistema de acople de cuerdas utilizado en el quinto concepto compuesto (elementos "2", "4" y "5" en la figura **3-24**).
- **Estructura:** Un empate tuvo lugar en el diagrama de Pugh para la selección del diseño estructural (tabla **3-5**). En el cual coincidieron los puntajes positivos y negativos de:

El primer concepto individual (elemento "1" en la figura **3-16**), el cuarto concepto compuesto (elemento "7" en la figura **3-23**) y el quinto concepto compuesto (elemento 3 en la figura **3-24**).

Para concretar el diseño que será implementado, se consideraron aspectos ajenos a las demandas de cliente, tales como la sencillez y la compatibilidad con los conceptos de accionamiento manual y accionamiento automático seleccionados anteriormente. Exaltándose de esta manera el perteneciente a la estructura del cuarto concepto compuesto (elemento "7" en la figura **3-23**).

**Diseño final** Los bocetos concretados como partes funcionales en el diseño mecánico, se tomaron en cuenta para establecer la propuesta final. La cual fue posteriormente analizada en busca de mejoras que se le pudieran realizar.

Los mejores bocetos para cada parte funcional del diseño mecánico fueron integrados en la propuesta final, presentada en la figura **3-25**. Sobre la cual se realizaron las modificaciones presentadas a continuación:

- Se fortaleció la estructura, ahora compuesta únicamente por segmentos rectos (elemento "1" en la figura **3-25**).
- Se concretó la forma en que sería dirigida la fuerza desarrollada en el accionamiento manual hacia el barrote (4.F) del accionamiento automático (5). Esto mediante el acople de poleas (elemento "3" en la figura **3-25**), definido con mayor detalle en la figura **3-27**, donde se observa con mayor detalle los elementos que lo componen: una correa (3.A) como elemento transmisor de tensión, los rodillos (3.C y 3.D) encargados de dirigir dicha tensión, y el acople a la estructura (3.B) mediante el cual este sistema es adherido a la estructura (1).
- Se diseñó un sistema de corredera y poleas (elemento "4" en la figura **3-25**) con el cual se puede ajustar el punto de conexión entre la carga y la estructura; además de facilitar el levantamiento de la carga con una ventaja mecánica de 4 a 1. Este elemento se describe con mayor detalle en la figura **3-28**, donde se pueden identificar los elementos que lo componen.

El sistema de corredera y poleas (4) une el barrote (4.F) del accionamiento automático (5) a la estructura (1) como se muestra en la figura **3-25**. Este sistema se respalda en el riel (4.C) y el carrito (4.A y 4.B) para fijar en la posición deseada, la ubicación del conjunto de poleas (4.D, 4.G, 4.E). Últimas que serían configuradas de manera que se facilite el levantamiento de la carga, mediante una ventaja mecánica de 4 a 1.

- Se concretó el diseño del accionamiento manual (2) cómo se presenta en la figura 3-26. Este diseño dispone de un acople (2.G) encargado de unir dicho accionamiento manual con la estructura (1) en las posiciones alternativas (2.J), además de dirigir la correa (2.A) hacia el trinquete (2.F).

El trinquete (2.F) gira sin posibilidad de retorno (gracias al tope con resorte "2.E") mediante el empuje del pedal (2.C), enrollando de esta manera la correa (2.A). Este mecanismo se apoya en la base (2.D) y el eje (2.D).

Nota: La correa incluida en el diseño se describe mediante diferentes nombres: "2.A" en la figura 3-26, "3.A" en la figura 3-27 y "4.G" en la figura 3-28.

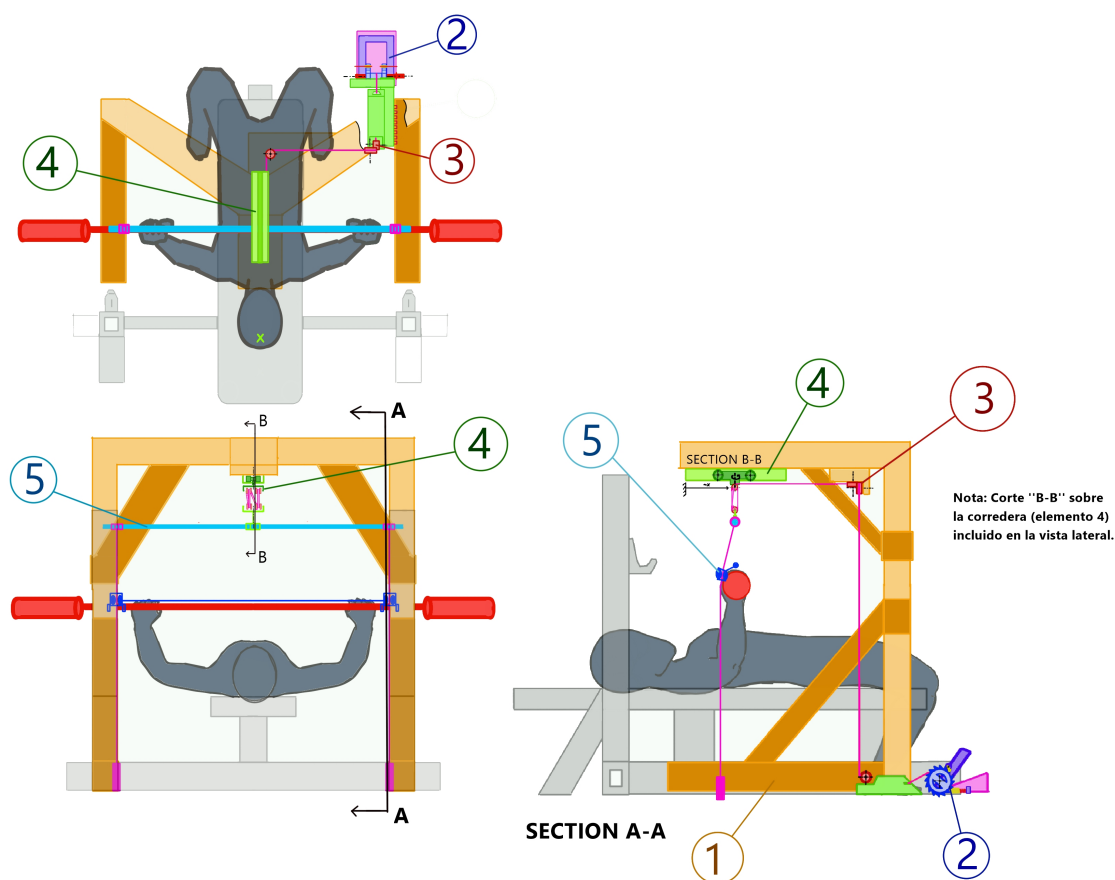
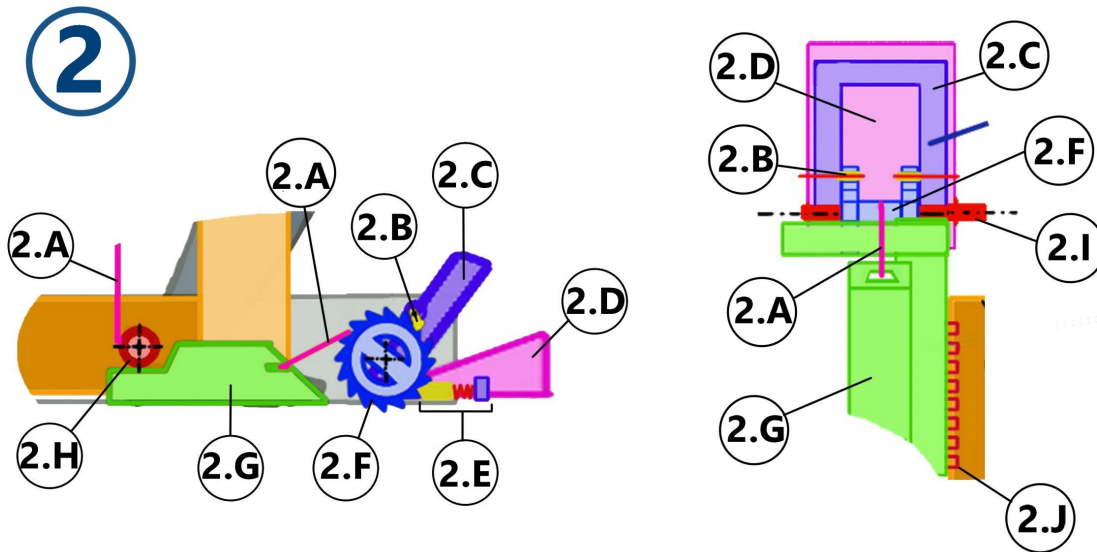
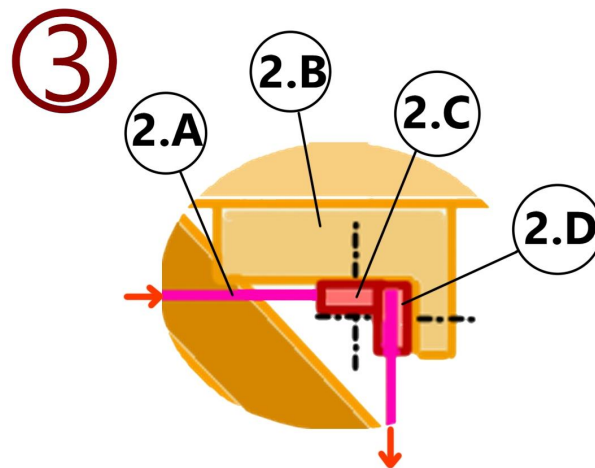


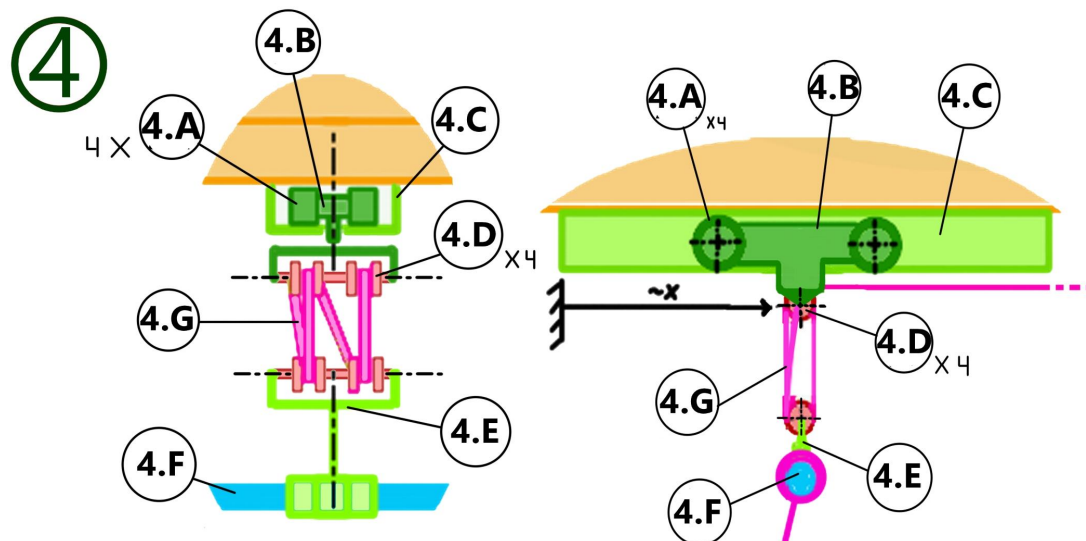
Figura 3-25.: Vistas ortogonales del concepto final. 1: Estructura de soporte, 2: Accionamiento Manual, 3: Acople de poleas, 4: Sistema de correderas y polea, 5: Accionamiento automático. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-26.:** Vistas de detalle del **accionamiento manual** (elemento "2" en la figura 3-25). 2.A: Correa, 2.B: Tope de transmisión, 2.C: Pedal, 2.D: Base, 2.E: Tope antiretorno, 2.F: Trinquete, 2.G: Acople con la estructura, 2.H: Polea de direccionamiento, 2.I: Eje, 2.J: Posiciones alternativas. Imagen elaborada por e autor.



**Figura 3-27.:** Vista de detalle del **acople de poleas** (elemento "3" en la figura 3-25). 3.A: Correa, 3.B: Acople a la estructura, 3.C: Rodillo horizontal, 3.D: Rodillo vertical. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-28.:** Vista de detalle del **sistema de correderas y polea** (elemento "4" en la figura 3-25). 4.A: Ruedas del carrito, 4.B: Cuerpo del carrito y acople de rodillos superiores, 4.C: Riel, 4.D: Rodillos de polea, 4.E: Acople de rodillos inferiores, 4.F: Barrote del accionamiento automático. Imagen elaborada por el autor.

### Características de ingeniería

Durante este segmento de diseño se concretan algunas de las decisiones técnicas más importantes para el proyecto, las cuales requieren de un estudio ingenieril sobre el boceto conceptual establecido anteriormente. Dichas decisiones se limitan a determinar la validez de la propuesta conceptual concebida, y también definir sobre esta, la dimensiones generales, restricciones y comportamientos básicos.

**Metodología** El desarrollo de esta sección se llevó a cabo en función de los 7 pasos sugeridos por G.Dieter y L.Schmidt [20] para guiar un estudio de ingeniería sobre un diseño conceptual. Estos pasos se presentan a continuación:

1. **Determinar el estado del problema (Determine problem statement):** Determinar el propósito del estudio. Para lo cual debe identificarse la información disponible y los resultados que de este estudio se pretenden obtener.
2. **Definir los límites del modelo (Define the boundaries of the model):** Se establecen las dimensiones espaciales máximas de la propuesta. Dichas dimensiones se

representan en el largo, ancho y alto de un cubo que encierre completamente el diseño, conocido como "volumen de control".

Adicionalmente se definen los límites de desempeño, sobre los que se asegura un funcionamiento efectivo del producto. Dichos límites concuerdan con los servicios que el proyecto vaya a ofrecer (i.e. Peso máximo o mínimo levantado, capacidad máxima o mínima, máximo o mínimo voltaje de operación, entre otros.)

3. **Leyes físicas pertinentes (Pertinent physical laws):** Determinar la teoría física que sea relevante para estudiar el diseño conceptual. Esto teniendo en cuenta la información disponible y los resultados esperados del estudio, definidos en la etapa "Determinar el estado del problema".
4. **Identificar suposiciones (Identify assumptions):** Determinar aquellos aspectos del diseño conceptual que puedan ser simplificados o ignorados. Esto con la intención de reducir variables a la hora de resolver matemáticamente los estudios físicos planteados.
5. **Construir el modelo (Construct the model):** Realizar un esquema analítico de los aspectos del proyecto que se desean estudiar, en el cual se tengan en cuenta las restricciones, suposiciones y leyes físicas concretadas anteriormente. Dicho esquema puede estar compuesto por ecuaciones matemáticas, diagramas físicos de cuerpo libre, o cualquier otra representación que sea considerada pertinente.
6. **Computación y verificación (Computation and verification):** Recurrir a herramientas CAD para construir las piezas o sistemas relacionados con el modelo teórico construido anteriormente.
7. **Validación del modelo (Validation of the Model):** Verificar que los resultados teóricos obtenidos durante la construcción del modelo concuerden con los objetivos planteados inicialmente (en la etapa "Determinar el estado del problema"). Para esto deberán evaluarse los límites de desempeño sobre el modelo CAD del proyecto.

Los 7 pasos explicados anteriormente fueron aplicados sobre el **diseño mecánico**. Esto con la intención específica de concretar la geometría de la estructura de soporte (elemento "1" en la figura **3-25**). El proceso llevado en cada uno de los mencionados pasos se expondrá a continuación:

**Determinar el estado del problema** Se determinaron los siguientes parámetros de entrada y resultados esperados:

- **Entradas:**

- Valor máximo de la carga, definido en el PDS preliminar con un valor de 500kg.

- Datos antropométricos.
  - Dimensiones de diversos modelos de equipo para prensa de banco.
  - Datos disponibles en catálogo de suministro de materiales y demás elementos comerciales.
- **Salidas (propósito):**
- Concretar la geometría definitiva de la estructura de soporte.
  - Determinar materiales candidatos para componer la estructura de soporte.
  - Concretar el suministro comercial para componer la estructura de soporte.

**Definir los límites del modelo** A las medidas generales de la estructura de soporte se les estableció un rango de valores, dentro de los cuales se asegura que dicha estructura no interferiría con el desarrollo del ejercicio ni con el equipo para la prensa de banco. Estos rangos de medidas se presentan en color **rojo** sobre la figura **3-29**.

Para dimensionar la estructura de soporte, se vio la necesidad de conocer primero las medidas típicas de los equipos para prensa de banco (presentadas en color **negro** sobre la figura **3-29**), así cómo también las extensiones humanas asociadas con el desarrollo de este ejercicio. Respecto de las fuentes consultadas, el estudio de R.Ávila et al sobre dimensiones antropométricas fue tomado en cuenta [4], así cómo también algunos catálogos de dispositivos para el entrenamiento muscular.

A continuación se exponen las justificaciones de cada una de las medidas definidas para la estructura de soporte:

- **Altura ( $Y = 1,75m$ ):** Los 1.75 metros de altura fueron contemplados en brindarle al usuario el espacio suficiente para llevar a cabo el ejercicio con normalidad. Se llegó a este valor sumando:
  - 0.45 metros: Distancia típica entre el suelo y el espaldar de un equipo para la prensa de banco.
  - 0.50 metros: Espacio destinado para ubicar el sistema de correas y polea (elemento "4" en la figura **3-25**).
  - 0.80 metros: Valor aproximado del alcance anterior del brazo<sup>9</sup>, determinado por R.Ávila et al para un percentil del 95 % en la población latinoamericana [4].
- **Extensión de la base ( $Z8 \approx 1.0m$ ):** Se determinó este valor con la intención de evitar interferir con la base del equipo para prensa de banco.

---

<sup>9</sup>Distancia medida desde la espalda hasta la punta de los dedos, con los brazos completamente extendidos hacia adelante.

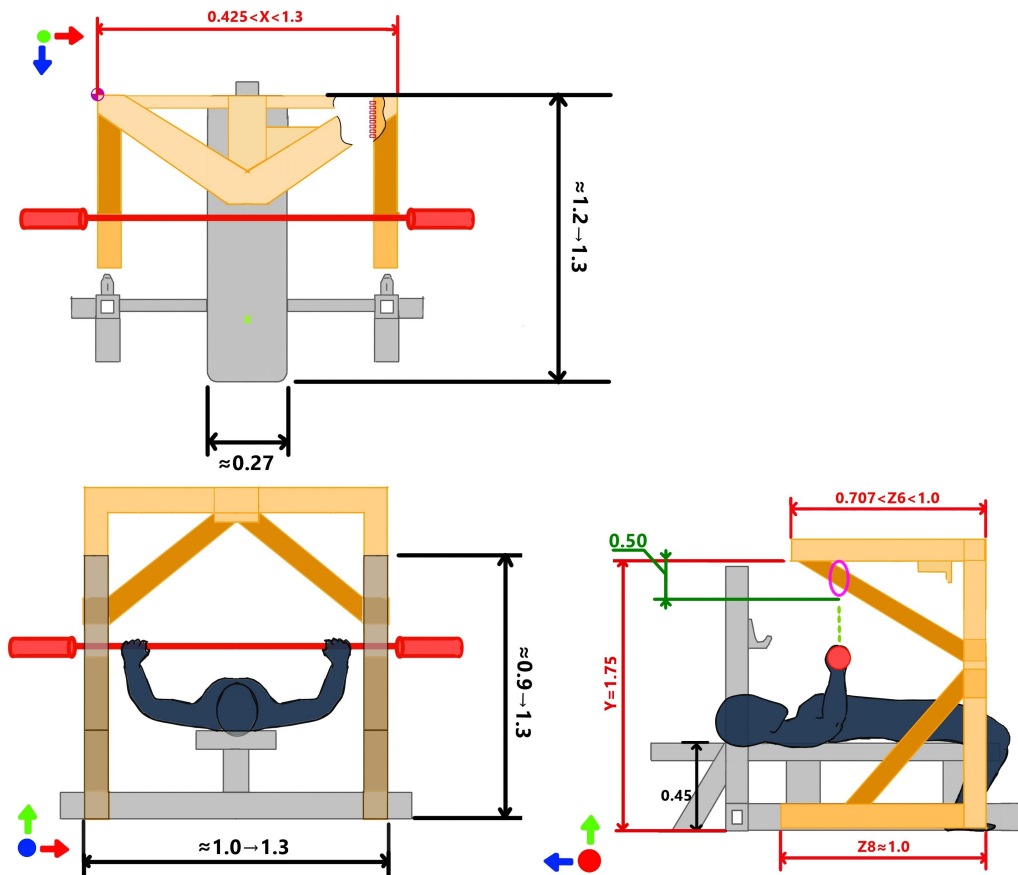


- Soporte superior ( $0,707m < Z6 < 1,0m$ ): Se definió esta distancia buscando que el punto de anclaje de la carga con la estructura, fuera ubicado en una posición acorde con el recorrido horizontal de la barra, durante el desarrollo de la prensa de banco. Para esta parte se planteó el rango definido entre:
  - 0.707 metros: Medida aproximada entre la cadera y la cima de la cabeza. Se llegó a este valor calculando la diferencia entre las medidas antropométricas de estatura<sup>10</sup> y altura de la cresta iliaca medial<sup>11</sup> (en un percentil del 95 % para la población latinoamericana), extraídas del estudio de R.Ávila et al [4].
  - 1.0 metro: Largo máximo del soporte superior sin comprometer la estabilidad de la estructura. Esto a razón de no superar el largo definido para la "extensión de la base".
  
- Ancho ( $0,425m < X < 1,3m$ ): Se definió esta distancia buscando proporcionar estabilidad a la estructura, y a la vez brindar al levantador el espacio suficiente para ubicarse cómodamente en medio del equipo para prensa de banco y el diseño mecánico. Estos valores se justificaron en la siguiente información:
  - 0.425 metros: Medida aproximada del ancho de las caderas en la población latinoamericana. Esto para un percentil del 95 % según R.Ávila et al [4].
  - 1.3 metros: Distancia más alta de separación entre soportes verticales verticales en equipos para prensa de banco. Esto según los catálogos consultados.

---

<sup>10</sup>La altura total de la persona, en posición erguida.

<sup>11</sup>Distancia medida desde la planta de los pies hasta la cadera, aproximadamente.



**Figura 3-29.:** Dimensiones habituales en los equipos para prensa de banco en color **negro**. Medidas generales definidas para la estructura de soporte en color **rojo**. Todos los valores expresados en metros. Imagen elaborada por el autor.

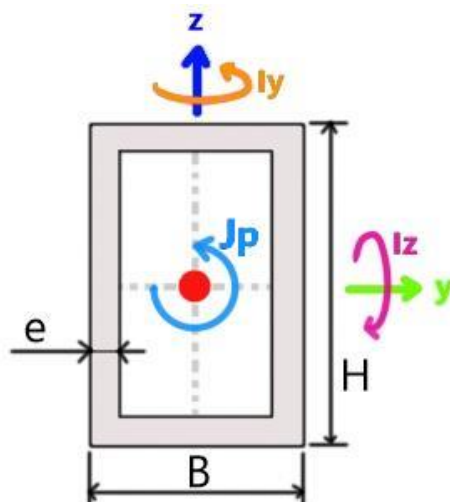
**Leyes físicas pertinentes** Se identificó la teoría apropiada para relacionar la información disponible con los objetivos planteados durante la etapa "determinación del estado del problema". Dicha teoría fue extraída principalmente del libro sobre mecánica vectorial de F. Beer et al [6]; del cual se resaltaron los siguientes conceptos:

- **Análisis estructural:** Métodos para calcular las fuerzas internas y en los apoyos de una estructura.
  - Para: Determinar las reacciones resultantes de aplicar la carga sobre el concepto estructural con las dimensiones concretadas.
  - Requisitos: Saber resolver sistemas de ecuaciones, análisis de diagramas de cuerpo libre, concepto de equilibrio de fuerzas y momentos.
- Teoría de fallo: Criterios para determinar la deformación y fallo de los materiales.

- Para: Guiar la selección de los materiales y perfiles de soldadura que constituirán la estructura de soporte. Esto según la formulación de un factor de seguridad adecuado.
- Requisitos: Análisis de estrés, esfuerzos axiales, flectores y torsores, momento de inercia y momento polar de inercia en áreas.
- Notas: Se limitó el análisis inercial de perfiles rectangulares. Esto debido a las intenciones de componer la estructura de soporte mediante perfiles de soldadura con dicha geometría.

### Análisis inercial de perfiles de soldadura rectangulares:

Las ecuaciones de momento de inercia horizontal " $I_z$ :" (ecuación 3-1), vertical " $I_y$ " (ecuación 3-2) y polar " $J_p$ :" (ecuación 3-3), son correspondientes con el análisis centroidal de un perfil de soldadura cuadrado, de área transversal " $A$ ". Las mencionadas ecuaciones recurren a la notación de la figura 3-30 para referirse a las medidas de ancho (B), altura (H), espesor (e) y orientación del la inercia ( $I_y$ ,  $I_z$ ,  $J_p$ ).



**Figura 3-30.:** Representación de un perfil de soldadura rectangular, con el sistema de referencia y dimensiones consideradas para la formulación de las ecuaciones de momento de inercia horizontal " $I_z$ :" (ecuación 3-1), momento de inercia vertical " $I_y$ " (ecuación 3-2) y momento polar de inercia " $J_p$ :" (ecuación 3-3). B: Ancho de base, H: Altura, e: Espesor,  $I_z$ : Orientación del momento de inercia horizontal,  $I_y$ : Orientación del momento de inercia vertical,  $J_p$ : Orientación del momento polar de inercia y "•": Centroide geométrico. Imagen elaborada por el autor.

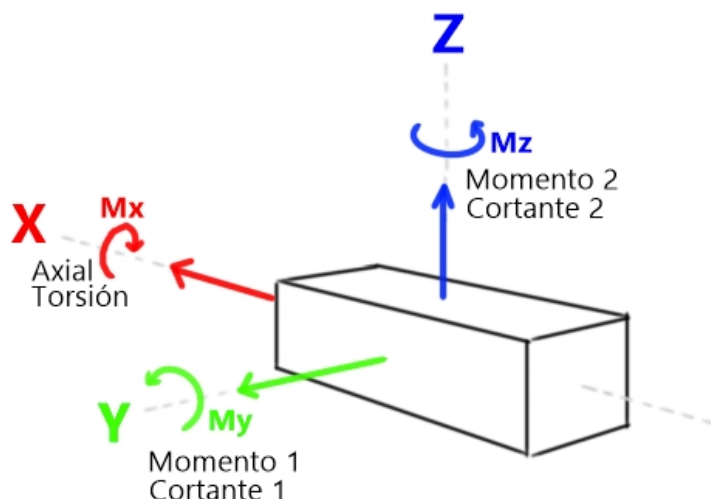
$$I_z = \frac{B H^3}{12} - \frac{(B - 2e)(H - 2e)^3}{12} \quad (3-1)$$

$$I_y = \frac{B^3 H}{12} - \frac{(B - 2e)^3 (H - 2e)}{12} \quad (3-2)$$

$$J_p = \int_A r^2 dA = \int_A (y^2 + z^2) dA = I_y + I_z \quad (3-3)$$

### Esfuerzos:

Se consideró de gran importancia reconocer sobre la estructura de soporte, los esfuerzos producto de fuerzas axiales (ecuación 3-4) y cortantes (ecuaciones 3-5 y 3-6); así como de momentos flectores (ecuaciones 3-7 y 3-8) y torsores (ecuación 3-9). Las expresiones matemáticas para los mencionados esfuerzos obedecen a la orientación descrita en la figura 3-31.



**Figura 3-31.:** Orientación considerada para el análisis de esfuerzos en un elemento finito tridimensional. Imagen elaborada por el autor.

De la ecuación 3-4 las variables representan,  $\sigma_n$  : Esfuerzo axial, F: Fuerza axial de Tensión o compresión y A: Área transversal. Por otro lado, de la ecuación 3-5,  $\tau_u$  : Esfuerzo cortante en una unión, v: Fuerza cortante y A: Área de la unión. Asimismo, de la ecuación 3-6,  $\tau_{tr}$  : Esfuerzo cortante transverso,  $A'$ : Área de la sección transversal sobre el punto de interés,  $y'$ : Distancia desde el eje neutro hasta el centroide de  $A'$ , I: Momento de inercia y b: Ancho de la sección transversal en el punto de interés.

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (3-4)$$

$$\tau_u = \frac{v}{A} \quad (3-5)$$

$$\tau_{tr} = \frac{v * A' * y'}{I * b} \quad (3-6)$$

De la ecuación 3-7 las variables representan,  $\sigma_{b_1}$  : Esfuerzo flector 1,  $M_y$ : Momento flector en dirección de "y", r: Distancia desde el centroide hasta el punto de interés en dirección de "z",  $I_z$ : Momento de inercia, calculado en la misma dirección que el momento flector "  $M_y$ ". Por otro lado, de la ecuación 3-8,  $\sigma_{b_2}$  : Esfuerzo flector 2,  $M_z$ : Momento flector en dirección de "z", r: Distancia desde el centroide hasta el punto de interés, en dirección de "y"  $I_y$ : Momento de inercia, calculado en la misma dirección que el momento flector "  $M_z$ ". De la ecuación 3-9,  $\tau_{to}$  : Esfuerzo cortante por torsión, T: Momento torsor, r: Distancia desde el eje central hasta el punto de interés, J: Momento polar de inercia. Y finalmente, de la ecuación 3-10, F.S: Factor de Seguridad,  $\sigma_{fail}$ : Máximo esfuerzo según el criterio de fallo y  $\sigma_{adm}$ : Máximo esfuerzo admisible.

$$\sigma_{b_1} = -\frac{M_y * r}{I_z} \quad (3-7)$$

$$\sigma_{b_2} = -\frac{M_z * r}{I_y} \quad (3-8)$$

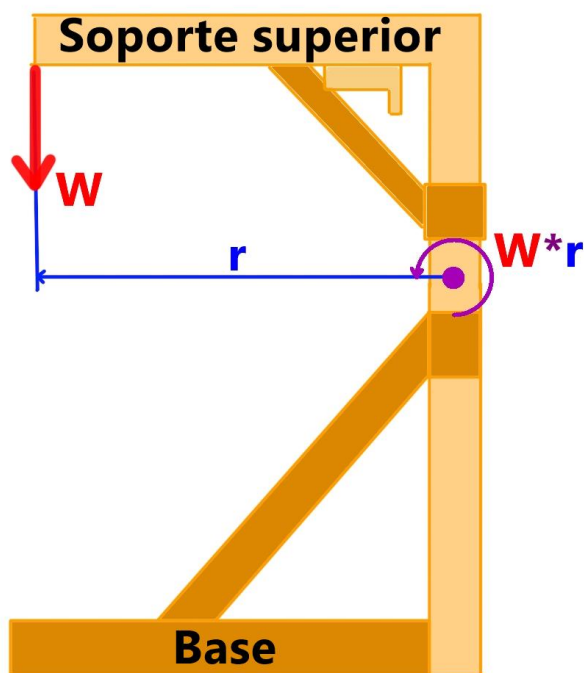
$$\tau_{to} = \frac{T * r}{J} \quad (3-9)$$

$$F.S = \frac{\sigma_{fail}}{\sigma_{adm}} \quad (3-10)$$

**Identificar suposiciones** Una serie de suposiciones fueron consideradas con las intenciones de: simplificar el análisis del diseño generado, agilizar la formulación de un modelo matemático de la estructura de soporte y facilitar los cálculos que sean requeridos. Dichas suposiciones se presentan a continuación:

- **Ignorar el efecto de la gravedad:** Simplifica considerablemente tanto la formulación como la solución del modelo matemático de la estructura de soporte. Esto debido a la posibilidad de ignorar el peso de cada elemento que forme parte de dicha estructura.
- **Materiales homogéneos:** Ignorar los defectos de los materiales y sus implicaciones. Esto permite aplicar las fórmulas y teoría sobre falla en los materiales en el caso de estudios estáticos. Cabe aclarar que, en el caso de un estudio de vida útil y fallo por fatiga, esta suposición debe ser **suspendida**.
- **Ausencia de elementos oxidantes:** Se ignora el efecto de la corrosión sobre el desempeño de la estructura de soporte.
- **Análisis bidimensional:** Representar el diseño de la estructura de soporte en una versión bidimensional equivalente, aprovechando la simetría que la caracteriza. Esto con la intención de agilizar los cálculos matemáticos y el análisis de los resultados obtenidos.

**Construir el modelo** Durante la formulación de una representación analítica para la estructura de soporte, un importante defecto fue identificado, el cual limitaría considerablemente las capacidades del diseño mecánico para soportar la carga. Este defecto implica las vigas verticales encargadas de comunicar la base con el soporte superior; sobre las cuales se recarga la totalidad del peso en forma de esfuerzos flectores, cómo se muestra en la figura 3-32.

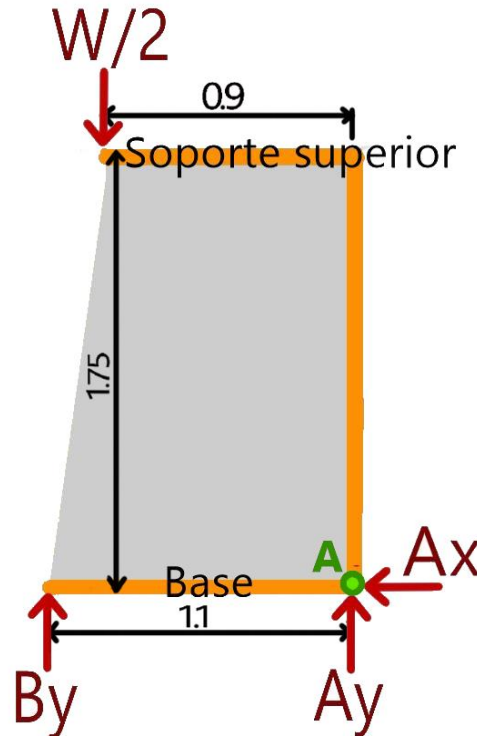


**Figura 3-32.:** Defecto de diseño en la estructura de soporte: La carga ( $W$ ) es convertida mediante la longitud del soporte superior ( $r$ ) en un elevado momento flector ( $W*r$ ). Imagen elaborada por el autor.

**Selección de configuración** En busca de minimizar el efecto del momento flector identificado anteriormente, 3 configuraciones se derivaron de este último diseño de estructura de soporte, manteniendo las dimensiones generales presentadas en la figura 3-29. Para cada configuración, la esperada disminución del momento flector fue determinada mediante un análisis estructural por armaduras y/o bastidores según el caso. Este proceso analítico será presentado a continuación:

Para analizar las 4 configuraciones resultantes (la inicial y las 3 derivadas), se consideraron todas las suposiciones indicadas en la sección "identificar suposiciones". De esta manera se concretó un esquema bidimensional, de elementos homogéneos, sin los efectos de la gravedad o la corrosión, y en dónde se involucra únicamente el impacto de la carga (250Kg, la mitad de la que soportará la estructura completa) y las reacciones en los apoyos: superficie rugosa

( $A_x$  y  $A_y$  en la figura 3-33) y superficie lisa ( $B_y$  en la figura 3-33). Cabe agregar que los valores en estos apoyos (calculados mediante el procedimiento 3-11) son los mismos para todas las configuraciones planteadas.



**Figura 3-33.:** Esquema general de las configuraciones desarrolladas.  $B_y$ : Único apoyo sobre superficie lisa,  $A_x$ : Apoyo horizontal sobre superficie rugosa,  $A_y$ : Apoyo vertical sobre superficie rugosa. Todas las dimensiones en metros. Imagen elaborada por el autor.

$$\begin{aligned} \frac{W}{2} &= 2500_N \left( \frac{500Kg}{2} * 10 \frac{m}{s^2} \right) \\ \sum M_A : \frac{W}{2} * 0,9m - B_{yN} * 1,1m &= 0 \\ B_y &= 2045,5_N \rightarrow \text{"Dirección correcta"} \\ \sum F_y : B_y + A_y - \frac{W}{2} &= 0 \\ A_y &= 454,5_N \rightarrow \text{"Dirección correcta"} \\ \sum F_x : A_x &= 0 \end{aligned} \tag{3-11}$$

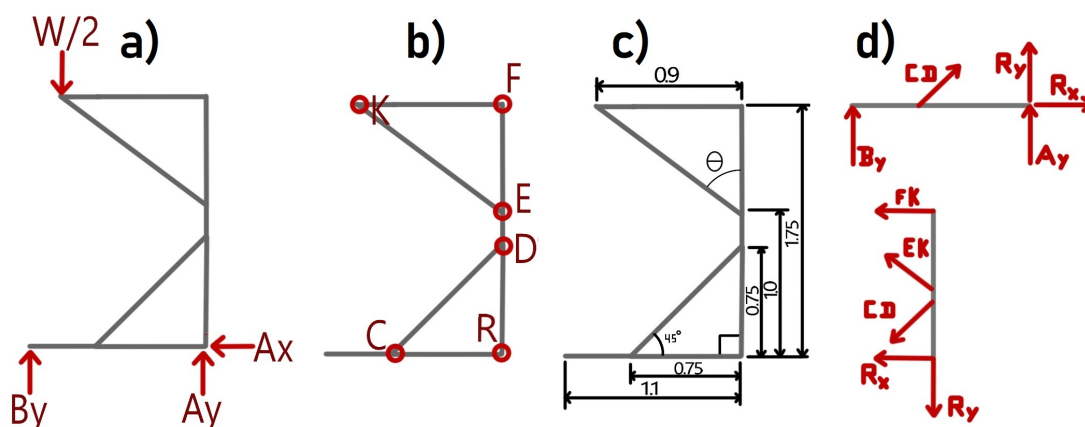
#### Primera configuración (original)

El esquema de la primera configuración se presenta en la figura 3-34. Esta consiste de 3 elementos de tipo armadura: barras CD, KE y KF, y 2 a modo de bastidores: una desde el

apoyo "By" hasta los apoyos "Ax" y "Ay", pasando por "C", y otra que se extiende desde "R" hasta "F", pasando por "D" y "E".

Las reacciones internas de esta configuración fueron determinadas mediante el análisis aislado de los 2 bastidores, cómo se presenta en el diagrama "d" en la figura 3-34. Mediante el procedimiento 3-12 se pudo determinar:

- Compresión más alta: 4242.73 Newton (elemento "CD")
- Tensión más alta: 3000 Newton (elemento "FK")
- Reacción más alta: 3000 Newton ( $R_x$ )



**Figura 3-34.:** Primera configuración de la estructura de soporte. a) Fuerzas (Peso:  $W/2$ ) y reacciones en los apoyos ("By", "Ay" y "Ax" calculados en 3-11), b) Uniones, c) Medidas de los elementos (en metros), d) Desmembramiento usado en el análisis por equilibrio de fuerzas y momentos en 3-12. Imagen elaborada por el autor.



$$\theta = \text{atan}\left(\frac{0,9}{0,75}\right) \approx 50^\circ$$

$$\sum M_R : -B_y * 1,1_m - CD * \sin(45^\circ) * 0,75_m = 0$$

$$CD = -4242,73_N \rightarrow \text{”Compresión”}$$

$$\sum F_x : CD * \cos(45^\circ) + R_x = 0$$

$$R_x = 3000_N \rightarrow \text{”Dirección correcta”}$$

$$\sum F_y : B_y + CD * \sin(45^\circ) + A_y + R_y = 0 \quad (3-12)$$

$$R_y = 500,6_N \rightarrow \text{”Dirección correcta”}$$

$$\sum M_F : -R_x * 1,75_m - CD * \sin(45^\circ) * 1_m - EK * \sin(\theta) * 0,75_m = 0$$

$$EK = -3905,27_N \rightarrow \text{”Compresión”}$$

$$\sum F_x : -R_x - CD * \sin(45^\circ) - EK * \sin(\theta) - FK = 0$$

$$FK = 3000_N \rightarrow \text{”Tensión”}$$

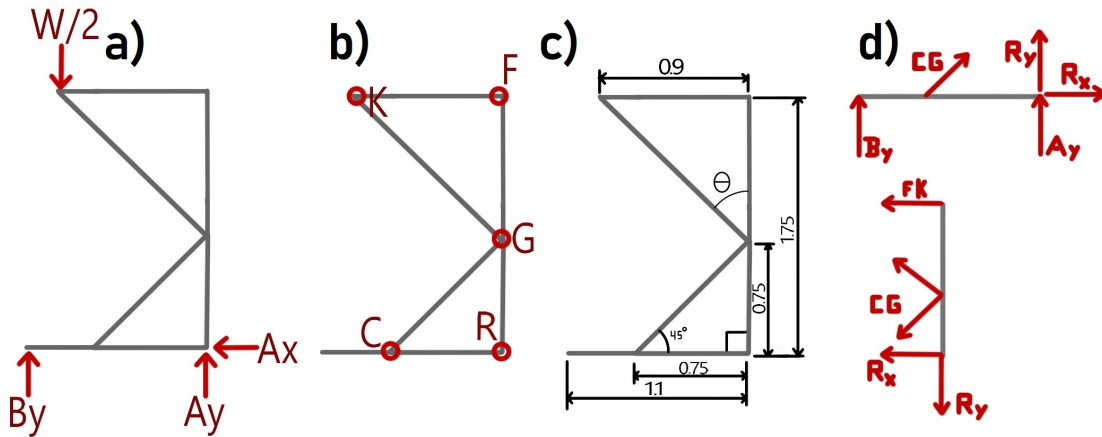
### Segunda configuración

**Cambios:** Las uniones "E" y "D" en la figura **3-34** se fusionaron, constituyendo la nueva unión "G".

El esquema de la segunda configuración se presenta en la figura **3-35**. Esta consiste de 3 elementos de tipo armadura: barras CG, GK y KF, y 2 a modo de bastidores: una desde el apoyo "By" hasta los apoyos "Ax" y "Ay", pasando por "C", y otra que se extiende desde "R" hasta "F", pasando por "G".

Las reacciones internas de esta configuración fueron determinadas mediante el análisis aislado de los 2 bastidores, cómo se presenta en el diagrama "d" en la figura **3-35**. Mediante el procedimiento 3-13 se pudo determinar:

- Compresión más alta: 4242.73 Newton (elemento "CG")
- Tensión más alta: 2250 Newton (elemento "FK")
- Reacción más alta: 3000 Newton (Rx)



**Figura 3-35.:** Segunda configuración de la estructura de soporte. a) Fuerzas (Peso:  $W/2$ ) y reacciones en los apoyos ("By", "Ay" y "Ax" calculados en 3-11), b) Uniones, c) Medidas de los elementos (en metros), d) Desmembramiento usado en el análisis por equilibrio de fuerzas y momentos en 3-13. Imagen elaborada por el autor.

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{0,9}{1}\right) \approx 42^\circ$$

$$\sum M_R : -B_y * 1,1_m - CG * \sin(45^\circ) * 0,75_m = 0$$

$$CG = -4242,73_N \rightarrow \text{"Compresión"}$$

$$\sum F_x : CG * \cos(45^\circ) + R_x = 0$$

$$R_x = 3000_N \rightarrow \text{"Dirección correcta"}$$

$$\sum F_y : B_y + CG * \sin(45^\circ) + A_y + R_y = 0 \quad (3-13)$$

$$R_y = 500,6_N \rightarrow \text{"Dirección correcta"}$$

$$\sum M_G : FK * 1_m - R_x * 0,75_m = 0$$

$$FK = 2250_N \rightarrow \text{"Tensión"}$$

$$\sum F_x : -R_x - CG * \sin(45^\circ) - GK * \sin(\theta) - FK = 0$$

$$GK = -3363,78_N \rightarrow \text{"Compresión"}$$

### Tercera configuración

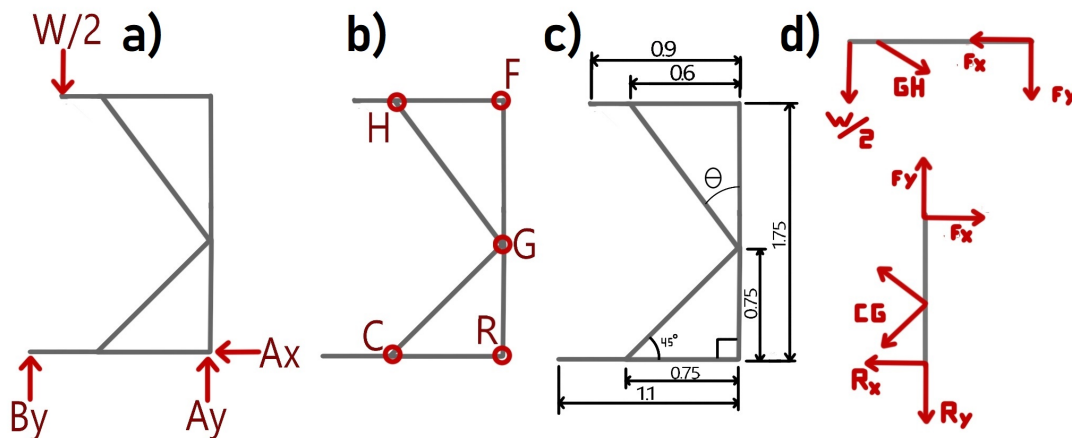
**Cambios:** De la configuración anterior (figura 3-35) se redujeron 30 centímetros de los 0.9 metros que separaban la unión "K" de la "F". A la unión modificada se le asignó ahora la letra "H" (figura 3-36). Esta modificación buscó comunicar más esfuerzo sobre esta barra en forma de compresión, aligerando el estrés percibido por los demás elementos.

El esquema de la tercera configuración se presenta en la figura 3-36. Esta consiste de 2

elementos de tipo armadura: barras CG y GH, y 3 a modo de bastidores: una desde el apoyo "By" hasta los apoyos "Ax" y "Ay", pasando por "C", otra que se extiende desde "R" hasta "F", pasando por "G", y otra que va desde el extremo dónde se aplica la carga ( $W/2$ ) hasta "F", pasando por "H".

Las reacciones internas de esta configuración fueron determinadas mediante el análisis aislado de 2 de los bastidores, cómo se presenta en el diagrama "d" en la figura 3-36. Mediante el procedimiento 3-14 se pudo determinar:

- Compresión más alta: 4373 Newton (elemento "GH")
- Tensión más alta: No calculada (implícita en los bastidores).
- Reacción más alta: 3750 Newton ( $F_y$ )



**Figura 3-36.:** Tercera configuración de la estructura de soporte. a) Fuerzas (Peso:  $W/2$ ) y reacciones en los apoyos ("By", "Ay" y "Ax" calculados en 3-11), b) Uniones, c) Medidas de los elementos (en metros), d) Desmembramiento usado en el análisis por equilibrio de fuerzas y momentos en 3-14. Imagen elaborada por el autor.

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{0,6}{1}\right) \approx 31^\circ$$

$$\sum M_R : -B_y * 1,1_m - CG * \sin(45^\circ) * 0,75_m = 0$$

$$CG = -4242,73_N \rightarrow \text{”Compresión”}$$

$$\sum F_x : CG * \cos(45^\circ) + R_x = 0$$

$$R_x = 3000_N \rightarrow \text{”Dirección correcta”}$$

$$\sum F_y : B_y + CG * \sin(45^\circ) + A_y + R_y = 0$$

$$R_y = 500,6_N \rightarrow \text{”Dirección correcta”} \quad (3-14)$$

$$\sum M_F : \frac{W}{2} * 0,9_m + GH * \sin(90^\circ - \theta) * 0,6_m = 0$$

$$GH = -4373_N \rightarrow \text{”Compresión”}$$

$$\sum F_x : -R_x - CG * \sin(45^\circ) - GH * \sin(\theta) + F_x = 0$$

$$F_x = -2249,7_N \rightarrow \text{”Dirección contraria”}$$

$$\sum F_y : -R_y - CG * \cos(45^\circ) + GH * \cos(\theta) + F_y = 0$$

$$F_y = 3750_N \rightarrow \text{”Dirección correcta”}$$

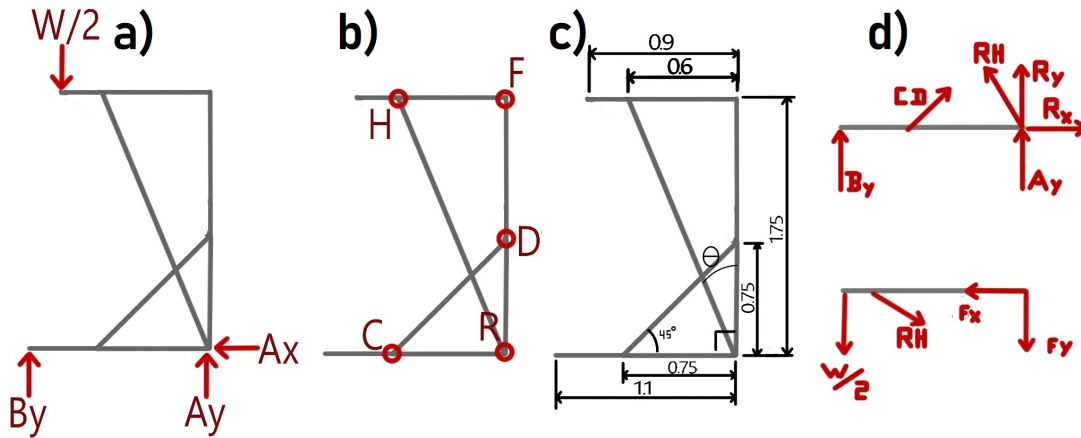
#### Cuarta configuración (última)

**Cambios:** El elemento GH de la configuración anterior (figura **3-36**) fue modificado. En esta nueva configuración, el mencionado elemento se extiende desde la unión "R" hasta "H" (figura **3-37**), buscando de esta manera reducir en gran medida el esfuerzo que en todas las versiones anteriores se inducía especialmente sobre el bastidor que va desde "R" hasta "F".

El esquema de la cuarta configuración se presenta en la figura **3-37**. Esta consiste de 2 elementos de tipo armadura: barras CD (unión "D", anteriormente "G", no cambia de posición) y RH, y 3 a modo de bastidores: una desde el apoyo "By" hasta los apoyos "Ax" y "Ay", pasando por "C", otra que se extiende desde "R" hasta "F", pasando por "D", y otra que va desde el extremo donde se aplica la carga (W/2) hasta "F", pasando por "H".

Las reacciones internas de esta configuración fueron determinadas mediante el análisis aislado de 2 de los bastidores, cómo se presenta en el diagrama "d" en la figura **3-37**. Cabe aclarar que, a fin de simplificar el modelo, el elemento RH fue tomado cómo un armadura superpuesta a la barra CD. Mediante el procedimiento 3-15 se pudo determinar:

- Compresión más alta: 4373 Newton (elemento "GH")
- Tensión más alta: No calculada (implícita en los bastidores).
- Reacción más alta: 2750 Newton (Ry)



**Figura 3-37.:** Cuarta configuración de la estructura de soporte. a) Fuerzas (Peso:  $W/2$ ) y reacciones en los apoyos ( $B_y$ ,  $A_y$  y  $A_x$  calculados en 3-11), b) Uniones, c) Medidas de los elementos (en metros), d) Desmembramiento usado en el análisis por equilibrio de fuerzas y momentos en 3-15. Imagen elaborada por el autor.

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{0,6}{1,75}\right) \approx 19^\circ$$

$$\sum M_R : -B_y * 1,1_m - CD * \sin(45^\circ) * 0,75_m = 0$$

$$CD = -4242,73 : N \rightarrow \text{”Compresión”}$$

$$\sum F_x : CD * \cos(45^\circ) - RH * \sin(\theta) + R_x = 0$$

$$R_x = 2228,8_N \rightarrow \text{”Dirección correcta”}$$

$$\sum F_y : B_y + CD * \sin(45^\circ) + RH * \cos(\theta) + R_y + A_y = 0$$

$$R_y = 2750_N \rightarrow \text{”Dirección correcta”}$$

(3-15)

$$\sum M_F : \frac{W}{2} * 0,9_m + RH * \sin(90^\circ - \theta) * 0,6_m = 0$$

$$RH = -2378,5_N \rightarrow \text{”Compresión”}$$

$$\sum F_x : RH * \cos(90^\circ - \theta) - F_x = 0$$

$$F_x = -771,2_N \rightarrow \text{”Dirección contraria”}$$

$$\sum F_y : -\frac{W}{2} - RH * \sin(90^\circ - \theta) - F_y = 0$$

$$F_y = -250_N \rightarrow \text{”Dirección contraria”}$$

### Verificación por elementos finitos

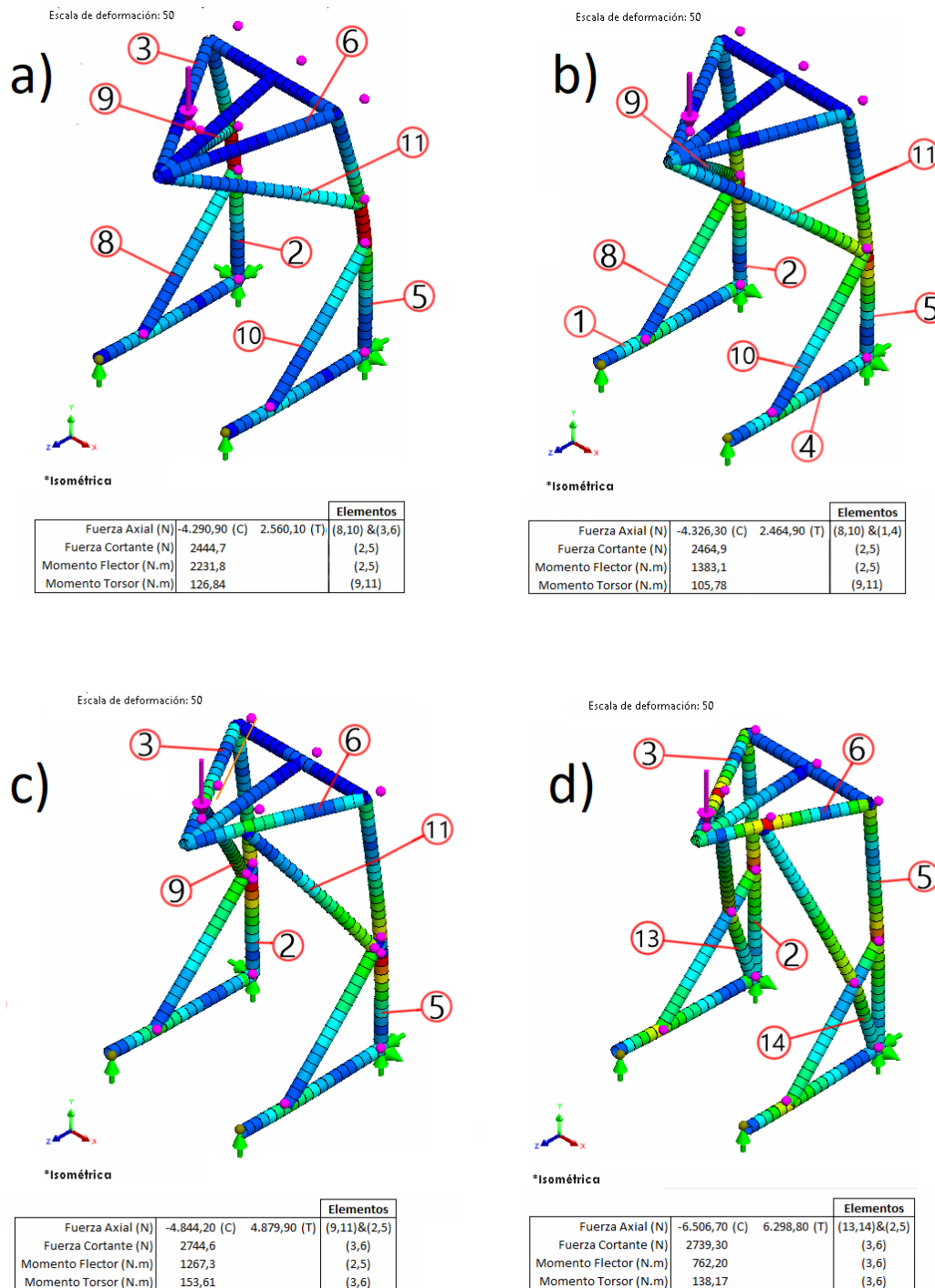
Las configuraciones fueron estudiadas adicionalmente mediante elementos finitos. Esto con el objetivo evitar extender aun más el análisis matemático, en cuanto a las gráficas de fuerza

cortantes y momento flector (por cada uno de los elemento constituyentes) que se tendrían que trazar para extraer todas las fuerzas cortantes y momentos flectores en la estructura de soporte.

La simulación de elementos finitos fue desarrollada con la intención de extraer las fuerzas internas y reacciones en los apoyos de la estructura de soporte. Para esto se elaboraron los modelos tridimensionales de las 4 configuraciones, y se aplicaron sobre estas, una simulación de carga estática teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Implementación de las mismas reacciones en los apoyos para las 4 configuraciones: Superficie rugosa en la unión de la base con los soportes verticales, y superficie lisa en el extremo de la base más lejano de los soportes verticales.
- Implementación de la carga completa: 500kg considerados cómo una fuerza vertical de 5000 Newton, aplicada en el extremo del soporte superior.
- Se ignoró el efecto de la gravedad.
- Implementación de una escala de deformación de 50 sobre la simulación de las 4 configuraciones.
- Implementación del mismo material y perfil de soldadura para las 4 configuraciones, seleccionados aleatoriamente. Esto debido al interés, en este punto, de determinar las fuerzas y reacciones en los apoyos; mas no el estrés que los elementos perciban.

Los resultados de las simulaciones desarrolladas se presentan en la figura **3-38**, sobre los cuales se pudo observar un mejor desempeño en la última configuración respecto de las demás. Esto justificado en la evidente menor deformación que dicha configuración demuestra. En vista del rendimiento superior de la cuarta configuración, esta será escogida cómo el diseño implementado definitivamente.



**Figura 3-38.:** Resultados obtenidos de la simulación de elementos finitos en carga estática para las 4 configuraciones propuestas, con una escala de deformación estática de 50. a) Primera configuración (diseño de la figura 3-34), b) segunda configuración (diseño de la figura 3-35), c) tercera configuración (diseño de la figura 3-36) y d) cuarta configuración (diseño de la figura 3-37). Imagen elaborada por el autor.

**Selección de material y perfil de soldadura** Para completar el diseño presentado anteriormente hace falta seleccionar el perfil de soldadura y el material mediante los cuales se constituirá la estructura de soporte. Los 2 aspectos mencionados deben ser escogidos de manera que se asegure con determinado factor de seguridad (F.S)<sup>12</sup>, el cumplimiento de las fuerzas que implica la configuración seleccionada.

Una investigación fue llevada a cabo en busca de justificar la selección del material y un perfil de soldadura adecuados. De dicha investigación se descubrieron criterios ampliamente usados en ingeniería civil (LRFD [?], ASD [?] y LSD [?]) para conformar mediante perfiles "T" o "C", las **estructuras predeterminadas** de edificios y puentes. En contraste con la teoría recolectada, la selección de material y perfil de soldadura para la estructura de soporte (figura **3-37**) implica la consideración de una geometría única (no predeterminada) que soporta cargas relativamente pequeñas.

La profundización sobre teoría de falla mecánica, le permitió al autor generar su propio método de selección de materiales y perfiles de soldadura. Este método se basa en un análisis de elementos finitos para determinar los 2 parámetros mencionados anteriormente, que compongan estructuras soldadas de **geometrías no convencionales** y cuyas cargas asociadas no sobrepasen el umbral de las 2 toneladas. Cabe aclarar que este método da por hecho la implementación de perfiles de soldadura **rectangulares**. Respecto de la metodología desarrollada, se presentan a continuación los pasos que la conforman:

### **Método propio para la selección de un perfil de soldadura:**

#### **1. Análisis FEA:**

Se determinan las fuerzas que actúan al interior de la estructura diseñada. Para esto, una simulación con carga estática deberá ejecutarse sobre el modelo CAD de dicha estructura, el cual deberá ser desarrollado con un material y un perfil de soldadura cualquiera.

En la mencionada simulación deberán incluirse la carga y las reacciones en los apoyos tal cómo serían aplicados en la realidad. Se recomienda utilizar un mallado tipo "vigas", el cual se fundamenta en un elemento finito simple, que permite identificar fácilmente las fuerzas al interior de las barras que componen la estructura; además de reducir los recursos computacionales necesarios.

Terminada la simulación, deberán identificarse para cada uno de los elementos de la estructura, los valores de momentos flectores más altos. Esto prestando especial atención a la orientación que el software CAD de preferencia ha definido para el elemento finito examinado.

---

<sup>12</sup>Factor of Safety: Factor utilizado en diseño, que incrementa teóricamente las exigencias de desempeño del producto por motivos de seguridad



## 2. Relación de momentos:

Con la intención de conocer para cada barra, la medida de impacto de los momentos flectores que se le han identificado, deberá establecerse por cada elemento, un coeficiente (**Coficiente de Proporción de Momentos Flectores - CPMF**) que indique la proporción de magnitud de los 2 momentos flectores resaltados (momento 1 en **y** y momento 2 en **z** cómo se muestra en la figura **3-31**). Este coeficiente debe ser mayor o igual a 1, lo que implica dividir el momento más grande, entre el más pequeño.

## 3. Perfiles candidatos:

Se realizará una lista compuesta por todos los perfiles comerciales de soldadura rectangular. Sobre los cuales se deberá calcular la razón entre el alto y el ancho de cada perfil (**Razón de Dimensiones - RD**) (debe ser mayor o igual a 1).

De la lista desarrollada sobre perfiles de soldadura, se escogerán candidatos cuya razón entre alto y ancho (RD) coincidan (con una diferencia menor al 50 %) con el coeficiente de proporción de momentos flectores (CPFM) calculado anteriormente. Esto sin importar el espesor de cada candidato, por lo que pueden repetirse valores de ancho y alto, siempre que tenga un espesor diferente.

Mientras se realiza el contraste entre los "RD" calculados con el CPMF requerido, pueden presentarse situaciones excepcionales. Para lo cual se presenta a continuación el procedimiento a seguir, por cada situación excepcional identificada:

- **Problema:** La "CPFM" tiene un valor de  $1 \pm 0,1$ . Esto sucede cuando los 2 momentos flectores determinados para una barra son muy parecidos, o incluso iguales.

**Solución:** Todos los perfiles de soldadura cuadrados deben considerarse cómo candidatos.

- **Problema:** Más de un coeficiente "RD" aplica para un mismo valor de "CPFM". Esto sucede cuando varias razones de dimensiones (RD) se encuentran dentro del 50 % de diferencia con el coeficiente de proporción de momentos flectores (CPFM).

**Solución:** Todos los perfiles de soldadura con los "RD" identificados deberán ser considerados cómo candidatos.

- **Problema:** Se determinó un "CPFM" demasiado grande (mayor a 3.5<sup>13</sup>). Esto sucederá cuando uno de los momentos flectores supere por mucho al otro; o, cuando sobre una barra se perciba el efecto de sólo 1 momento flector. Este problema implica que ningún "RD" se ajuste a la proporción de momentos flectores.

<sup>13</sup>Valor de "RD" más alto encontrado en perfiles comerciales de soldadura cuadrada

**Solución:** Serán seleccionados cómo candidatos todos los perfiles de soldadura con un "RD" mayor o igual a 2.0.

- **Problema:** Los perfiles de soldadura cuyo "RD" coincide con el "CPFM" solicitado, se consideran sobredimensionados. Esto sucede generalmente con valores de "RD" altos, de los cuales se encuentran únicamente perfiles con medidas de ancho y alto muy grandes. Casos puntuales dónde sucede esto, es con los valores de "RD" de 2.6 del cual se encuentran únicamente perfiles de 130 x 50mm, y de 3.0 con medidas de 150 x 50mm [11, 14, 75].

**Solución:** Se recomienda revisar perfiles con una "RD" de 2.0, del cual se conoce mayor variedad de perfiles de soldadura rectangular (50.8 x 25.4mm, 80 x 40mm, 100 x 50mm, 120 x 60mm [11, 14, 75]).

#### 4. Decisión de posicionamiento:

Se determinará la orientación en la que el perfil de soldadura deberá ser ubicado. Esta orientación busca coincidir el lado más grande del perfil de soldadura para contrarrestar el esfuerzo producido por el momento flector más alto, de manera que el lado más pequeño sea enfrentado con el momento flector restante, que es menor (menor en la misma medida que el lado más corto del perfil de soldadura lo es respecto del más alto).

Este modo de enfrentar los momentos flectores, se da con la intención de incrementar la inercia correspondiente con la disminución del esfuerzo flector ("I<sub>z</sub>" para el esfuerzo flector 1, según la ecuación 3-7, e "I<sub>y</sub>" para el esfuerzo flector 1, según la ecuación 3-8), aprovechando las dimensiones del perfil de soldadura que atribuyan más en el incremento de dicha inercia ("H" para "I<sub>z</sub>" en la ecuación 3-1, y "B" para "I<sub>y</sub>" en la ecuación 3-2).

#### 5. Factor de seguridad:

Se establecerá el factor de seguridad. Este valor expresará la garantía de que la estructura soportará la carga sin fallar. Cabe aclarar que, cómo criterio de fallo<sup>14</sup> se tomó el límite de fluencia del material seleccionado (este material será definido más adelante).

No se encontró algún criterio específico que condujera la selección de una cifra específica para el factor de seguridad. Sin embargo, a pesar de la relativa libertad que se tiene al seleccionar de este factor, para definir este valor se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- **Factor de seguridad bajo ( $F.S < 1$ ):** Muy seguramente los esfuerzos que sufrirá la estructura superarán el criterio de fallo seleccionado (límite de fluencia

<sup>14</sup>Criterio que, según el diseñador, implica la pérdida de funcionalidad de una pieza (i.e. Deformación elástica, deformación plástica, esfuerzo de rotura, etc.

del material en este caso). Implicando que no se cumplan las expectativas de desempeño del producto (en lo que a soportar esfuerzos mecánicos se refiere).

- **Factor de seguridad arriesgado ( $F.S = 1$ ):** No se tiene certeza de que la estructura soportará, o no, los esfuerzos que le serán provocados. Implicando un ambiente de incertidumbre en el desempeño del producto (en lo que a soportar esfuerzos mecánicos se refiere).
- **Factor de seguridad suficiente ( $F.S > 1$ ):** Se tiene mayor certeza de que la estructura soportará los esfuerzos que le sean provocados. Implicando mayor confianza en el cumplimiento de las expectativas de desempeño del producto (en lo que a soportar esfuerzos mecánicos se refiere).
- **Factor de seguridad excesivo ( $F.S \gg 1$ ):** Se puede tener completa certeza de que la estructura soportará los esfuerzos que le sean provocados. Implicando que se pueda confiar plenamente en el cumplimiento de las expectativas de desempeño del producto (en lo que a soportar esfuerzos mecánicos se refiere). Sin embargo, asimismo involucra en algunos casos, el sobredimensionamiento innecesario de piezas.

#### Notas:

- **El factor de seguridad puede ser cercano a 1 en la medida que se confíe en el desempeño del material (i.e. El material ha sido ampliamente estudiado, o ha sido antes aplicado exitosamente en proyectos similares al que se va a desarrollar).**
- **El factor de seguridad puede ser cercano a 1 en la medida de certeza que se tenga sobre la estabilidad de las condiciones ambientales en que se desenvolverá el producto (i.e. estabilidad del suelo, variabilidad de la carga, uso adecuado por parte del cliente, entre otras)**
- **Ejemplos de selección de F.S:**
  - **F.S en componentes de aeronave:** 1.5 a 2.5 [24], 1.2 a 3.0 [47].
  - **F.S en automóviles:** 3.0 [47].
  - **F.S en calderas:** 3.5 a 6 [24,47].
  - **F.S en estructuras de acero en edificios:** 4 a 6 [24,47].
  - **F.S en estructuras de acero en puentes:** 5 a 7 [24,47].
  - **F.S en materiales de confianza dónde las condiciones ambientales y de carga no son severas:** 1.3 a 1.5 [24,47].

#### 6. Selección de material y perfil de soldadura:

En esta etapa se concretará el perfil de soldadura que será elegido. Esta tarea que requiere de una simultánea selección del material y el espesor del perfil rectangular (medida "e" en la figura **3-30**).

De los proveedores consultados se pudo determinar una limitada diversidad respecto del material implementado en la elaboración de perfiles de soldadura rectangulares. Según la disponibilidad de opciones de material, 2 caminos a seguir fueron planteados:

- **Se dispone de 1 sola opción de material:**

De entre la lista desarrollada durante la etapa de "perfiles candidatos", la selección de una alternativa u otra dependerá del espesor del perfil de soldadura. Esto obviando la implementación del único material disponible.

Para llevar a cabo la selección final de un perfil de soldadura, se deberá conformar una tabla comparativa. Mediante los pasos que se presentan a continuación:

- a) Destinar las primeras 3 filas para visualizar las medidas de: altura, base y espesor ("H", "B" y "e" en la figura **3-30**, respectivamente), de todos los candidatos comerciales de perfiles de soldadura disponibles.
- b) Utilizando las medidas de cada candidato de perfil de soldadura, deberán calcularse el esfuerzo que sobre cada perfil sería producido al aplicar el momento flector más alto, determinado durante la etapa de "análisis FEA". Esto mediante las ecuaciones 3-7 y 3-8.
- c) Se determinará el factor de seguridad que cada candidato de perfil de soldadura brindaría, al enfrentarse al momento flector determinado durante la etapa de "análisis FEA". Para lo cual, el máximo estrés según el criterio de fallo (" $\sigma_{fail}$ ") se dividirá entre el respectivo esfuerzo flector calculado anteriormente (" $\sigma_{adm}$ "). Se deberá considerar la ecuación 3-10 para realizar dicho cálculo, y cuyos resultados deberán ser añadidos frente a cada candidato de perfil de soldadura.
- d) Se seleccionará aquel perfil que más se acerque al valor definido durante la etapa de "factor de seguridad". Cabe aclarar que dicha cercanía debe darse por encima del valor concretado; esto para no restarle seguridad a la estructura que será desarrollada.

- **Se dispone de 2 o más opciones de material:**

- Destinar las primeras 4 filas para visualizar las medidas de: altura, base, espesor ("H", "B" y "e" en la figura **3-30**, respectivamente) y material, de todos los candidatos comerciales de perfiles de soldadura disponibles.
- Utilizando las medidas de cada candidato de perfil de soldadura, deberán calcularse el esfuerzo que sobre cada perfil sería producido al aplicar el momento

flector más alto, determinado durante la etapa de "análisis FEA". Esto mediante las ecuaciones 3-7 y 3-8.

- Se determinará el factor de seguridad que cada candidato de perfil de soldadura brindaría, al enfrentarse al momento flector determinado durante la etapa de "análisis FEA". Para lo cual, el máximo estrés según el criterio de fallo (" $\sigma_{fail}$ ") se dividirá entre el respectivo esfuerzo flector calculado anteriormente (" $\sigma_{adm}$ "), teniendo en cuenta el material correspondiente con cada opción de perfil estructural. Se deberá considerar la ecuación 3-10 para realizar dicho cálculo, y cuyos resultados deberán ser añadidos frente a cada candidato de perfil de soldadura.
- Se seleccionará aquel perfil que más se acerque al valor definido durante la etapa de "factor de seguridad". Cabe aclarar que dicha cercanía debe darse por encima del valor concretado; esto para no restarle seguridad a la estructura que será desarrollada.

**Nota: El modo en que se enfrentaron los momentos flectores implica también, de manera implícita, el tratamiento de los esfuerzos axiales, cortantes y torsores. Cómo se presenta a continuación:**

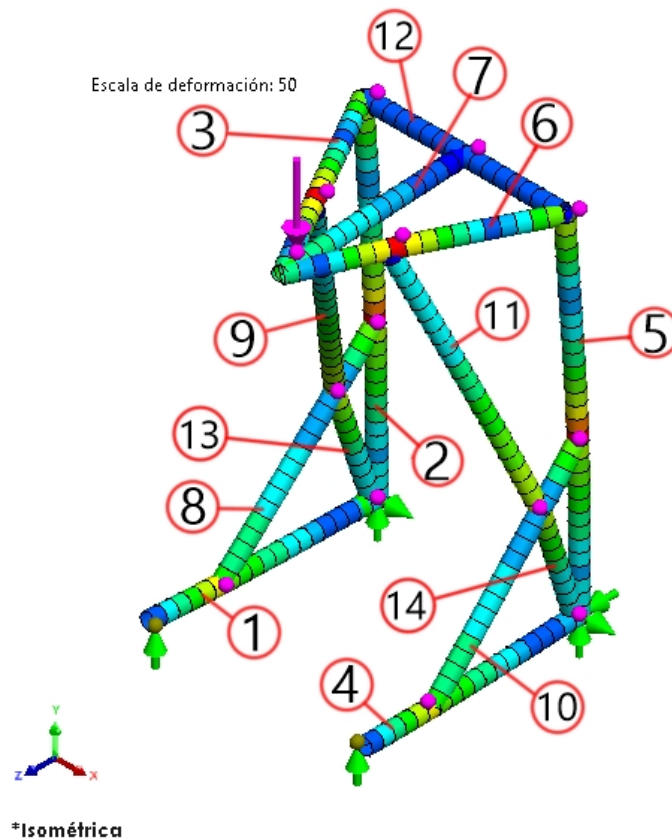
1. **Esfuerzos flectores:** Los esfuerzos flectores dependen inversamente de los momentos de inercia " $I_z$ " e " $I_y$ ", cómo se puede observar en las ecuaciones 3-7 y 3-8. Razón por la cual, el método explicado anteriormente se basa en ajustar adecuadamente los mencionados valores de inercia.
  - El ajuste de los valores de momento de inercia " $I_z$ " e " $I_y$ " implica las medidas de base (B), altura (H) y espesor (e) cómo se muestra en las ecuaciones 3-1 y 3-2.
  - El momento polar de inercia ( $J_p$ ) implica la suma de los momentos de inercia " $I_z$ " e " $I_y$ " cómo se demuestra en la ecuación 3-3.
2. **Esfuerzos axiales y cortantes en una unión:** El efecto de las fuerzas axiales y cortantes en una unión es inversamente proporcional al área transversal (A) del elemento que percibe estos tipos de esfuerzos (ecuaciones 3-4 y 3-5). Dicho elemento corresponde en este caso con el perfil de soldadura rectangular que se muestra en la figura **3-30**, cuyas medidas han sido ajustadas previamente, enfrentándose de esta manera el par de esfuerzos mencionados.
3. **Esfuerzo cortante transversal:** El esfuerzo cortante transversal depende inversamente del momento de inercia (I) cómo se puede observar en la ecuación 3-6, valor que fue ajustado cuando se lidió con los esfuerzos flectores.
4. **Esfuerzo cortante por torsión:** El esfuerzo cortante por torsión depende inversamente del momento polar de inercia (J) cómo se puede observar en la ecuación 3-9.

Valor que fue implícitamente ajustado mediante el incremento de los valores de inercia asociados con los esfuerzos flectores.

El método propio para la selección de un perfil de soldadura fue aplicado sobre el diseño de la figura 3-37 para concretar las referencias comerciales que serían apropiadas para conformar esta estructura. Los resultados de dicho método se presentarán a continuación:

### Análisis FEA:

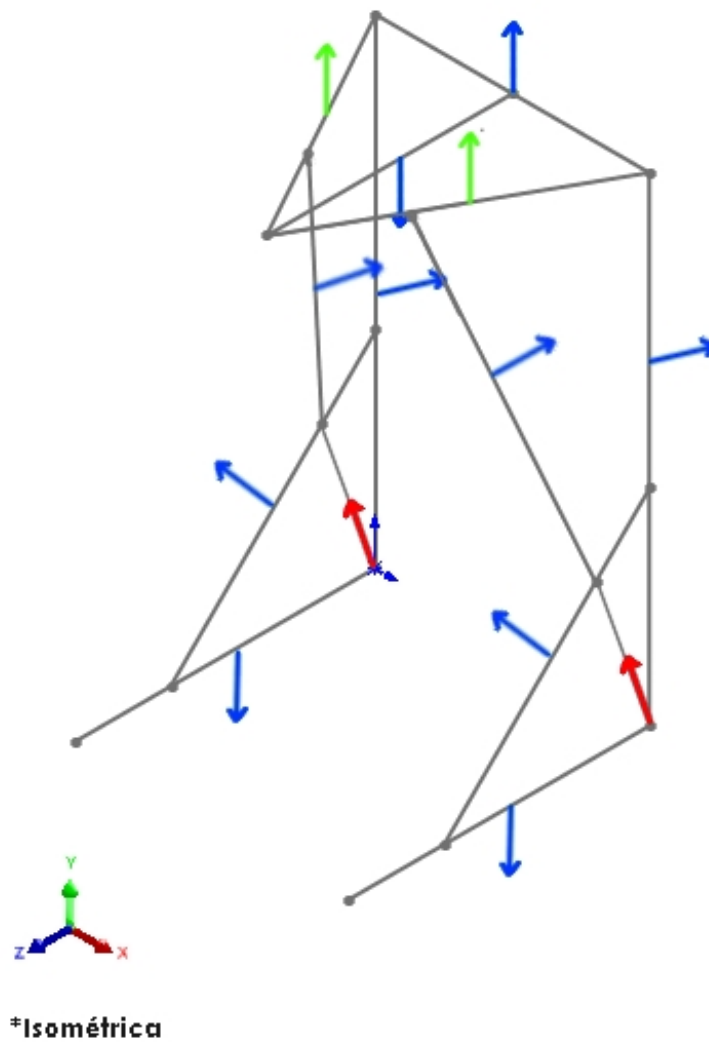
Se realizó el estudio de elementos finitos con carga estática presentado en la figura 3-39. Del cual se extrajeron, por cada barra enumerada, las fuerzas internas más altas. Dichas fuerzas se presentan en la tabla 3-7, la cual obedece a las orientaciones locales presentadas en las figuras 3-31 y 3-40 (rojo: eje "x", verde: eje "y", azul: eje "z").



**Figura 3-39.:** Enumeración de los elementos constituyentes. Vista obtenida de la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Imagen elaborada por el autor.

Número de viga	Axial (N)	Cortante1 (N)	Cortante2 (N)	Momento 1 (N.m)	Momento 2 (N.m)	Torsión (N.m)
(Bar#1)	3274,9	57,616	2045,5	-715,91	28,114	-15,173
(Bar#4)	3274,9	-57,623	2045,5	-715,91	-28,114	15,174
(Bar#2)	6298,8	273,42	-1177,5	747,84	189,26	91,342
(Bar#5)	6298,8	-273,42	-1177,5	747,84	-189,26	-91,342
(Bar#3)	1506,3	-2739,3	-171,97	59,585	762,2	138,17
(Bar#6)	1506,3	2739,3	171,97	-59,584	-762,2	-138,17
(Bar#8)	-4292,8	-412,55	1634,2	-397	-74,688	30,609
(Bar#10)	-4292,8	412,56	1634,2	-397	74,685	-30,609
(Bar#9)	-4874,9	294,76	-231,92	339,64	232,29	106,31
(Bar#11)	-4874,9	-294,76	-231,92	339,64	-232,29	-106,31
(Bar#13)	-6506,7	436,6	-758,3	261,76	221	9,4196
(Bar#14)	-6506,7	-436,6	-758,3	261,76	-221	-9,4196
(Bar#7)	-111,42	-0,0000141	478,54	-423,37	-0,0000167	0,0000195
(Bar#12)	-608,42	55,711	-239,27	134,02	29,129	-3,6554

**Tabla 3-7:** Fuerzas y momentos críticos por barra, extraídos mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks".  
Tabla elaborada por el autor.



**Figura 3-40.:** Orientación local de las vigas. Eje 'x' en rojo, eje 'y' en verde y 'z' en azul. Imagen elaborada por el autor.

### Relación de momentos

Para las barras que constituyen la estructura (enumeración en la figura **3-39**) se determinaron los coeficiente de proporción de momentos flectores (CPMF). Presentados como una escala (mayor:menor) sobre la tabla **3-8**.



Número de viga	CPFM
(Bar#1)	25,46 : 1
(Bar#4)	25,46 : 1
(Bar#2)	3,95 : 1
(Bar#5)	3,95 : 1
(Bar#3)	12,79 : 1
(Bar#6)	12,79 : 1
(Bar#8)	5,31 : 1
(Bar#10)	5,31 : 1
(Bar#9)	1,46 : 1
(Bar#11)	1,46 : 1
(Bar#13)	1,18 : 1
(Bar#14)	1,18 : 1
(Bar#7)	2,53E7 : 1
(Bar#12)	4,60 : 1

**Tabla 3-8.:** Relaciones de momentos flectores (mayor/menor). Tabla elaborada por el autor.

### Perfiles candidatos

De los proveedores de perfil de soldadura ?? se identificaron los candidatos más apropiados para ser componer las barras de la estructura (figura **3-39**). Esto mediante la comparación del coeficiente de proporción de momentos (CPFM) de cada uno de los elementos de la estructura y la razón de dimensiones (RD) de los perfiles rectangulares comerciales disponibles. El resultado del mencionado procedimiento se presenta en la tabla **3-9**.

Nombre de viga	CPFM		Candidatos	RD
(Bar#1)	25,46 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#4)	25,46 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#2)	3,95 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#5)	3,95 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#3)	12,79 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#6)	12,79 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#8)	5,31 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#10)	5,31 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#9)	1,46 : 1	→	110X70, 50X30, 90X50	1,57:1, 1,6:1, 1,8:1
(Bar#11)	1,46 : 1	→	110X70, 50X30, 90X50	1,57:1, 1,6:1, 1,8:2
(Bar#13)	1,18 : 1	→	Cuadrado - Catálogo	1:1
(Bar#14)	1,18 : 1	→	Cuadrado - Catálogo	1:1
(Bar#7)	2,53E7 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1
(Bar#12)	4,60 : 1	→	80X40, 100X50, 120X60	2 : 1

**Tabla 3-9.:** Perfiles comerciales candidatos a ser aplicados para cada barra. Tabla elaborada por el autor.

### Decisión de posicionamiento

Se determinó sobre la tabla **3-10**, la disposición más apropiada para los perfil de soldadura de cada barra. Esta decisión fue respaldada en la orientación local expresada en las imágenes **3-31** y **3-40**, junto con las fuerzas y momentos expuestos en la tabla **3-7**.

Nombre de viga	Momento 1 'y' (N.m)	Momento 2 'z' (N.m)	Orientación local
(Bar#1)	<b>-715,91</b>	28,114	Largo en Z
(Bar#4)	<b>-715,91</b>	-28,114	Largo en Z
(Bar#2)	<b>747,84</b>	189,26	Largo en Z
(Bar#5)	<b>747,84</b>	-189,26	Largo en Z
(Bar#3)	59,585	<b>762,2</b>	Largo en Y
(Bar#6)	-59,584	<b>-762,2</b>	Largo en Y
(Bar#8)	<b>-397</b>	-74,688	Largo en Z
(Bar#10)	<b>-397</b>	74,685	Largo en Z
(Bar#9)	<b>339,64</b>	232,29	Largo en Z
(Bar#11)	<b>339,64</b>	-232,29	Largo en Z
(Bar#13)	<b>261,76</b>	221	-
(Bar#14)	<b>261,76</b>	-221	-
(Bar#7)	<b>-423,37</b>	-0,0000167	Largo en Z
(Bar#12)	<b>134,02</b>	29,129	Largo en Z

**Tabla 3-10.:** Disposiciones concretadas del perfil de soldadura según las orientaciones locales vistas en **3-40**. Valores de "momento 1" y "momento 2" extraídos mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Tabla elaborada por el autor.

### Factor de seguridad

Los ejemplos expresados en engineeringtoolbox.com [24] y en el documento de A.Kumar [47], sobre valores típicos de factor de seguridad fueron consultados. Esto con la intención de guiar la selección de un factor de seguridad suficiente para asegurar el desempeño de la estructura de soporte, sin sobredimensionarla innecesariamente.

Un factor de seguridad de 2.0 fue escogido. Esto considerando las siguientes recomendaciones:

- Factor de seguridad de 1.3 a 1.5, considerando:
  - Que la estructura será compuesta por perfiles de soldadura manufacturados mediante estrictas normativas y cuyo material ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones similares [24, 47].
  - Que la estructura de soporte será instalada en un ambiente de condiciones ambientales y de carga estables [24, 47].
- Factor de seguridad de 4 a 7, considerando:
  - La similitud entre la forma en que se asocia la carga a la estructura de soporte cómo sucede en los edificios y puentes [24, 47].

- Las consecuencias letales para el levantador que se darían en caso de que la estructura fallase.

### Selección de material y perfil de soldadura

Este procedimiento se llevó a cabo para 1 sola opción de material. Esto debido a la disponibilidad del acero 1020 como único material utilizado para el mecanizado de perfiles estructurales rectangulares. Esto según los catálogos sobre perfiles estructurales consultados, quienes coinciden en optar por la normativa de manufactura para acero al carbono laminado en frío (NTC 4526 - ASTM A500) [11, 14, 75].

Respecto de la decisión final sobre el perfil de soldadura a implementar, 3 grupos fueron organizados. Cada uno de ellos caracterizado por reunir los elementos de la estructura de soporte (figura **3-39**) cuyo coeficiente de proporción de momentos flectores (CPMF) haya coincidido con una razón de dimensiones (RD) específica. Esto con la intención de seleccionar los 3 perfiles de soldadura que más se ajusten a los momentos flectores que se presentan sobre las barras de cada uno de estos grupos. Respecto de los grupos conformados, el primero de ellos corresponde con una "RD" de 2:1 (barras 1, 4, 2, 5, 3, 6, 8, 10, 7 y 12), el segundo con 1.57:1, 1.6:1 o 1.8:1, (barras 9 y 11), y el tercero con una "RD" de 1:1 (barras 13 y 14).

#### Grupo 1:

Parámetros de análisis:

- Barras asociadas: 1,4,2,5,3,6,8,10,7 y 12 (enumeración en la figura **3-39**).
- Orientación local: Lado más grande paralelo al eje "z" (orientación local según figuras **3-31** y **3-40**). Exceptuando las barras 3 y 6, cuyo lado más grande se ubica paralelo al eje "y".
- Fuerza axial más alta en el grupo: 6298.8 N (tabla **3-7**).
- Momento flector más alto en el grupo: 762.2 N\*m (tabla **3-7**).
- Perfiles (mm):
  - 80 X 40 (AISI 1020 CR).
  - 100 X 50 (AISI 1020 CR).
  - 120 X 60 (AISI 1020 CR).
- Espesores "e" disponibles (mm): 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0.
- Criterio de fallo: Límite de fluencia del acero 1020 laminado en frío,  $S_y=350\text{Mpa}$ .
- Perfil de soldadura seleccionado: Perfil de soldadura rectangular 80X40X2.0 (AISI 1020 CR).

**Resultados:**

H	B	e	F.S Momento Flector
80	40	1,5	1,71638247
80	40	2	2,237085629
80	40	2,5	2,733358548
80	40	3	3,205953162
100	50	1,5	2,718587805
100	50	2	3,559597656
100	50	2,5	4,36930787
100	50	3	5,148480714
120	60	2	5,188232893
120	60	2,5	6,387901479
120	60	3	7,550163999

**Tabla 3-11.:** Factores de seguridad obtenidos con la implementación de los diferentes perfiles comerciales candidatos. Selección final trazada en verde. Tabla elaborada por el autor.

**Grupo 2:**

Parámetros de análisis:

- Barras asociadas: 9 y 11 (enumeración en la figura **3-39**).
- Disposición local: Lado más grande paralelo al eje "z" (orientación local según figuras **3-31** y **3-40**).
- Fuerza axial más alta en el grupo: 4874,9 N (tabla **3-7**).
- Momento flector más alto en el grupo: 339.64 N\*m (tabla **3-7**).
- Perfiles (mm):
  - 50 X 30 (AISI 1020 CR).
  - 90 X 50 (AISI 1020 CR).
- Espesores "e" disponibles (mm): 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5.
- Criterio de fallo: Límite de fluencia del acero 1020 laminado en frío,  $S_y=350\text{Mpa}$ .
- Perfil de soldadura seleccionado: Perfil de soldadura rectangular 50X30X2.0 (AISI 1020 CR).

**Resultados:**

<b>H</b>	<b>B</b>	<b>e</b>	<b>F.S Momento Flector</b>
50	30	1,5	1,626097486
<b>50</b>	<b>30</b>	<b>2</b>	<b>2,094091783</b>
50	30	2,5	2,527952391
50	30	3	2,929348722
50	30	3,5	3,299908972
90	50	1,5	5,248273908
90	50	2	6,86183628
90	50	2,5	8,410406362
90	50	3	9,895713108
90	50	3,5	11,31946257

**Tabla 3-12.:** Factores de seguridad obtenidos con la implementación de los diferentes perfiles comerciales candidatos. Selección final trazada en verde. Tabla elaborada por el autor.

**Grupo 3:**

Parámetros de análisis:

- Barras asociadas: 13 y 14 (enumeración en la figura **3-39**).
- Disposición local: Lado más grande paralelo al eje "z" (orientación local según figuras **3-31** y **3-40**).
- Fuerza axial más alta en el grupo: 6506,7 N (tabla **3-7**).
- Momento flector más alto en el grupo: 261,76 N (tabla **3-7**).
- Perfiles (mm):
  - 25 X 25 (AISI 1020 CR).
  - 40 X 40 (AISI 1020 CR).
  - 50 X 50 (AISI 1020 CR).
  - 60 X 60 (AISI 1020 CR).
  - 70 X 70 (AISI 1020 CR).
- Espesores "e" disponibles (mm): 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 milímetros (con excepciones para algunas medidas de base y altura).

- Criterio de fallo: Límite de fluencia del acero 1020 laminado en frío,  $S_y=350\text{Mpa}$ .
- Perfil de soldadura seleccionado: Perfil de soldadura rectangular 40X40X2.0 (AISI 1020 CR).

### Resultados:

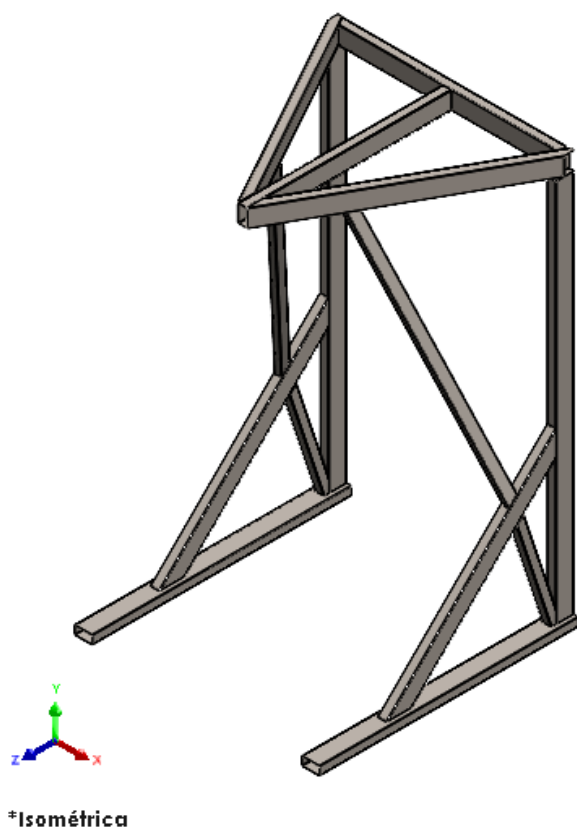
H	B	e	F.S Momento Flector
25	25	1,5	0,698967433
25	25	2	0,876761175
25	25	2,5	1,030890805
25	25	3	1,163555556
25	25	3,5	1,276847382
40	40	2	2,459565773
40	40	2,5	2,95962045
40	40	3	3,418601533
40	40	3,5	3,838822238
50	50	2	3,961624521
50	50	2,5	4,8038394
50	50	3	5,591739464
50	50	3,5	6,327711686
60	60	2	5,821234568
60	60	2,5	7,094940666
60	60	3	8,301034483
60	60	3,5	9,44195216
70	70	2	8,038416347
70	70	2,5	9,832974138
70	70	3	11,54659004
70	70	3,5	13,18173531

**Tabla 3-13.:** Factores de seguridad obtenidos con la implementación de los diferentes perfiles comerciales candidatos. Selección final trazada en verde. Tabla elaborada por el autor.

**Computación y verificación** Se desarrolló el modelo CAD de la figura **3-41**. Esto basado la configuración de la estructura de soporte de la figura **3-37**, y cuyas barras corresponden con el material y los perfiles de soldadura seleccionados anteriormente. Los cuales fueron ubicados en la orientación local estipulada sobre la tabla **3-10**.

Cabe aclarar la excepción decidida sobre las barras "1" y "4", respecto de la orientación local definida anteriormente (tabla **3-10**). Dicha excepción fue tomada para aportar estabilidad

a la estructura, y consiste en haber ubicado estas barras con su lado más grande de manera perpendicular al eje "z" y no paralelo a este, cómo fue indicado inicialmente. Esto debido a que el "Método propio para la selección de un perfil de soldadura" supone unas reacciones en los apoyos teóricos (superficie lisa y superficie rugosa) que en realidad no existen.



**Figura 3-41.:** Modelo virtual de la estructura de soporte, desarrollado por el autor mediante la herramienta CAD de Solidworks. Imagen elaborada por el autor.

**Validación del modelo** Se verificó que el factor de seguridad establecido para la estructura de soporte cumpliera con la condición de no ser menor a 2.0. Para determinar el cumplimiento de esto, se desarrolló una nueva simulación de carga estática sobre el modelo CAD de la figura 3-41. Adicionalmente, sobre este ejercicio se tuvo en cuenta el efecto de la gravedad ( $9.806 \frac{m}{s^2}$ ), y las reacciones en los apoyos de las bases fueron establecidas con la intención de aproximar aún más los resultados de la simulación con el comportamiento que tendría la estructura en la realidad: superficie rugosa sobre todas las uniones que se encuentren en contacto con el suelo (barras "1" y "4"), además de una restricción rotacional sobre las uniones traseras.

De los resultados de la simulación de elementos finitos se pudo encontrar el esfuerzo más grande que la estructura sufriría (1.058 MPa), cuya magnitud es favorablemente menor que el esfuerzo correspondiente con el criterio de fallo seleccionado (límite de fluencia  $S_y=350$



MPa para acero 1020 laminado en frío). La información anterior, junto con la deformación de la estructura se presenta con una escala de 50 sobre la figura 3-42.

En busca de observar con mayor precisión el factor de seguridad obtenido, se configuró el esquema de la simulación de carga estática para que representara el cálculo de dicho factor sobre cada elemento finito (figura 3-43). En conclusión se consiguió asegurar un factor de seguridad uniforme de 3.3, exceptuando las barras "1" y "4" dónde los esfuerzos fueron muy leves.

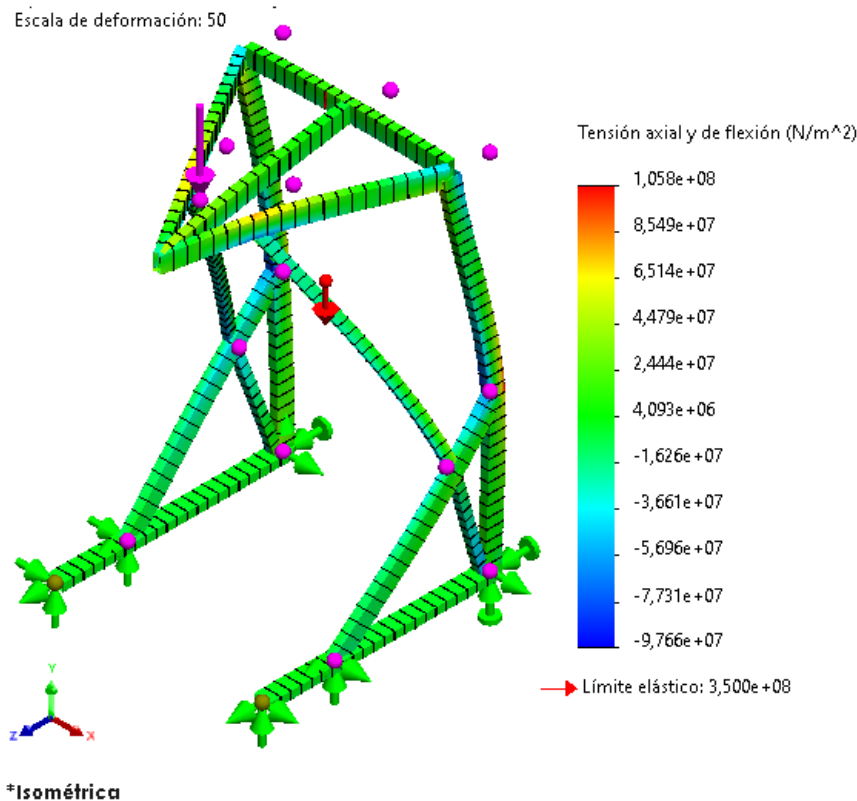
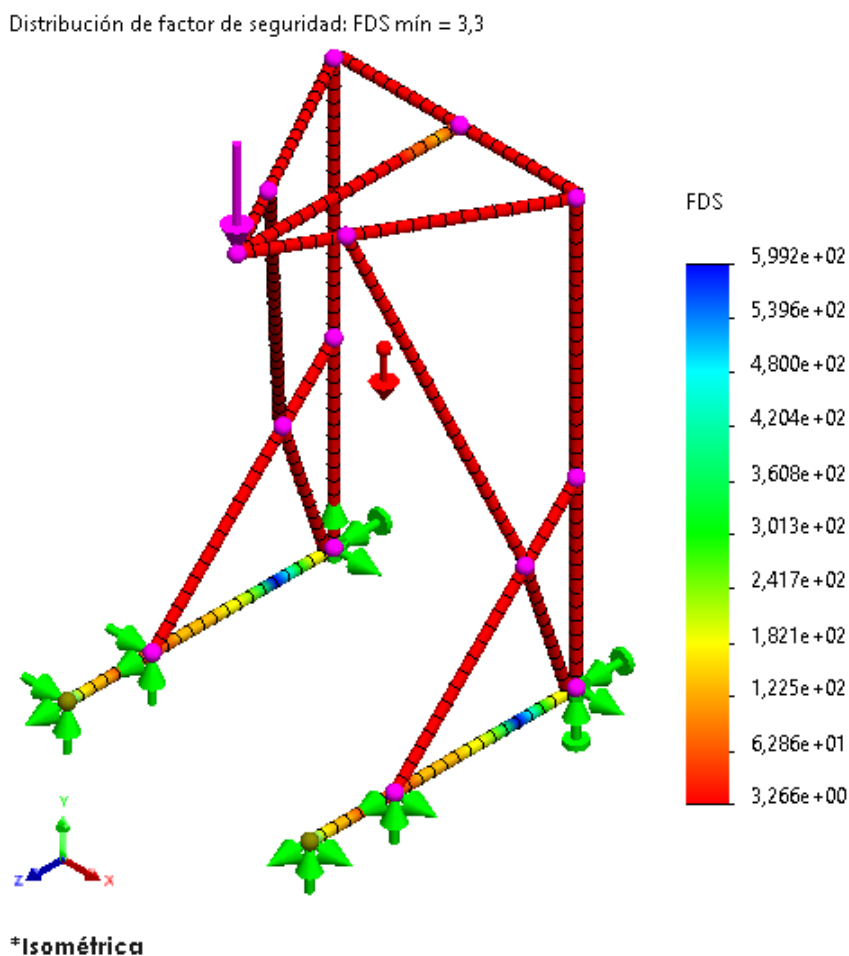


Figura 3-42.: Estudio de deformación estática resultante del modelo final



**Figura 3-43.:** Análisis del factor de seguridad sobre la totalidad de la estructura. Tabla elaborada por el autor.

Se consideró irrelevante analizar la vida útil y los efectos de la fatiga sobre el desempeño de la estructura. Esto considerando la poca frecuencia con que se presentarían cargas cíclicas, las cuales corresponderían con la de por sí inusual activación del accionamiento automático (elemento "5" en la figura 3-25), la cual sucede cuando se falla en el levantamiento de la carga.

Por otro lado también se consideró irrelevante la validación del desempeño de la estructura frente a condiciones ambientales y de carga diferentes. Esto debido a que los cálculos y simulaciones llevadas a cabo abarcan las situaciones más críticas a las que este elemento se enfrentaría, presentadas a continuación:

- Peso máximo registrado levantado por una persona: 500 kg [?].
- Aplicación de la carga en el punto más crítico posible: extremo del soporte superior dónde sería producido el momento flector más alto.

- Estabilidad de las condiciones ambientales y de la carga asociada con la estructura diseñada: suelo firme de gimnasios comerciales o caseros.

## PDS

En contraste con las restricciones planteadas en el "PDS Preliminar", se presenta a continuación la versión final del documento de las especificaciones de diseño del conjunto mecánico diseñado:

- Identificación del producto:
  - Nombre: Soporte Mecánico
  - Funciones básicas:
    - Aportar una barrera confiable entre la persona y la carga cuando esta última represente una amenaza para la integridad del levantador.
    - Facilitar la liberación de la persona en caso de que esta se encuentre atrapada por el peso cargado.
  - Características especiales:
    - No interferente con la ejecución normal de la prensa de banco en modalidad de peso libre.
    - Adaptable cómo complemento a los equipos de prensa de banco ya existentes.
  - Potencia de actuador: No se contemplan actuadores ajenos al cuerpo humano.
  - Acometida energética: No requiere.
  - Ambiente de trabajo: Uso exclusivo en interiores.
  - Entrenamiento de usuario requerido:
    - Conocimiento básico de la ejecución de la prensa de banco.
    - Conocimiento general del funcionamiento y uso del equipo "soporte mecánico".
- Descripción física:
  - Dimensiones externas generales: 1080x1290x1810mm
  - Restricciones de uso: 500Kgf cómo peso máximo de aseguramiento y liberación del levantador.
- Ciclo de vida:
  - Vida útil: Según los elementos comerciales seleccionados.
  - Calendario de mantenimiento: Según los elementos comerciales seleccionados.
- Requerimientos sociales, políticos y legales:

- Estándares: Norma ASTM A-500 - NTC - 4526 sobre torsión y aplastamiento de los perfiles de soldadura, adoptada por los proveedores identificados [11, 14, 75].
  - Responsabilidades para con el producto: Restricción de su uso para fines deportivos, exclusivamente en el contexto de levantamiento de pesas.
- Especificaciones de manufactura:
- Requerimientos de manufactura: Capacidad de soldadura y mecanizado confiables
  - Proveedores: Perfiles de soldadura rectangular [11, 14, 75], sistemas corredizos Ducasse S.A [21], conjunto de amarre trinquete (correa y trinquete), Seguro para barra Shermworks Inc [72] y suministro de láminas y barras sólidas para mecanizado, según la indicación de los planos.

### Revisión del diseño

Según G.Dieter y L.Schmidt [20], a esta altura del proyecto se debe hacer una identificación de estrategias para minimizar tiempo de ciclo y los recursos de material, equipo y dinero necesarios para conformar el proyecto. Sin embargo, dichos factores serán desatendidos, dado que no comprometen directamente el diseño del producto que se presenta.

### Materialización del diseño

Se tomaron decisiones puntuales sobre los elementos comerciales que completarían el diseño mecánico, así como los materiales y dimensiones de aquellos componentes faltantes que tendrían que ser manufacturados. Esto prestando especial cuidado con asegurar la compatibilidad espacial y funcional de todas las partes que constituyan el proyecto.

### Arquitectura del producto

El diseño global fue organizado en subsistemas (subconjuntos), según las tareas que se cumplan dentro del proyecto. Dichas tareas son en algunos casos cooperativas, donde su desarrollo implica la interacción entre varios subsistemas. La organización del proyecto se sintetiza en la figura 3-44, la cual se desglosa y describe a continuación:



**Figura 3-44.:** Esquema de organización del soporte mecánico. Imagen elaborada por el autor.

El "Ensamblaje General" abarca todos los subsistemas. La "Estructura de Soporte" tiene acoplados los sistemas de "Corredera de ajuste" y "Accionamiento manual". La "Corredera de ajuste" junto con la "Estructura de soporte" son intermediarios entre el "Accionamiento automático" y el "Accionamiento manual".

#### Conjuntos:

- **Accionamiento Automático (subconjunto):** Este subconjunto garantiza un efectivo aseguramiento de la carga, sin restringir el desplazamiento libre de la barra.

#### Funciones:

- Asegurar y soportar la carga cuando esta representa una amenaza para la integridad física del levantador.
- Posee poleas encargadas de facilitar el levantamiento de la carga cuando esta ya ha sido asegurada.

#### Interacciones:

- Actúa en conjunto con la "corredera de ajuste", junto con la cual se consigue una ventaja mecánica de 4:1 para facilitar el levantamiento de la carga.
- Se mantiene en constante contacto con la barra.

#### Componentes:

- Elemento "5" en la figura 3-25.
- Elementos 4.F y 4.E de la figura 3-28.

- **Corredera de Ajuste (subconjunto):** Subconjunto que le permite al usuario ajustar la posición preferida desde la cual se asegure la carga a la estructura de soporte.

#### Funciones:

- Vincular el aseguramiento dado en el subconjunto de "accionamiento automático" con la estructura de soporte.
- Posee poleas encargadas de facilitar el levantamiento de la carga cuando esta ya ha sido asegurada.

**Interacciones:**

- Actúa en conjunto con el "accionamiento automático", junto con el cual se consigue una ventaja mecánica de 4:1 para facilitar el levantamiento de la carga.
- Une el sistema "accionamiento automático" con la "estructura de soporte", en la posición indicada por el usuario.

**Componentes:**

- Elementos "4.A", "4.B", "4.C" y "4.D" de la figura **3-28**.
- **Accionamiento Manual (subconjunto):** Subconjunto que permite liberar al levantador de la carga, cuando esta supera las capacidades conjuntas de fuerza entre el levantador y el observador.

**Funciones:**

- Facilitar la elevación suficiente de la carga para liberar al levantador, cuando este se encuentre atrapado por la barra.

**Interacciones:**

- Actúa en conjunto con los subsistemas de "corredera de ajuste" y "accionamiento automático", los cuales le disminuyen a este subconjunto una importante cantidad de esfuerzo necesario para liberar al levantador de la carga.
- Está acoplado a la "estructura de soporte" en una ubicación específica, cercana a los pies del levantador.

**Componentes:**

- Elemento "2" en la figura **3-25**.
- **Estructura de soporte (subconjunto):** subconjunto basado en la estructura diseñada y modelada anteriormente (figura **3-41**), sobre la cual se acoplan directamente los subsistemas de "accionamiento manual" y "corredera de ajuste".

**Funciones:**

- Mantener el subconjunto "corredera de ajuste" en la posición que le corresponde.
- Mantener el subconjunto "accionamiento manual" en la posición que le corresponde.
- Soportar los esfuerzos producidos por la carga cuando esta sea asegurada mediante el subconjunto "accionamiento automático".

- Direccionar la tensión proveniente de las poleas en los subsistemas de "accionamiento automático" y "corredera de Ajuste" hacia el "accionamiento manual".

**Interacciones:**

- Tiene acoplados los subconjuntos de "corredera de ajuste" y "accionamiento manual".
- Comunica las funciones de la "corredera de ajuste" y el "accionamiento automático" con el "accionamiento manual".

**Componentes:**

- Elementos "1" y "3" en la figura **3-25**.
- **Ensamblaje general o soporte mecánico (conjunto general):** Es el medio a través del cual, el observador es asistido en el aseguramiento de la carga.

**Funciones:**

- Frenar la carga cuando esta representa un riesgo para la integridad del levantador.
- Soportar el peso de la carga, cuando el levantador y su respectivo observador son incapaces de hacerlo por su propia cuenta.
- Apoyar la liberación del levantador cuando este se encuentre atrapado por la carga.

**Interacciones:**

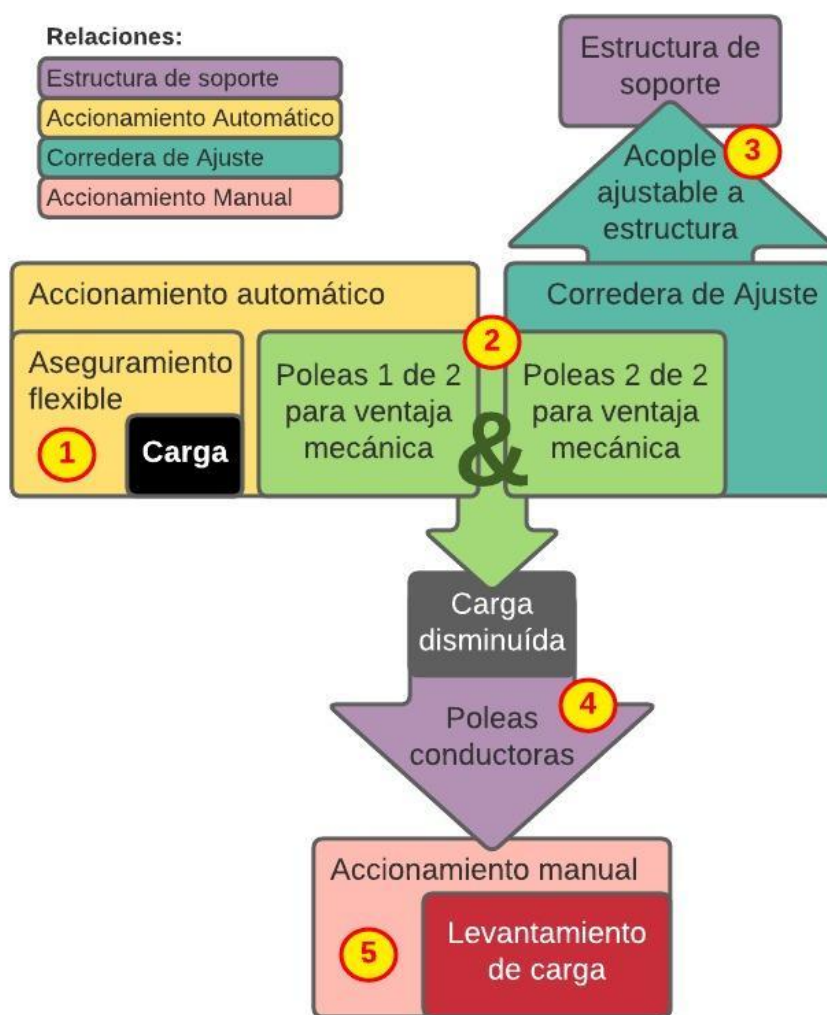
- Mantiene un contacto directo con la carga implicada en el ejercicio de la prensa de banco.
- Mantiene una relación directa con el levantador, quien controlada su activación.

**Componentes:**

- Todos los elementos expuestos en la figura **3-25**.

## Diseño de piezas y componentes

De la propuesta conceptual final (figura **3-25**) se determinaron 5 relaciones entre subconjuntos. Estas se presentan en el esquema de la figura **3-45**, mediante el cual se explicará con mayor detalle las características de pieza más importantes. Además, por cada relación se indicarán los elementos comerciales contemplados.



**Figura 3-45.:** Esquema de relaciones entre subsistemas, cada uno destacado con un color indicativo. Se resaltan en círculos rojos con fondo amarillo, 5 relaciones esenciales entre subconjuntos. Imagen elaborada por el autor.

- **Relación No.1:** Se da entre el "aseguramiento flexible" del subconjunto "accionamiento automático" y la **carga** implicada en el ejercicio. Consiste en el aseguramiento de la carga mediante de un par de abrazaderas que, estando en todo momento acopladas a la barra, se aprietan contra un par de cuerdas en el momento en que de la carga se pierde el agarre manual.

Se detecta el momento en que se suelta la carga mediante un interruptor mecánico. Este interruptor se basa en una varilla paralela a la barra, contra la cual se mantiene apretada con las manos durante la ejecución del ejercicio. No obstante, cuando dicha varilla es soltada, se activan las abrazaderas de cuerda que detienen la carga.

Para esta tarea se considera la implementación del producto comercial "Barbell Free



Spotter”, de la empresa Shermworks Inc [72] (figura 3-9).

- **Relación No.2:** Acción cooperativa entre las poleas del ”accionamiento automático” y la ”corredera de ajuste” para obtener una ventaja mecánica de 4 a 1. Dichas poleas se organizaron en la configuración que se muestra en la figura 3-46, conocida como ”polipasto”.

Debido a que la tensión mecánica debe comunicarse hacia un amarre con trinquete (elemento comercial elegido para la Relación No.5), el conjunto de poleas debe ser compatible con las correas que el mencionado elemento comercial utiliza. A causa de que no se encontró un polipasto comercial con estas características, este conjunto de poleas tuvo que ser diseñado.

- **Relación No.3:** En esta relación se une el polipasto de la relación No.2 con la estructura de soporte, en una posición que puede ser modificada por el usuario.

Para esta tarea se consideró la implementación de la corredera industrial ”D-1000 ART”, de la empresa Ducasse Industrial S.A [21], cuyo riel debe ser modificado con agujeros laterales que permitan asegurar el carro mediante un pasador.

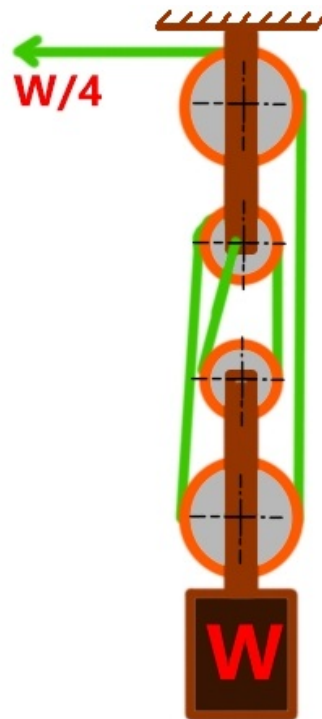
- **Relación No.4:** Se transmite la tensión proveniente del conjunto de poleas en la relación No.2 hacia el amarre con trinquete del ”accionamiento manual” en la relación No.5. Para lograr esto se contempló el ”acople de poleas” diseñado anteriormente (figura 3-27).

Los rodillos debieron ser diseñados para que fuesen compatibles con las correas propias del mencionado amarre con trinquete. Además, los ”acoples de poleas” han de ser ubicados estratégicamente sobre la ”estructura de soporte” para que las correas no se desajustaran durante la operación del equipo, como se muestra en la figura 3-47.

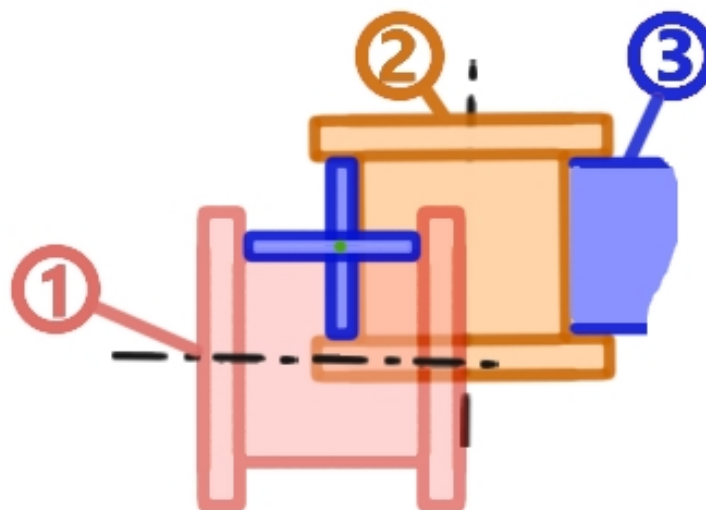
- **Relación No.5:** La potencia proveniente del pie del usuario se transmite hacia el sistema para lograr el ”levantamiento de carga” mediante el subsistema del ”accionamiento manual”, el cual dispone de un amarre con trinquete para dicho fin. La forma en que esta transmisión se lleva a cabo, es a través de la recurrente estimulación de la palanca que dicho elemento comercial posee, logrando enrollar poco a poco la correa.

En el mercado de elementos para sujeción existe gran diversidad de amarres con trinquete. Para esta aplicación, se considera pertinente un modelo cualquiera cuya correa mida 25mm de ancho; medida que suele coincidir con una tensión máxima de 300Kg (la carga máxima de 500Kg ha sido reducida a 125Kg gracias a la relación No.2).

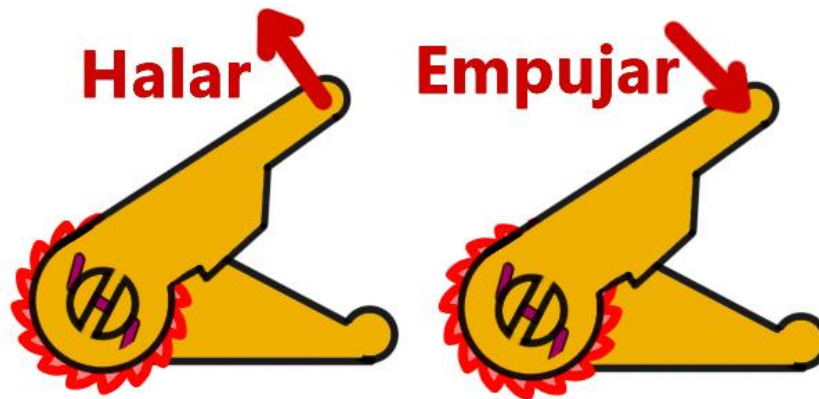
Cabe aclarar que el amarre con trinquete debe ser modificado para que el enrollamiento de la correa suceda al **empujar** la palanca, más **no al halar**. Para conseguir esto, el sentido de los dientes del trinquete debe ser invertido, como se muestra en la figura 3-48.



**Figura 3-46.:** Configuración de polipasto seleccionada para reducir a  $\frac{W}{4}$  la fuerza suficiente para elevar la carga, de peso "W". Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-47.:** Ejemplo de disposición obligatoria entre rodillos para evitar el desajuste de la correa. 1: Rodillo frontal, 2: Rodillo trasero, 3: Correa. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-48.:** Modificación necesaria sobre el amarre con trinquete. En rojo: Dientes de trinquete, morado: seguro (debe ser retirado para conseguir la modificación. Imagen elaborada por el autor.

### Diseño paramétrico de partes

Se concretaron las dimensiones más importantes, los materiales y suministros de las piezas faltantes. A continuación se expondrán las decisiones tomadas sobre las piezas de diseño propio y elementos comerciales que tengan que ser modificados.

#### ■ Accionamiento Automático:

##### ● Sistema de abrazaderas:

- Material: No especificado en catálogo.
- Suministro: Shermworks Inc [72].
- Dimensiones: Largo de 1200mm; distancia adecuada para ser acoplado con cualquier barra olímpica de pesas.

##### ● Barrote:

- Material: Acero AISI 1045 Laminado en frío. Este material fue seleccionado por su fácil disponibilidad comercial, su elevada tenacidad y su elevada resistencia a la cedencia.
- Suministro: Barra sólida de 1" de diámetro. Esta medida es típica en el suministro de barras sólidas de acero, facilitando la localización de proveedores [2, 13].
- Dimensiones: Diámetro de 1", coincidente con el de las barras olímpicas. Esto con la intención de asemejar los esfuerzos soportados por el barrote a los percibidos por las barras usadas en el entrenamiento con pesas.

Largo de 676mm; medida adecuada para ser acoplado mediante pernos en U y funcionar en conjunto con el sistema de abrazaderas de Shermworks Inc [72].

- Validación: Se simuló el desempeño del barrote frente a una carga estática de 5000N, aplicada equitativamente a ambos extremos del elemento. Esto teniendo en cuenta el material, las dimensiones indicadas anteriormente y los pernos en "U" mediante los cuales este componente sería asegurado. Cabe agregar que la simulación del conjunto se desarrolló considerando los pernos cómo elementos rígidos, y el barrote fue mallado cómo elemento sólido.

Mediante un estudio de factor de seguridad (criterio de "Von Mises") aplicado sobre la simulación estática desarrollada, se pudo identificar sobre el barrote un factor de seguridad de 1.3 (figura 3-49) para soportar la carga máxima.

- **Cuerdas Guía:**

- Material: No especificado en catálogo.
- Suministro: Shermworks Inc [72].
- Dimensiones: 10 pies de largo, ajustables según requerimiento.

- **Polea 1 de 2 para ventaja mecánica:**

- Material: Acero AISI 1045 HR en el armazón del polipasto; metal de elevada tenacidad, y cuya ductilidad le permitiría sobrellevar eficazmente los esfuerzos sobre las discontinuidades.

Por otro lado, se escogió el Acero AISI 1020 HR para componer los rodillos; metal suave, fácil de mecanizar, y cuyas propiedades de resistencia mecánica son suficientes para soportar la carga distribuida que la correa transmitiría sobre estas piezas.

- Suministro: Lámina de 4mm de grosor para el armazón del polipasto [62]. Barras de 1 5/8" y 1 3/8" para los rodillos [2].
- Dimensiones: Este elemento debe poder acomodarse dentro de los 0.5 metros destinados para el ensamblaje de poleas (contemplados en la "altura estructural" de la figura 3-29) junto con la "corredera de ajuste" y la "polea 2 de 2 para ventaja mecánica". Es por esta razón que las medidas puntuales de este componente fueron concretadas durante el desarrollo del modelo CAD; proceso mediante el cual se verificó que se cumpliera dicha condición.

Se debe agregar la necesidad de que este conjunto de poleas se pueda acoplar firmemente con el "barrote". Para lo cual se consideró el uso de pernos en "U", cuyo diámetro de curvatura interna sea de 1".

- Validación: Se simuló el desempeño del armazón del polipasto frente a una carga estática de 5000N, distribuida equitativamente sobre las caras cilíndricas de los agujeros para pernos. Para esto se utilizó la opción de "cargas de

apoyo”<sup>15</sup>, buscando acercar la simulación al comportamiento que tendría esta pieza en la realidad.

Mediante un estudio de factor de seguridad (criterio de "Von Mises") aplicado sobre la simulación estática desarrollada, se pudo identificar un factor de seguridad de 1.6 (figura **3-50**).

#### ■ **Corredera de Ajuste:**

##### ● **Corredera:**

- Material: Acero 1020 en el riel "U-700" [21]. Material del carro "D-1000" desconocido.
- Suministro: Conjunto de corredera "D-1000 ART" del empresa Ducasse S.A [21].
- Dimensiones: El riel "U-700" tiene un perfil rectangular de 70 X 76 X 3.0 mm [21]. Se definieron 0.7 metros de largo para este elemento.

Medidas del carro "D-1000" desconocidas. Estas fueron aproximadas considerando las dimensiones del riel y de referencias de carros similares.

- Validación: Se simuló el desempeño del riel "U-700" frente a una carga estática de 5000N, distribuida equitativamente sobre los puntos de apoyo que el carro ejercería sobre este. Para esto se dibujaron los 4 apoyos de las ruedas sobre la cara del riel en dónde se daría el contacto, buscando acercar la simulación al comportamiento que tendría esta pieza en la realidad.

Mediante un estudio de factor de seguridad (criterio de "Von Mises") aplicado sobre la simulación estática desarrollada, se pudo identificar un factor de seguridad de 3.3 cuando la carga se ubica en la mitad del riel, y de 1.3 cuando la carga se ubica sobre uno de los extremos (figura **3-51**).

##### ● **Polea 2 de 2 para ventaja mecánica:**

- Material: Acero AISI 1045 HR en el armazón del polipasto; metal de elevada tenacidad, y cuya ductilidad le permitiría sobrellevar eficazmente los esfuerzos sobre las discontinuidades.

Por otro lado, se escogió el Acero AISI 1020 HR para componer los rodillos; metal suave, fácil de mecanizar, y cuyas propiedades de resistencia mecánica son suficientes para soportar la carga distribuida que la correa transmitiría sobre estas piezas.

- Suministro: Lámina de 4mm de grosor para el armazón del polipasto [62]. Barras de 1 5/8" y 1 3/8" para los rodillos [2].

<sup>15</sup>Método para la aplicación de fuerza sobre una cara cilíndrica

- Dimensiones: Este elemento debe poder acomodarse dentro de los 0.5 metros destinados para el ensamblaje de poleas (contemplados en la "altura estructural" de la figura **3-29**) junto con la "corredera de ajuste" y la "polea 1 de 2 para ventaja mecánica". Es por esta razón que las medidas puntuales de este componente fueron concretadas durante el desarrollo del modelo CAD; proceso mediante el cual se verificó que se cumpliera dicha condición.

Se debe agregar la necesidad de que este conjunto de poleas se pudiera acoplar firmemente con el "barrote". Para lo cual se consideró el uso de pernos en "U", cuyo diámetro de curvatura interna sea de 1".

- Validación: Se simuló el desempeño del armazón del polipasto frente a una carga estática de 5000N, distribuida equitativamente sobre las caras cilíndricas de los agujeros para pernos. Para esto se utilizó la opción de "cargas de apoyo", buscando acercar la simulación al comportamiento que tendría esta pieza en la realidad.

Mediante un estudio de factor de seguridad (criterio de "Von Mises") aplicado sobre la simulación estática desarrollada, se pudo identificar un factor de seguridad de 1.6 (figura **3-52**).

#### ■ **Accionamiento Manual:**

##### ● **Acople:**

- Material: Para el acople entre la "estructura de soporte" y el "accionamiento manual" se consideró el uso de láminas de acero AISI 1045 HR<sup>16</sup>, y algunos perfiles estructurales de acero AISI 1020 CR .
- Suministro: Perfil de soldadura rectangular de 80 X 40 X 3.0mm [11, 14, 75] y láminas 4mm de grosor [62].
- Dimensiones: Este elemento deberá soportar al amarre con trinquete y un rodillo que dirija la correa, además de ajustarse firmemente a las bases de la "estructura de soporte". Es por esto que las medidas puntuales de este componente fueron concretadas durante el desarrollo del modelo CAD.

##### ● **Amarre con trinquete:**

- Material: Según catálogo.
- Suministro: Gran variedad de opciones.
- Dimensiones: Se debe verificar que el amarre con trinquete disponga del agujero que le permita acoplarse mediante tornillería. Por otro lado, la correa de este elemento debe ser de 25mm de ancho.

---

<sup>16</sup>Laminado en caliente (Hot Rolled)

- **Rodillo:**

- Material: Acero AISI 1020 HR para componer los rodillos; metal suave, fácil de mecanizar, y cuyas propiedades de resistencia mecánica son suficientes para soportar la carga distribuida que la correa transmitiría sobre estas piezas.
- Suministro: Barra sólida de 1 5/8" [2].
- Dimensiones: Este elemento debe disponer de un conducto que pueda guiar adecuadamente la correa, que tiene 25mm de ancho. El resto de dimensiones (diámetro, agujero y ancho) fueron concretadas durante el desarrollo del modelo CAD.

- **Estructura de Soporte:**

- **Rodillos Directores:**

- Material: Acero AISI 1045 HR en el armazón del acople entre los rodillos y la estructura; metal de elevada tenacidad, y cuya ductilidad le permitiría sobrellevar eficazmente los esfuerzos sobre las discontinuidades.

Por otro lado, se escogió el Acero AISI 1020 HR para componer los rodillos; metal suave, fácil de mecanizar, y cuyas propiedades de resistencia mecánica son suficientes para soportar la carga distribuida que la correa transmitiría sobre estas piezas.

- Suministro: Láminas de 4mm de grosor [62]. Barras sólidas de 1 5/8" para los rodillos [2].
- Dimensiones: Las medidas del acople entre los rodillos y la estructura fueron concretadas durante el desarrollo del modelo CAD. Esto en busca de cumplir con la disposición necesaria entre rodillos para evitar el desajuste de la correa (figura 3-47).

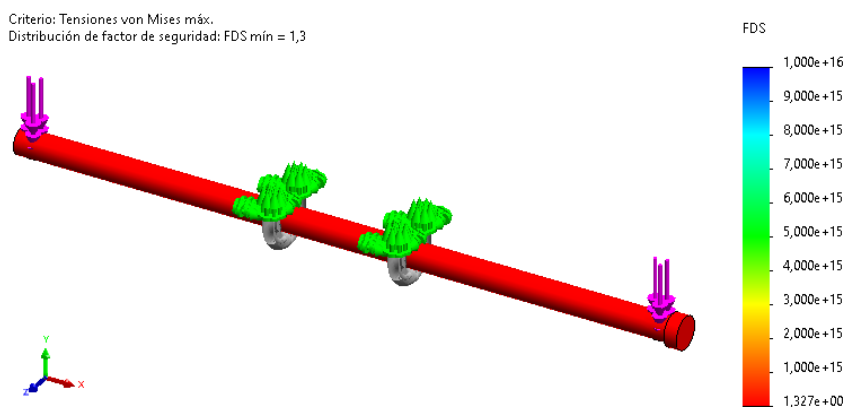
Respecto de los rodillos, estos deben disponer de un conducto que pueda guiar adecuadamente la correa, que tiene 25mm de ancho. El resto de dimensiones (diámetro, agujero y ancho) fueron concretadas durante el desarrollo del modelo CAD.

- Validación: Se simuló el desempeño del armazón de los rodillos directores frente a una carga estática de 1250N, distribuida equitativamente sobre las caras cilíndricas de los agujeros para pernos. Para esto se utilizó la opción de "cargas de apoyo", buscando acercar la simulación al comportamiento que tendría esta pieza en la realidad. Cabe aclarar que la carga experimentada por estos elementos fue reducida gracias a la ventaja mecánica de 4 a 1, adquirida previamente por el conjunto de polipastos.

Mediante un estudio de factor de seguridad (criterio de "Von Mises") aplicado sobre la simulación estática desarrollada, se pudo identificar un factor de

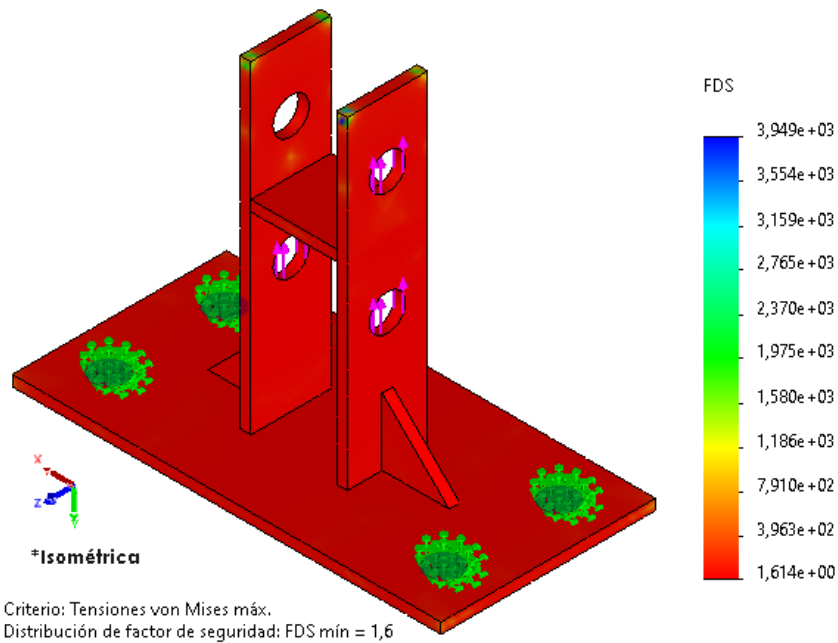
seguridad de 2.2 sobre el acople del primer rodillo (figura 3-54), y de 1.9 sobre el acople del segundo rodillo (figura 3-55).

- **Estructura:**
- Material: Acero AISI 1020 CR.
- Suministro: Perfiles de soldadura rectangular: 80X40X2.0mm, 50X30X2.0mm y 40X40X2.0mm [11, 14, 75].
- Dimensiones: Dimensiones estructurales definidas durante el diseño conceptual realizado previamente (modelo CAD de la figura 3-41).
- Validación: Se simuló el desempeño de la estructura frente a una carga estática de 5000N. Para esta ocasión se consideraron los elementos como "sólidos" (elemento finito tetraédrico). Esto con la intención de validar la resistencia de las caras de los perfiles rectangulares frente a los apoyos que sean inducidos gracias a la carga. Mediante un estudio de factor de seguridad (criterio de "Von Mises") aplicado sobre la simulación estática desarrollada, se pudo validar que esta estructura cumple con un factor de seguridad de por lo menos 2.0 (figura 3-53).
- **Nota: Láminas de acero AISI 1045 de 4mm fueron utilizadas para reforzar la unión de las esquinas correspondientes con el "soporte superior".**

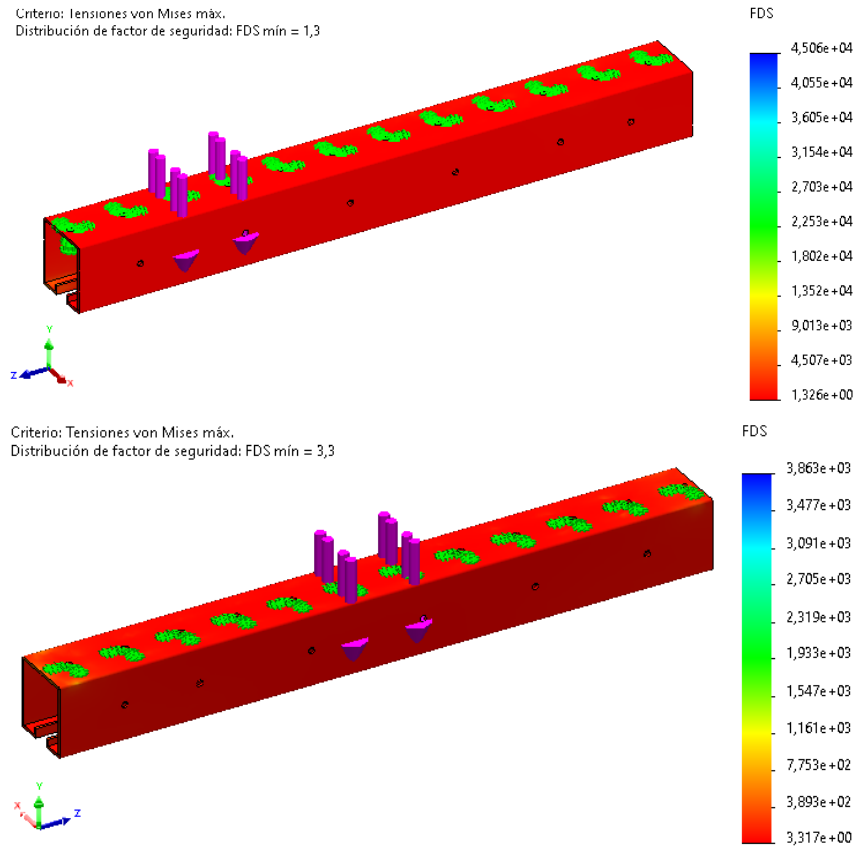


**Figura 3-49.:** Estudio de factor de seguridad (criterio Von-Mises) desarrollado sobre el "barrilete", mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Imagen elaborada por el autor.

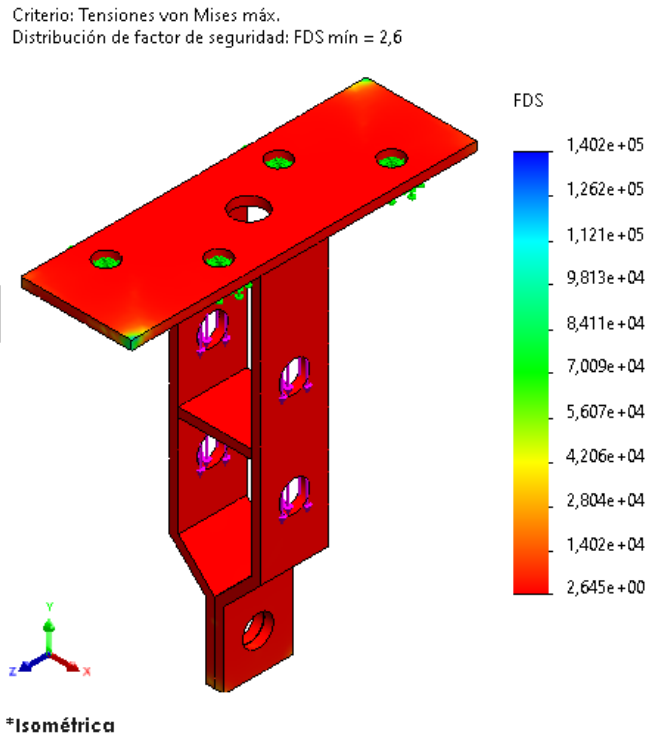




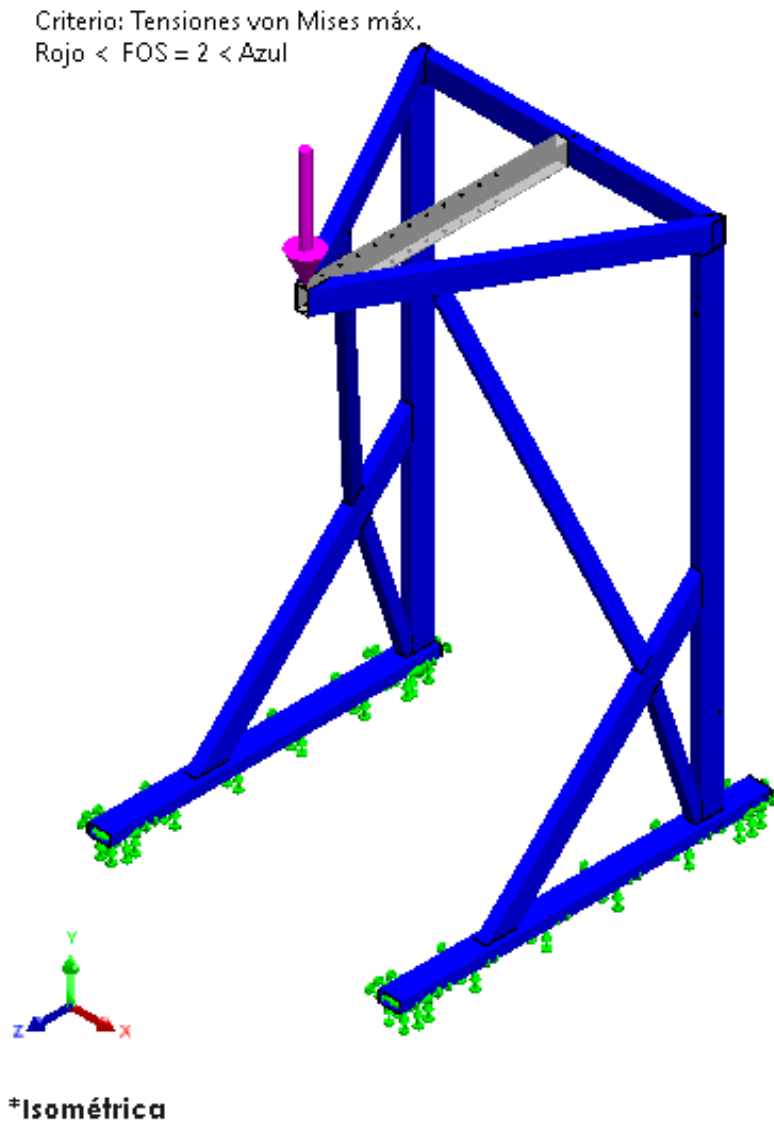
**Figura 3-50.:** Estudio de factor de seguridad (criterio Von-Mises) desarrollado sobre el armazón de la "polea 1 de 2", mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-51.:** Estudios de factor de seguridad (criterio Von-Mises) desarrollados sobre el riel "U-700", mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Imagen elaborada por el autor.

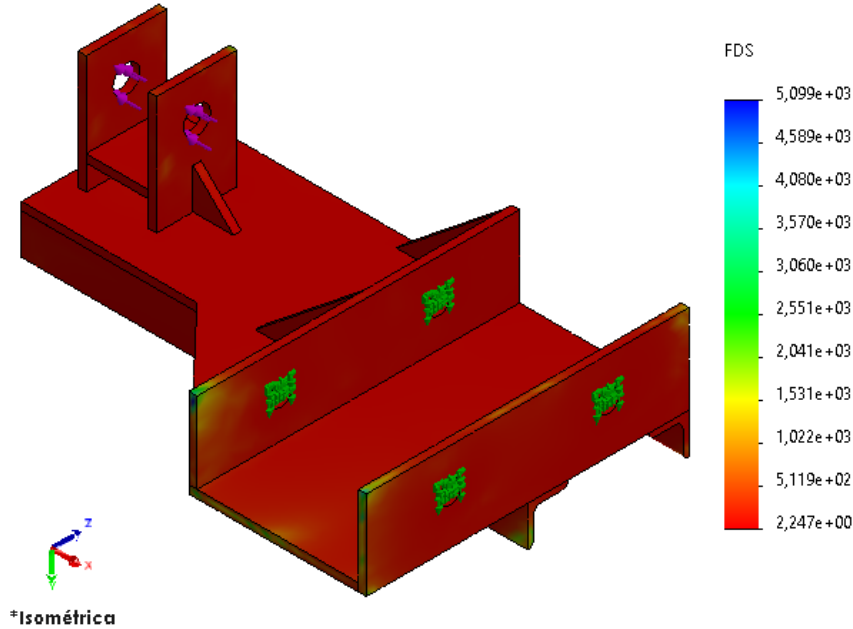


**Figura 3-52.:** Estudio de factor de seguridad (criterio Von-Mises) desarrollado sobre el armazón de la "polea 2 de 2", mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Imagen elaborada por el autor.



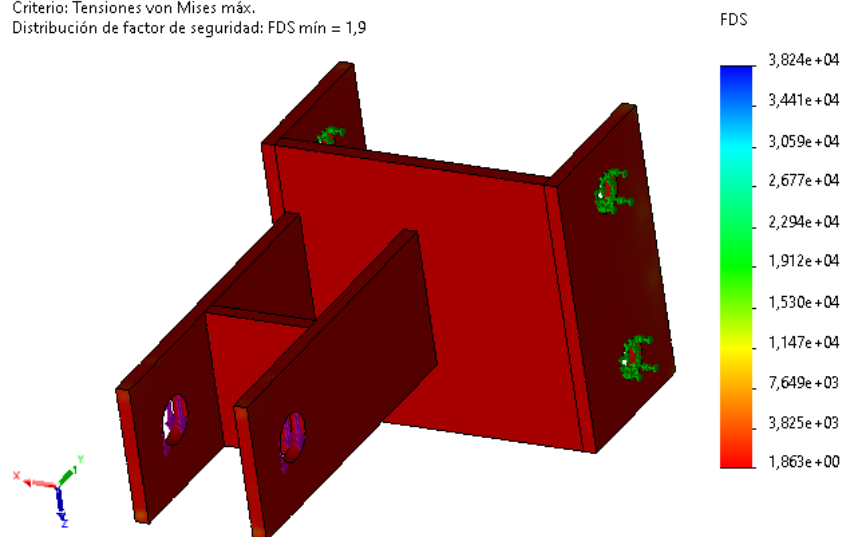
**Figura 3-53.:** Estudio de factor de seguridad (criterio Von-Mises) desarrollado sobre el "Soporte Mecánico", mediante la herramienta de simulación estática de "Solid-works". Imagen elaborada por el autor.

Criterio: Tensiones von Mises máx.  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 2,2



**Figura 3-54.:** Estudio de factor de seguridad (criterio Von-Mises) desarrollado sobre el "acople del primer rodillo", mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Imagen elaborada por el autor.

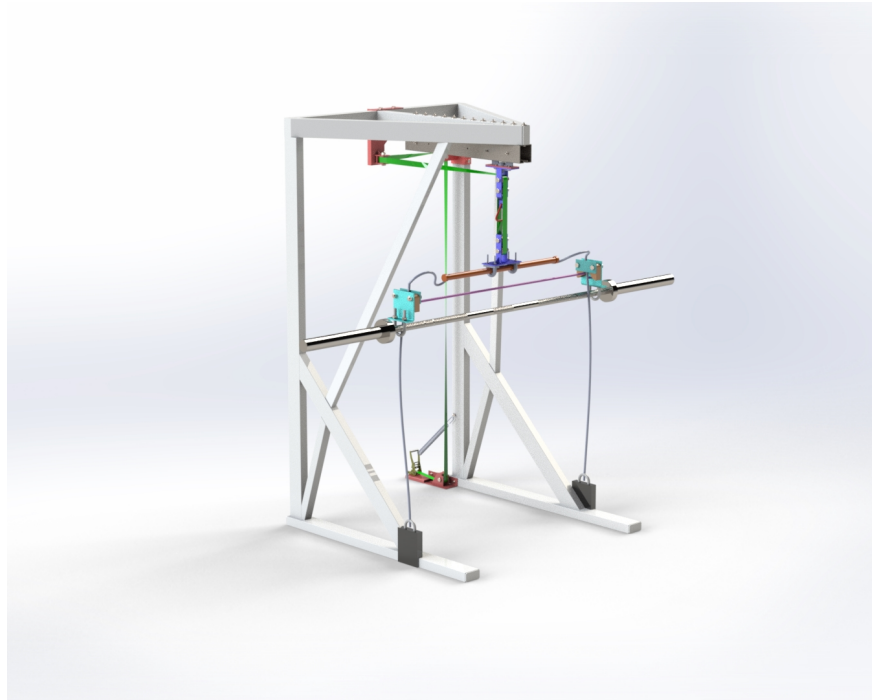
Criterio: Tensiones von Mises máx.  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1,9



**Figura 3-55.:** Estudio de factor de seguridad (criterio Von-Mises) desarrollado sobre el "acople del segundo rodillo", mediante la herramienta de simulación estática de "Solidworks". Imagen elaborada por el autor.

## Diseño de detalle

Los planos de piezas y ensambles se presentan en el anexo A: Planos de diseño mecánico.



**Figura 3-56.:** Aspecto final del diseño mecánico. Imagen elaborada por el autor mediante la herramienta de renderizado de Solidworks.

## 3.4. Diseño Electrónico

En el desarrollo de este segundo aspecto del proyecto se tuvo en cuenta el mismo proceso de diseño llevado a cabo durante la elaboración del "Diseño Mecánico" (propuesto por G.Dieter y L.Schmidt [20]). Es por esto que, durante el desarrollo de esta sección, los resultados de cada una de las etapas de diseño serán presentados sin entrar en mayor detalle sobre la metodología implementada.

El diseño electrónico fue desarrollado con la finalidad de sentar la base de "hardware" suficiente para complementar la capacidad del observador de identificar una situación de riesgo durante la ejecución de la Prensa de Banco". Además, este diseño buscará comunicar la necesidad de asistencia en el levantamiento de la carga, que el levantador pueda requerir durante el desarrollo del ejercicio para llegar al fallo volitivo, y fortalecer de esta manera su sistema músculo-esquelético.

## Diseño conceptual

Se inició el proceso de diseño identificando al cliente. Analizando el contexto en que el diseño electrónico se desenvolverá se identificaron 3 entidades que serán afectadas de alguna manera por este producto. Los clientes identificados se presentan a continuación:

- Levantador: El diseño electrónico hará seguimiento al desempeño del levantador mientras se encuentre ejecutando el ejercicio de "prensa de banco".
- Observador: El diseño electrónico apoyará la tarea de asistencia que el observador desarrolla sobre el ejercicio de "prensa de banco".
- Soporte mecánico: El diseño electrónico será acoplado al sistema mecánico diseñado anteriormente.

### Identificación de las necesidades de cliente

**Lluvia de ideas** Se llevó a cabo una "lluvia de ideas" sobre las críticas, falencias y complementos que puedan darse en torno a la supervisión de la prensa de banco; y que además, puedan ser abordadas por medios electrónicos. Con este procedimiento se detectaron 27 ideas, algunas planteadas por el autor, otras derivadas del diagrama de afinidad formulado anteriormente (tabla 3-1), y otras provenientes de la creatividad de personas entrevistadas sobre el tema. Cabe agregar que dichas necesidades fueron contempladas reflexionando sobre el diseño electrónico desde la perspectiva de cada uno de los 3 clientes identificados anteriormente (levantador, observador y soporte mecánico).

**Diagrama de Afinidad** En busca de identificar las necesidades de cliente más relevantes, los 27 elementos extraídos a través de la "lluvia de ideas" fueron organizados en las 4 columnas del diagrama de afinidad presentado en la tabla 3-14. Cada columna destinada para agrupar elementos semejantes en su labor dentro del proyecto. Respecto de los grupos conformados, a continuación se describirá el sentido de cada uno:

- Adaptabilidad: Facultad de adaptarse espacialmente al desarrollo de la prensa de banco y a la supervisión que se le da a este ejercicio a través del observador y del soporte mecánico.
- Integridad del servicio: Críticas planteadas sobre el desarrollo y la supervisión del ejercicio de la prensa de banco, abordables por medios electrónicos.
- Desempeño: Aspectos técnicos o funcionales del producto.
- Complementos: Acabados especiales llamativos.

Adaptabilidad	Integridad de servicio	Desempeño	Complementos
No interfiere con el ejercicio	Advertencia visual de posible fallo en el ejercicio	No ruidoso en su operación normal	Diseño estético
Fácil ensamblaje	Advertencia auditiva de posible fallo en el ejercicio	Diseño resistente a impactos	Comodidad
Adaptable con facilidad al "Soporte Mecánico"	Estimulación Psicológica	Diseño resistente a líquidos	Diseño Compacto
No interfiere con el observador	Supervisión de técnica	Bajo consumo	Diseño económico
	Supervisión de Postura	Alta Sensibilidad	
	Supervisión de respiración	Alta frecuencia de Muestreo	
	Supervisión de Agarre a la barra	Larga Vida útil	
	Visibilidad gráfica de desempeño	Autonomía Extensa	
	Registro de historia de desempeño		
	Cálculo de fuerza máxima desarrollada		
	Contacto con línea de emergencias		
	Protección de Muñecas		

**Tabla 3-14.:** Diagrama de afinidad desarrollado para el diseño electrónico. Tabla elaborada por el autor

### Definición del problema

**Conclusión de la problemática** Se determinó la necesidad de complementar el diseño mecánico desarrollado anteriormente, de manera que se puedan afrontar las falencias faltantes en la supervisión del ejercicio de la prensa de banco; las cuales son imposibles de abordar por medios exclusivamente mecánicos. Dichas falencias corresponden con la dificultad del



observador para identificar una situación de riesgo durante el desarrollo del ejercicio y la deficiente comunicación hacia el observador sobre las necesidades que tenga el levantador respecto del apoyo que pueda necesitar en el manejo de la carga durante el ejercicio de la prensa de banco. Pues dicho apoyo es fundamental para alcanzar el fallo volitivo, crucial para el desarrollo del sistema músculo-esquelético del levantador.

**Propuesta** Se plantea el diseño de un equipo electrónico que apoye al observador en la identificación de situaciones de riesgo durante el desarrollo de la prensa de banco, y que asimismo facilite la comunicación de las necesidades de asistencia que tenga el levantador respecto del manejo de la carga. Este equipo deberá disponer del hardware suficiente para que, mediante los algoritmos pertinentes, se logren cubrir las necesidades de cliente identificadas.

**Despliegue de la función calidad** Se desarrolló la "Casa de la Calidad" (HOQ) presentada en la figura 3-57; esquema a través del cual se pudieron definir las características ingenieriles (EC's) de mayor relevancia a la hora de satisfacer las demandas de cliente (CR's) más significativas acerca de la problemática que se desea enfrentar. Tanto las características de ingeniería (EC's), cómo las demandas de cliente (CR's) serán detalladas a continuación:

**Demandas de cliente (CR's):**

1. CTQ CR's (puntaje == 5):

- **Adaptabilidad al contexto de BP<sup>17</sup> Asistido:** El sistema no interfiere espacialmente con el equipo para la prensa de banco, ni con el desarrollo normal de este ejercicio. Asimismo, no debe obstaculizar la asistencia que sea brindada por el observador, y tampoco entorpecer el desempeño del "diseño mecánico" diseñado anteriormente.
- **Eficacia de comunicación de Necesidades:** Se enfrentan las falencias de comunicación entre el observador y el levantador, cuando este último requiere de apoyo en el manejo de la carga durante el desarrollo de la prensa de banco.

2. CR's (puntaje == 4):

- **Frecuencia de Muestreo:** El diseño electrónico dispone del hardware suficiente para hacer un apropiado seguimiento temporal del desarrollo del ejercicio de la prensa de banco.
- **Alta Resolución:** El diseño electrónico dispone del hardware suficiente para hacer una medición precisa de las variables cinemáticas relacionadas con el ejercicio de la prensa de banco.
- **Alimentación Confiable:** El diseño electrónico dispone de un suministro energético confiable y que se ajusta a las actividades de los clientes (levantador, observador y soporte mecánico).

---

<sup>17</sup>Prensa de banco (Bench Press)

## 3. CR's (puntaje == 2):

- **Resistencia Ambiental:** El diseño electrónico resiste las adversidades ambientales que atenten contra la integridad de este equipo (i.e impacto, humedad, partículas).
  
- **Diseño Económico:** El diseño electrónico es conformado por componentes cuyo costo facilite su conformación.

## 4. CR's (puntaje == 1):

- **Comodidad:** El modo en que el diseño electrónico se ajusta al contexto del ejercicio de la prensa de banco no implica ninguna incomodidad para el levantador ni para el observador.
  
- **Diseño Estético:** El diseño electrónico debe ser atractivo y agradable a la vista de los consumidores.
  
- **Contaminación Auditiva:** El diseño electrónico no produce sonidos molestos.

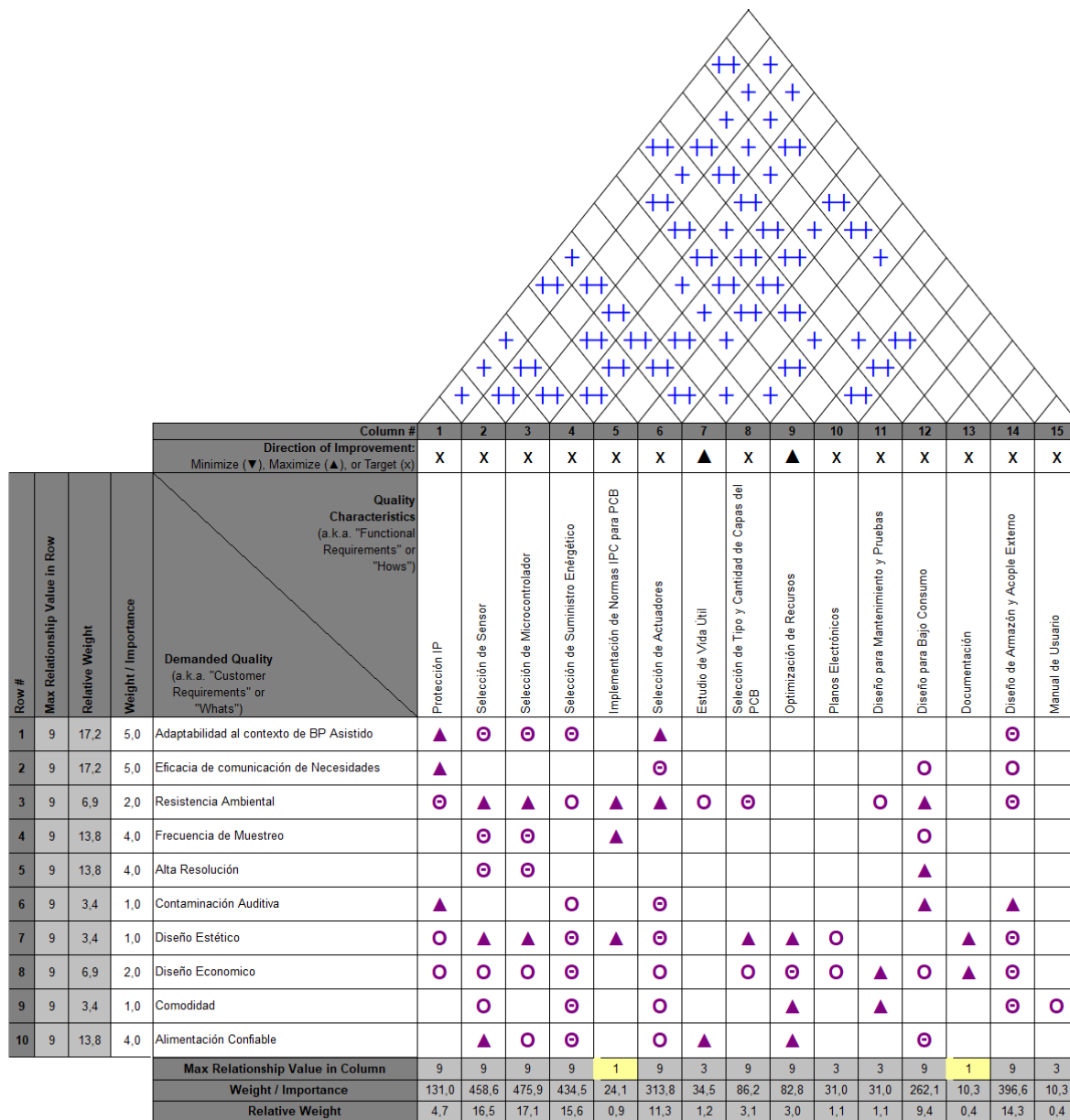


Figura 3-57.: Casa de la calidad desarrollada para el diseño electrónico. Esquema elaborado por el autor.

**Características de ingeniería (EC's):**

1. **Selección de Microcontrolador (Puntaje = 17.1):** Identificación del circuito integrado programable, cuyas características de consumo energético, precio, tamaño, velocidad y de compatibilidad con el sensor seleccionado, se ajusten a las demandas de clientes especificadas.
2. **Selección de Sensor (Puntaje = 16.5):** Identificación del sensor, cuyo consumo

energético, precio, tamaño, velocidad y método de medición sea compatible con el contexto del ejercicio de la prensa de banco.

3. **Selección de Suministro Energético (Puntaje = 15.6):** Selección de un suministro energético suficiente en términos de voltaje y corriente demandados, cuya figura y dimensiones le permitan ajustarse a las del "Soporte Mecánico" diseñado, así como al desarrollo y asistencia de la prensa de banco también.
4. **Diseño de Armazón y Acople Externo (Puntaje = 14.3):** Concepción de una estructura que incorpore en su integridad todos los elementos electrónicos seleccionados, brindándoles además, protección frente al ambiente circundante.
5. **Selección de Actuadores (Puntaje = 11.3):** Selección de los actuadores encargados de comunicar de manera efectiva, las necesidades de quien se encuentre desarrollando la prensa de banco con aquel que se encuentre asistiéndole el ejercicio.
6. **Diseño para Bajo Consumo (Puntaje = 9.4):** Concepción del concepto electrónico con un enfoque especial dado sobre reducir el consumo energético.
7. **Protección IP (Puntaje = 4.7):** Definir y aplicar adecuadamente, una protección frente a partículas y líquidos que amenacen con el rendimiento del equipo electrónico.
8. **Selección de Tipo y Cantidad de Capas del PCB (Puntaje = 3.1):** Identificación y elección del material que compondrá la tarjeta electrónica, así como también la cantidad de capas que compondrán el cuerpo de esta.
9. **Optimización de Recursos (Puntaje = 3.0):** Enfoque de diseño dado hacia la eficacia, en cuanto a cantidad de componentes necesarios se refiere, sin afectar el rendimiento del equipo electrónico.
10. **Estudio de Vida Útil (Puntaje = 1.2):** Análisis de la duración de los componentes comerciales implementados y diseñados.
11. **Diseño para Mantenimiento y Pruebas (Puntaje = 1.1):** Desarrollo de tarjetas electrónicas con pautas enfocadas en facilitar futuras pruebas y mantenimientos
12. **Planos Electrónicos (Puntaje = 1.1):** Desarrollo de planos y esquemáticos eléctricos de la/s tarjetas electrónicas diseñadas
13. **Implementación de Normas IPC para PCB (Puntaje = 0.9):** Tomar mano de las normas expresadas en las normas IPC para diseño de PCB (IPC-2221)
14. **Documentación (Puntaje = 0.4):** Seguimiento de la norma para documentación de esquemáticos electrónicos.

15. **Manual de Usuario (Puntaje = 0.4):** Desarrollo de un texto explicativo, destinado para el cliente, que lo informe en la correcta instalación, uso y recomendaciones relativas al "Complemento Electrónico" que se desarrolla.

**PDS Preliminar** Se presentan a continuación las especificaciones preliminares para el diseño de producto (PDS). A través de las cuales se delimitan los alcances que el diseño electrónico tendrá en cuestiones de medidas y desempeño.

- Identificación del producto:
  - Nombre: Complemento Electrónico
  - Funciones básicas:
    - Hacer seguimiento de las variables cinemáticas en el ejercicio de la prensa de banco.
    - Apoyar la detección de una situación de riesgo durante la ejecución del ejercicio de la prensa de banco.
    - Favorecer la comunicación de las necesidades de asistencia por parte del levantador hacia el observador.
  - Características especiales:
    - Compatible con el equipo tradicional para la prensa de banco.
    - Compatible con el desarrollo normal del ejercicio de la prensa de banco.
    - Compatible con la supervisión y asistencia del ejercicio de la prensa de banco. Dado en conjunto por el observador y el soporte mecánico diseñado anteriormente.
  - Actuadores: Por definir.
  - Acometida energética: Por definir.
  - Ambiente de trabajo: Uso exclusivo en interiores.
  - Entrenamiento de usuario requerido:
    - Conocimiento básico del equipo la prensa de banco, el soporte mecánico diseñado anteriormente y la instalación del "complemento electrónico".
    - Conocimiento básico del funcionamiento del "complemento electrónico".
- Descripción física:
  - Dimensiones externas generales: 500X400X100mm
  - Restricciones de uso: Implementación exclusiva en conjunto con el 'Soporte Mecánico', en el contexto de la supervisión de la Prensa de Banco.

- Ciclo de vida:
  - Vida útil: Según los elementos comerciales seleccionados.
  - Calendario de mantenimiento: Según los elementos comerciales seleccionados.
- Requerimientos sociales, políticos y legales:
  - Estándares: IPC para circuitos electrónicos.
  - Responsabilidades para con el producto: Utilizar exclusivamente en la tarea para la que fue diseñado.
- Especificaciones de manufactura:
  - Requerimientos de manufactura: Capacidad de manufactura de una tarjeta electrónica de desempeño "IPC Clase 1" [?].
  - Protección: Protección frente partículas y líquidos grado IP-10.
  - Proveedores: Proveedores de actuadores de luz y sonido, sensores, microcontroladores.

### Recolección de información

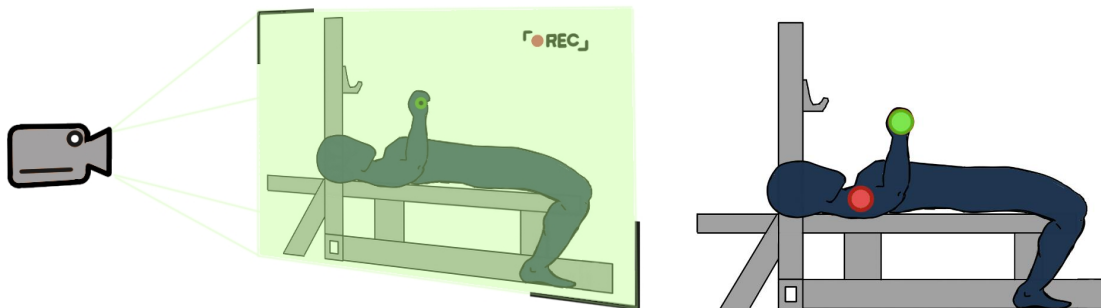
Se desarrolló una amplia investigación sobre las técnicas de medición implementadas en el estudio del ejercicio de la prensa de banco. De la mencionada investigación se identificaron 2 enfoques particulares de análisis: uno basado en el seguimiento de variables asociadas al cuerpo del levantador (actividad mioeléctrica, movimientos articulares, desplazamiento de extremidades, etc), y otro basado en el estudio de las variables cinemáticas presentes en la carga que está siendo levantada (desplazamiento, velocidad y aceleración). Sobre estos enfoques de estudio, 3 técnicas de medición sensorial resaltaron por su popularidad:

- Electromiografía (EMG - Electromyography ): Es un procedimiento médico que utiliza electrodos para leer de forma cuantitativa las señales eléctricas emitidas por los músculos cuando se contraen. Esta técnica ha demostrado no ser muy efectiva para hacer seguimiento del ejercicio de la prensa de banco [23,78]
- Captura de movimiento (MOCAP - Motion Capture): Es una técnica basada en fotogrametría y álgebra lineal, que facilita la medición de desplazamientos y posiciones tridimensionales. Esta técnica parte de una grabación simultanea, desde diversos ángulos y con alta velocidad, del escenario que se quiera estudiar.
- Transductor de posición con cable (CPT - Cable Position Transducer): El transductor de posición con cable es un sensor para medir desplazamiento lineal. A través de un cable enrollado sobre la cara externa de un cilindro logra dicha medición de la siguiente manera: el cilindro gira libremente según la distancia que el cable se haya extendido;

y a través del diámetro de dicho cilindro, y la rotación de este (medida a través de un encoder), el mencionado desplazamiento lineal es calculado.

Los primeros estudios desarrollados sobre la prensa de banco implementaron la técnica de captura de movimiento (MOCAP). En el estudio de N.Madsen et al [49] se calculó el desplazamiento de la carga sobre el plano sagital<sup>18</sup> mediante una sola cámara, capaz de grabar a una frecuencia de 100 tomas por segundo el marcador dispuesto sobre la barra cómo se muestra en la figura 3-58. De manera similar se llevó a cabo el estudio de C.Green [28], con una velocidad de grabación de 40 tomas por segundo. En ambas investigaciones se construyeron, a partir de la ecuación 3-16 (Ft: Fuerza efectuada en el tiempo, m: Masa de la carga, a: Aceleración de la carga, W: Peso de la carga, i=Muestras discretas del tiempo, n: Cantidad total de muestras), expresiones matemáticas para la trayectoria, la velocidad y la aceleración en el tiempo utilizando la teoría de "spline cúbica", recomendada por T.McLaughlin et al [53] y H.Woltring [?].

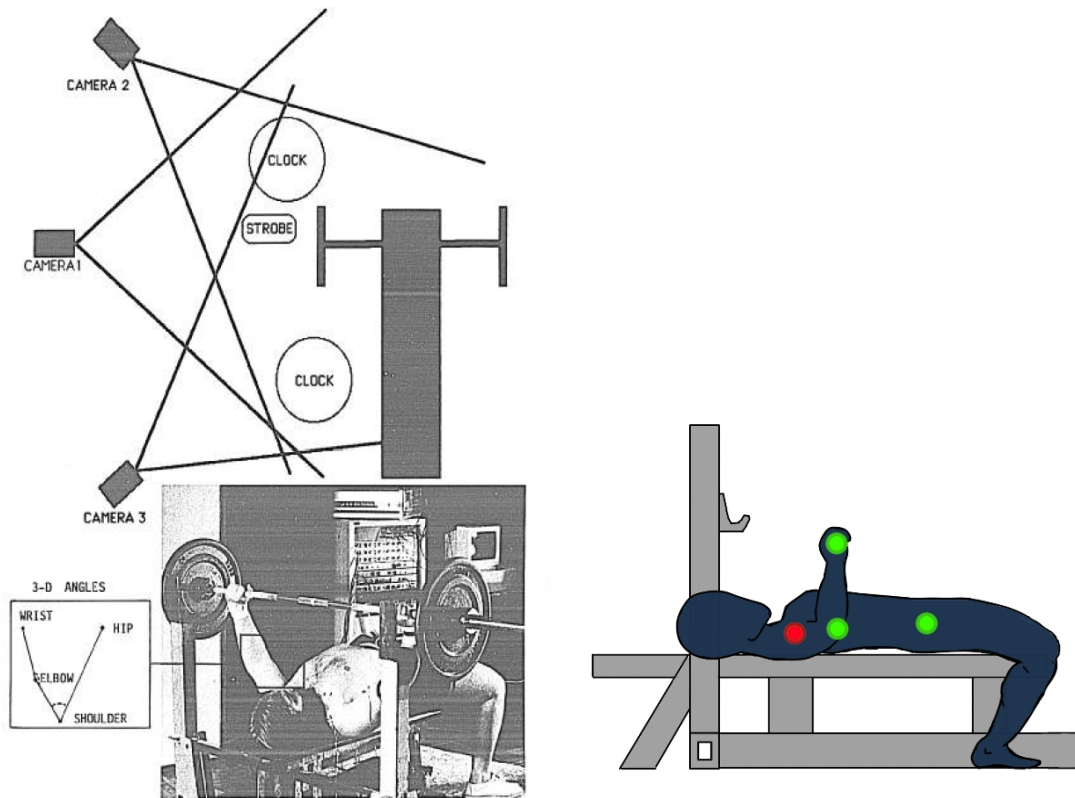
$$(Ft)i = m * a(t)i + W \quad (3-16)$$



**Figura 3-58.:** Enfoque de la cámara sobre el plano sagital, en el que se desplaza la barra identificada con el marcador de color verde. Técnica implementada en el estudio de N.Madsen [49] y C.Green [28]. En Rojo se indica el punto considerado cómo origen. Imagen elaborada por el autor.

En el estudio de M.Duffey [22] se aplicó el método de captura de movimiento con 2 cámaras, sincronizadas en una grabación de 240 tomas por segundo. En los estudios de B.Elliott [23] y G.Wilson [83] se utilizaron 3 cámaras, ubicadas cómo se muestra la figura 3-59 y sincronizadas en una grabación de 100 tomas por segundo para hacer seguimiento de los marcadores dispuestos en las muñecas, codos, hombros y cadera del levantador; logrando así reconstruir el movimiento tridimensional tanto de la carga cómo de las extremidades superiores, a través de la aplicación de transformación lineal directa (DLT - Direct Linear Transformation) [71].

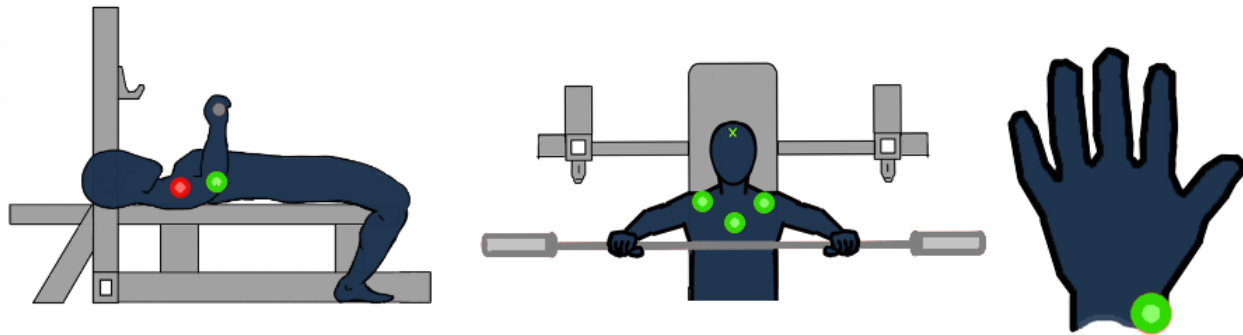
<sup>18</sup>Plano anatómico que separa el cuerpo en las mitades izquierda y derecha



**Figura 3-59.:** Ubicación de las cámaras recomendada por G.Wood [84], utilizada para hacer seguimiento tridimensional de los marcadores (en verde) de las muñecas, codos, hombros y cadera en el estudio de B.Elliott [23] y G.Wilson [83]. Origen identificado con el marcador rojo. Imagen de las posiciones tomada de [23]. Imagen de los marcadores elaborada por el autor.

Para registrar el desplazamiento de la barra y las extremidades superiores del levantador, en el estudio de R.Van Den Tillaar [78] se rastrearón los marcadores dispuestos cómo se presenta en la figura 3-60 a través del sistema de captura de movimiento sueco "Qualysis". Un equipo especializado en captura de movimiento que dispone de 8 cámaras con una capacidad de grabación de 500 muestras por segundo.





**Figura 3-60.:** Marcadores utilizados en el estudio de R.Van Den Tillaar [78]. En color verde: parte alta del esternón, puntas laterales del acromion, epicóndilos laterales del codo y apófisis estiloides del cubito. Origen identificado con el marcador rojo. Imagen elaborada por el autor.

Respecto de las aplicaciones del sensor transductor de posición con cable, se encuentra el estudio de M.Izquierdo et al [33], el cual implementó el encoder rotacional de la empresa "Computer Optical Products Inc, California, USA" para registrar las medidas cinemáticas de la carga durante el ejercicio de la prensa de banco. Por otro lado, el estudio de D.García [26] aplicó la versión de encoder rotacional de la empresa "Globus Real Power, Globus, Codogne, Italy" para el mismo fin. De manera similar, R.Van Den Tillaar et al [79] estudió el ejercicio con el equipo "MuscleLab" de la empresa "Ergotest Technology AS, Langesund, Norway".

Una técnica diferente a las presentadas anteriormente es la utilizada en el estudio realizado por H.Król [46]. En este estudio se midieron las variables cinemáticas de la carga, paralelamente a través de 2 sensores: un pantógrafo<sup>19</sup> y el conjunto de medición "SMART-E" de la empresa "BTS, Italy", el cual consiste de 6 cámaras infrarrojas capaces de muestrear a una frecuencia de 120 tomas por segundo.

La exactitud de las mencionadas técnicas de medición se contrastan en la tabla **3-15**:

<sup>19</sup>Mecanismo articulado que realiza la medición del desplazamiento de un extremo a partir de la rotación de sus ejes

Autor	Técnica	Integridad de la medición	Muestreo	Error
N.Madsen et al [49]	MOCAP	Plano sagital	100Hz	90 + / - 2 %
B.Elliott [23] y G.Wilson [83]	MOCAP	Plano sagital	100Hz	5mm
R.Van Den Tillaar [78]	MOCAP	3 dimensiones	500Hz	0.05mm
M.Izquierdo et al [33]	CPT	Altura	1000Hz	0.2mm
D.García [26]	CPT	Altura	1000Hz	0.1mm
R.Van Den Tillaar et al [79]	CPT	Altura	100Hz	0.075mm
H.Król [46]	Infrarojo	3 dimensiones	120Hz	0.4mm

**Tabla 3-15.:** Comparación de las técnicas implementadas en el estudio del ejercicio de la prensa de banco. Tabla elaborada por el autor

### Conceptualización

**Método morfológico de diseño** Se conformó la tabla **3-16**, correspondiente con el método morfológico de diseño del "complemento electrónico". Sobre este esquema se organizaron las soluciones planteadas para cada uno de los 4 subproblemas que fueron identificados:

- **Adaptabilidad:** Calidad de adaptarse fácilmente al contexto de la prensa de banco asistida por el observador y el soporte mecánico diseñado anteriormente.
- **Medición:** Se refiere al concepto sensorial implementado para la medición de variables cinemáticas en la carga.
- **Medio de Alerta:** Manera en que se advertirá al observador del riesgo que experimenta el levantador.
- **Alimentación:** Suministro seleccionado para abastecer energéticamente al complemento electrónico.

Adaptabilidad	Medición	Medio de Alerta	Alimentación
Correa en tórax del levantador	CPT	Luz	Batería
Correa en cabeza del levantador	MOCAP	Sonido	Cable
Acople en soportes del BP	Pantógrafo	Vibración	
Acople en "Estructura de Soporte"	Acelerómetro	Choque eléctrico	
Estructura Extra			

**Tabla 3-16.:** Método morfológico de diseño aplicado al presente caso de diseño electrónico.  
Tabla elaborada por el autor

**Diseños realizados** Se presentan a continuación los conceptos morfológicos desarrollados a través del método morfológico de diseño:

#### **Primer concepto compuesto: figura 3-61**

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-61.

Este concepto partió de la técnica de captura de movimiento con una cámara realizada por N.Madsen et al [49]. En este caso se busca complementar dicha técnica con un equipo que sea capaz de reconocer de manera automática los patrones típicos de fallo en el ejercicio de la prensa de banco y alertar sobre la presencia de estos.

Este concepto hace seguimiento de una "marca" dispuesta en el extremo derecho de la barra mediante una cámara de alta velocidad (1). La información obtenida es analizada en tiempo real a través de una unidad de procesamiento (2), la cual, al identificar un patrón típico de fallo en el ejercicio comunica el nivel de riesgo que atente contra el levantador mediante una bocina (5) (Ruido = Alto riesgo, Silencio = Bajo riesgo).

Se contempla el uso de alimentación eléctrica por cable para la cámara (1) y la bocina (5). Cabe aclarar que la alimentación de la bocina (5) es regulada por la unidad de procesamiento (2) a través de un acople de potencia (4). Por otro lado, la unidad de procesamiento (2) obtiene energía desde una salida de voltaje menor, proveniente de la cámara (1).

#### **Soluciones brindadas**

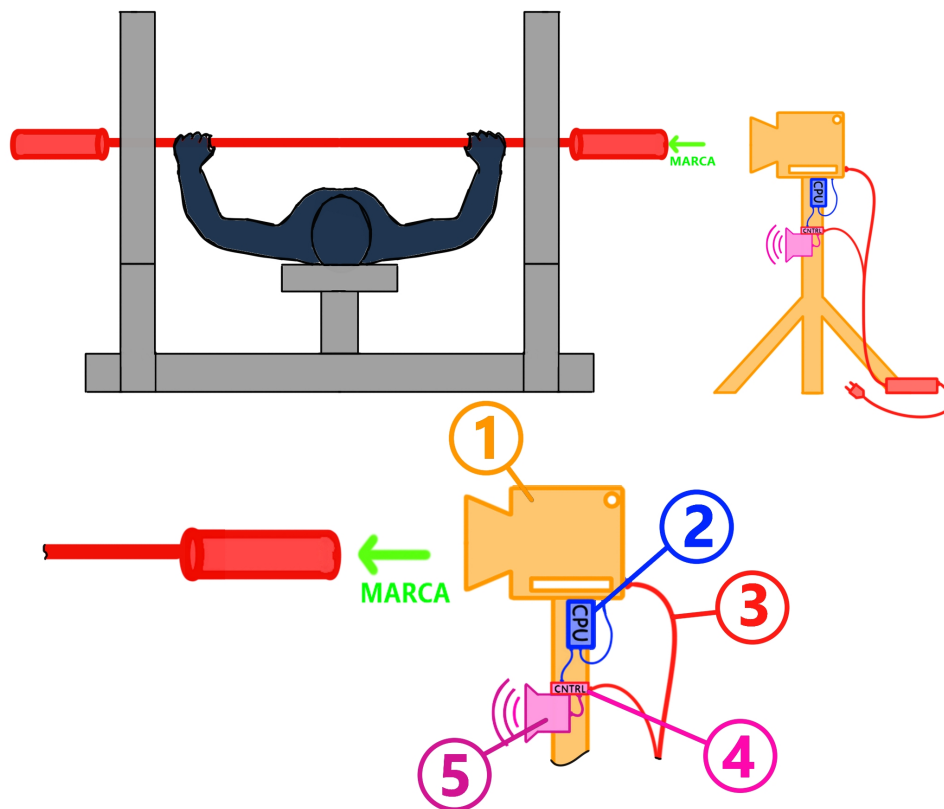
- **Adaptabilidad:** La cámara (1) y los componentes para detección de nivel de riesgo son montados sobre una estructura ajena al equipo para prensa de banco y el soporte

mecánico. De manera que no se interfiere en absoluto, ni con el desarrollo, ni con la supervisión del ejercicio de la prensa de banco.

- **Medición:** Se rastrea en tiempo real, las variables cinemáticas de la barra sobre el plano sagital.
  
- **Medio de Alerta:** Se alerta al observador sobre el riesgo que perciba el levantador, mediante una bocina (5).
  
- **Alimentación:** Se utiliza alimentación eléctrica por cable, y algunas derivaciones de esta para energizar componentes de menor consumo.

### **Contras**

- Elevado error de medición de variables cinemáticas.
  
- El montaje de la cámara y sus complementos implican una estructura ajena al equipo para prensa de banco y el soporte mecánico, que puede resultar estorbosa en un ambiente concurrido.
  
- El procesamiento de las imágenes capturadas y la extracción de variables cinemáticas implican un elevado costo computacional.
  
- La alarma con bocina (5) puede no ser suficiente si el levantador se encuentra usando audífonos, o tiene alguna discapacidad auditiva.



**Figura 3-61.:** Boceto conceptual de la primera idea compuesta desarrollada. 1: Cámara, 2: Unidad de procesamiento, 3: Suministro eléctrico por cable, 4: Acople de potencia eléctrica, 5: Bocina. Imagen elaborada por el autor.

### Segundo concepto compuesto: figura 3-62

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-62.

Este concepto se basa en el uso del transductor de posición con cable para medir la elevación de la barra sobre el cuerpo del levantador. En este caso se busca complementar esta técnica de medición con un equipo que sea capaz de reconocer de manera automática los patrones típicos de fallo en el ejercicio de la prensa de banco y alertar sobre la presencia de estos.

Le forma en que se lograría la medición de los mencionados patrones es a través de un transductor de posición con cable (6), montado sobre la barra mediante un acople (5), y cuya cuerda esté asociada a la cabeza (C.C), o al tórax (C.T) del levantador. La lectura de este sensor es enviada hacia una unidad de procesamiento (4), encargada de regular la activación de la alarma visual (1) según el nivel de riesgo identificado (Rojo = Alto riesgo, Verde = Bajo riesgo).

Se contempla el uso de alimentación eléctrica con batería (3), conectada directamente a la

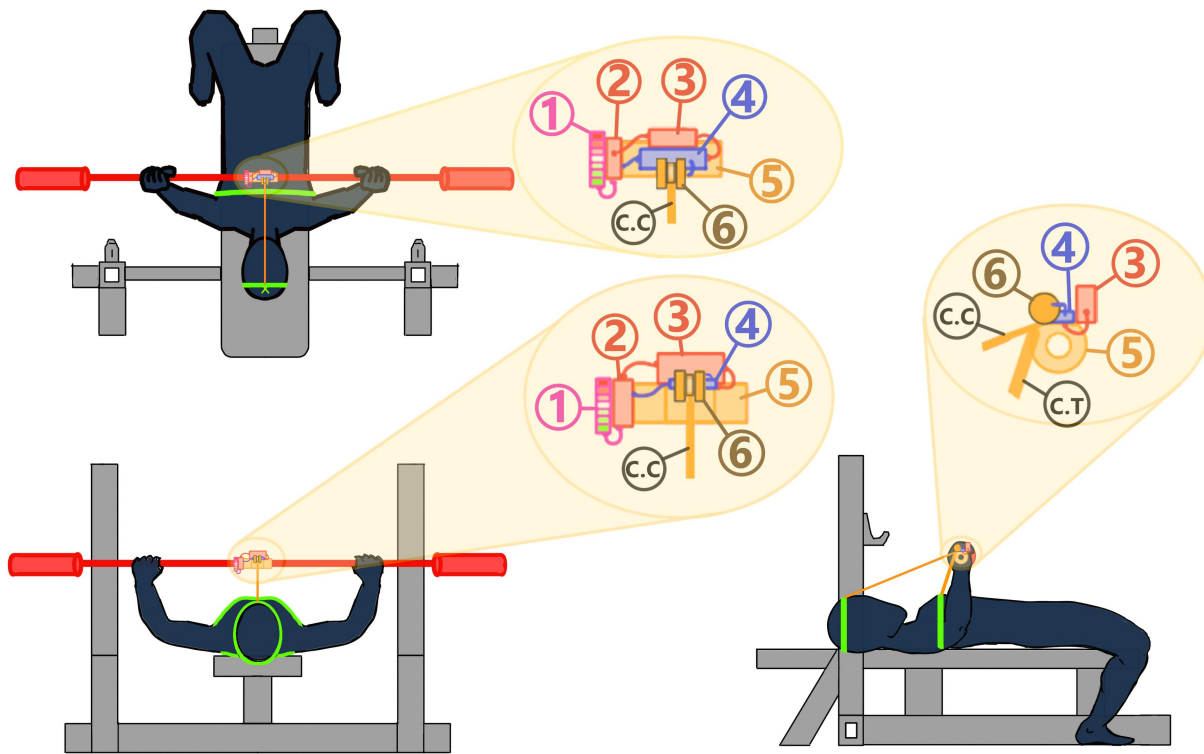
unidad de procesamiento (4). Cabe aclarar que la alimentación de la alarma visual (1) sería regulada por la unidad de procesamiento (4) a través de un módulo específico para el control de este tipo de alarmas (2). Por otro lado, el transductor (6) obtendría energía eléctrica directamente de la unidad de procesamiento (4).

### Soluciones brindadas

- Adaptabilidad: Los componentes de este diseño se ubican en una manera poco interferente con el desarrollo y la asistencia del ejercicio de la prensa de banco. Tampoco se producirían interferencias con la estructura o funcionamiento del soporte mecánico.
- Medición: Se rastrea en tiempo real, las variables cinemáticas de la barra sobre el plano sagital, en una sola dirección.
- Medio de Alerta: Se alerta al observador sobre el riesgo que perciba el levantador durante el desarrollo del ejercicio, mediante una alarma visual (1).
- Alimentación: Se utiliza alimentación eléctrica por baterías, y algunas derivaciones de esta para energizar componentes de menor consumo.

### Contras

- Este concepto puede medir el movimiento de la carga en sólo una dirección.
- Se presentarían errores de medición, en caso de que la barra se desplazara fuera del plano sagital.
- La alarma visual puede ser ignorada con facilidad.
- No se asegura que la posición del montaje sobre la barra se mantenga siempre cómo se muestra en la figura **3-62**.
- El montaje sobre la barra podría dañarse y/o lesionar al levantador en caso de fallar en el levantamiento de la carga.



**Figura 3-62.:** Boceto conceptual de la segunda idea compuesta desarrollada. 1: Alarma visual, 2: Módulo de control de la alarma visual, 3: Batería, 4: Unidad de procesamiento, 5: Acople con la barra, 6: Transductor de posición con cable, C.C: Cuerda en vínculo con la cabeza del levantador, C.T: Cuerda en vínculo con la tórax del levantador. Imagen elaborada por el autor.

### Tercer concepto compuesto: figura 3-63

**Nota:** Considerar las referencias alfanuméricas indicadas sobre el boceto de la figura 3-63.

Este concepto se basa en el uso de un acelerómetro (7) y un transductor de posición con cable (6) para medir el desplazamiento tridimensional de la carga. Estos sensores actuarían en conjunto con un grupo de elementos que complementarían esta técnica de medición para reconocer de manera automática los patrones típicos de fallo en el ejercicio de la prensa de banco y alertar sobre el riesgo de lesión durante el levantamiento de la barra.

La forma en que se lograría el registro del desplazamiento tridimensional de la carga es a través del funcionamiento cooperativo entre el transductor de posición con cable (6) y el acelerómetro (7). Mientras el transductor (6) se encarga de cuantificar la magnitud del desplazamiento de la carga, el acelerómetro (7) mide la dirección en que dicho desplazamiento fue llevado a cabo.

La lectura del desplazamiento de la barra es examinada por una unidad de procesamiento (4) tipo microcontrolador, encargada de regular la activación de la bocina (9) y la alarma visual (1) según el nivel de riesgo identificado. De esta manera, si se reconoce alto riesgo, un color rojo sería emitido a la par con un sonido ruidoso; pero de lo contrario, si el ejercicio es llevado a cabo con normalidad y sin riesgo alguno, un color verde sería emitido sin ninguna alarma auditiva.

Se contempla el uso de alimentación eléctrica con cable (4), conectada directamente a la unidad de procesamiento (3). Cabe aclarar que la alimentación de la bocina (9) y la alarma visual (1) sería regulada por la unidad de procesamiento (3) a través de un módulo específico para el control de este tipo de elementos (2). Por otro lado, el transductor (6) obtendría energía eléctrica directamente de la unidad de procesamiento (4). El acelerómetro (7) se alimentaría de una batería de botón<sup>20</sup> para cumplir con su funcionamiento.

Todos los elementos estáticos son aferrados a la estructura de soporte mediante el acople (5) en una posición que no interfiera con el desarrollo normal del ejercicio. Por otro lado, el acelerómetro (7) se encuentra anclado a la barra y moviéndose libremente con ella.

Hasta dónde se sabe, no se tienen registros sobre alguna aplicación cooperativa entre sensores CPT y acelerómetros para la medición de variables cinemáticas en las 3 dimensiones. Sin embargo, se considera confiable el uso de este concepto puesto que aprovecha la fiabilidad los acelerómetros para medir orientaciones espaciales y la alta exactitud de los transductores de posición con cable para medir desplazamientos lineales.

### Soluciones brindadas

- Adaptabilidad: Los componentes de este diseño se ubican en una manera poco interferente con el desarrollo y la asistencia del ejercicio de la prensa de banco. Tampoco se producirían interferencias con la estructura o funcionamiento del soporte mecánico.
- Medición: Se rastrea en tiempo real, las variables cinemáticas de la barra en las 3 dimensiones.
- Medio de Alerta: Se alerta al observador sobre el riesgo que perciba el levantador durante el desarrollo del ejercicio, mediante una alarma visual (1) y una auditiva (9).
- Alimentación: Se utiliza alimentación eléctrica por baterías, y algunas derivaciones de esta para energizar componentes de menor consumo.

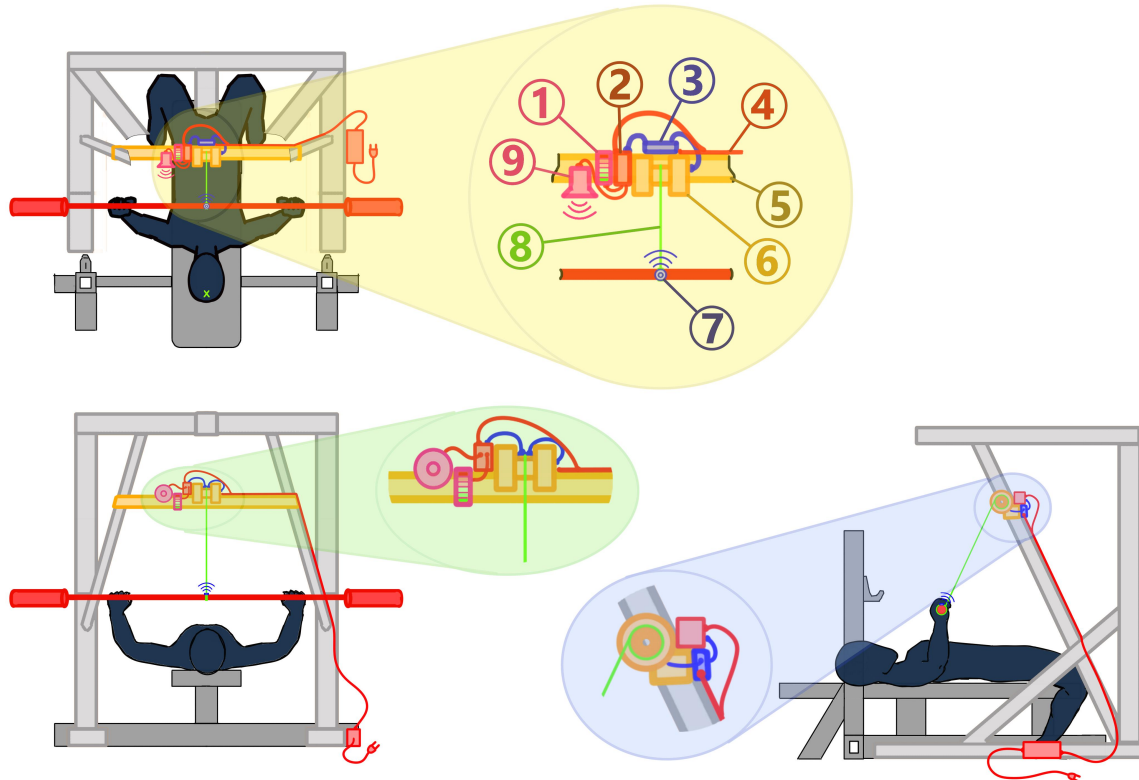
### Contras

---

<sup>20</sup>Pilas usadas comúnmente en relojes



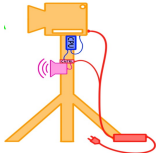
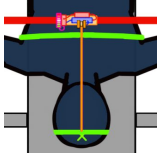
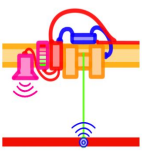
- Se debe tener cuidado con enredar cable del transductor (8).



**Figura 3-63.:** Boceto conceptual de la tercera idea compuesta desarrollada. 1: Alarma visual, 2: Módulo de control de la alarma visual y auditiva, 3: Unidad de procesamiento, 4: Suministro eléctrico por cable, 5: Acople a la estructura de soporte, 6: Transductor de posición con cable, 7: Acelerómetro, 8: Cable del transductor, 9: Bocina. Imagen elaborada por el autor.

### Selección del concepto

**Aplicación del Modelo de decisión** La selección del concepto más adecuado para complementar la asistencia del observador en el ejercicio de la prensa de banco se llevó a cabo mediante la herramienta "diagrama de Pugh". En la tabla **3-17** se expone la valoración numérica de la efectividad de cada uno de los diseños presentados anteriormente para responder con las demandas de cliente.

Val (CR's) Customer Requirements	 1er C.C.	 2do C.C.	 3er C.C.
5.0 Adaptabilidad al contexto de BP Asistido	+	-	*
5.0 Eficacia de comunicación de Necesidades	-	-	*
2.0 Resistencia Ambiental	=	=	*
4.0 Frecuencia de Muestreo	-	=	*
4.0 Alta Resolución	-	=	*
1.0 Contaminación Auditiva	=	+	*
1.0 Diseño Estético	-	-	*
2.0 Diseño Económico	-	+	*
1.0 Comodidad	+	-	*
4.0 Alimentación Confiable	=	-	*
	<b>POSITIVOS:</b> 6.0	<b>3.0</b>	
	<b>NEGATIVOS:</b> 16.0	<b>16.0</b>	

**Tabla 3-17.:** Diagrama de Pugh implementado para seleccionar el mejor concepto de diseño electrónico. Tabla elaborada por el autor.

**Diseño final** Mediante el esquema de la tabla **3-3** se pudo escoger la idea más apta para atender las demandas de cliente. El tercer concepto compuesto (figura **3-63**) fue seleccionado como el diseño final del "complemento electrónico". Cabe agregar que ninguna modificación fue contemplada sobre este diseño.

### Características de ingeniería

Con el fin de establecer el modelo matemático del concepto y detectar algunos requerimientos y condiciones para el funcionamiento del "complemento electrónico", los 7 pasos sobre "características de ingeniería" sugeridos por G.Dieter y L.Schmidt [20] fueron aplicados sobre el diseño conceptual seleccionado (figura **3-63**). Esto permitiría entre otras cosas, guiar la selección de algunos componentes y medidas.

**Determinar el estado del problema** Se determinaron los siguientes parámetros de entrada y resultados esperados:

- **Entradas:**

- Referencias comerciales de sensores CPT y acelerómetros.

- Exactitud de técnicas de medición implementadas para el estudio cinemático del ejercicio de la prensa de banco.
- Referencias comerciales de microcontroladores.
- Medidas de la estructura de soporte y barra para pesas.
- Rango de desplazamiento de la carga durante el ejercicio de la prensa de banco.
- Medidas antropométricas.

▪ **Salidas (propósito):**

- Concretar las medidas del cilindro y cable del sensor CPT.
- Concretar los parámetros de funcionamiento de los sensores y microcontrolador (frecuencia de muestreo y resolución).

**Definir los límites del modelo** Se establecieron las dimensiones espaciales máximas del complemento electrónico fundamentadas en la compatibilidad con el ejercicio de la prensa de banco y el soporte mecánico diseñado anteriormente. Para determinar dichas dimensiones, se revisó el modelo CAD del diseño mecánico ubicado en el contexto del desarrollo del ejercicio de la prensa de banco (equipo para prensa de banco, levantador y observador) presentado en la figura **3-64**. Esto con el fin de encontrar un rango de medidas, con las cuales el complemento electrónico podría ser ubicado en una posición acorde con el boceto del diseño conceptual seleccionado (figura **3-63**).



**Figura 3-64.:** Renderizado del diseño mecánico, ubicado en el contexto dónde ejercería sus funciones en conjunto con el levantador y el equipo para prensa de banco. El modelo de equipo para prensa de banco, a escala real, fue desarrollado por A.Yousefi [?] (el color fue modificado), y el muñeco de proporciones humanas fue elaborado por S.Winther [?] (escalado para representar las medidas de una persona de 1.80m). Imagen elaborada por el autor mediante la herramienta de renderizado de "Solidworks".

Dimensiones máximas del complemento electrónico:

- Largo del "acople a la estructura de soporte": 700mm, suficientes para ubicar el complemento electrónico entre los soportes indicados sobre el boceto de la figura 3-63, a una altura que no incomode al levantador.
- Ancho de la base en el "acople a la estructura de soporte" para la ubicación de componentes: 150mm, suficientes para acomodar los elementos que constituyan al complemento electrónico.

- Diámetro del cilindro del "transductor de posición con cable": 45mm, considerando que este elemento ocupará máximo la mitad del ancho de la base para la ubicación de componentes.
- Extensión límite de la cuerda en el transductor de posición con cable: 3000mm, valor exagerado con la intención de proteger el complemento electrónico de un mal uso del equipo.

**Leyes físicas pertinentes** Se consideraron las variables relacionadas con el concepto de caída libre como punto de partida para determinar los parámetros de frecuencia de muestreo y resolución que el complemento electrónico debería tener. Esto permitiría guiar más adelante la selección de los elementos comerciales importantes en este diseño electrónico, cómo lo son los sensores y el microcontrolador. Las ecuaciones 3-17 y 3-18 fueron destacadas en este aspecto, con la siguiente notación: posición vertical "Y", posición vertical inicial "Y<sub>0</sub>", velocidad vertical "V<sub>y</sub>", velocidad vertical inicial "V<sub>0</sub>", tiempo "t" y gravedad "g".

$$Y = -\frac{1}{2}gt^2 + V_0t + Y_0 \quad (3-17)$$

$$V_y = -gt + V_0 \quad (3-18)$$

Por otro lado, el concepto de potencia eléctrica y consumo energético serán útiles para la selección de un suministro eléctrico adecuado. Las ecuaciones 3-19 y 3-20 fueron destacadas en este aspecto, con la siguiente notación: Potencia "P", Voltaje "V", Corriente "I", Energía "E" y tiempo "t".

$$P = V * I \quad (3-19)$$

$$E = P * t \quad (3-20)$$

**Identificar suposiciones** En busca de simplificar el modelo matemático del diseño del complemento electrónico, se contemplaron las siguientes suposiciones:

- El movimiento de la barra es exclusivamente vertical, en dirección perpendicular al tórax del levantador.
- Se considera una magnitud de aceleración gravitacional de  $10 \frac{m}{s^2}$
- Se ignora el grosor del cable en el sensor "CPT".
- Se considera un acople directo entre el eje de rotación del encoder y el cilindro del sensor "CPT".

**Construir el modelo** Se inició el análisis matemático del concepto, reflexionando sobre el rango de error, de 0.2mm a 0.075mm, en la medición de desplazamiento de la barra con la técnica "CPT" presentado en la tabla **3-15**. Razón por la cual se buscó un desempeño similar por parte del complemento electrónico, planteando que: la carga debería llegar desplazarse máximo medio milímetro (0.5mm) en caída libre sin que el complemento electrónico lograra detectar este cambio de posición. Esto debido a que el mayor error en la medición de desplazamiento correspondería con el efecto la gravedad, siendo esta la máxima aceleración que la carga podría percibir.

#### **Cálculo de la frecuencia de muestreo:**

Se contempló un escenario en dónde la carga fuera liberada desde el reposo, razón por la cual, de la ecuación de posición en caída libre 3-17 se asignó un valor de cero en las variables de posición inicial ( $Y_0$ ) y velocidad inicial ( $V_0$ ). De esto procedimiento se obtuvo la expresión 3-21, de la que se puede despejar "t" para calcular el tiempo que la carga se demoraría en recorrer la distancia "y" en caída libre desde el reposo (ecuación 3-22). Habiendo reemplazado sobre la ecuación anterior los valores de  $Y = 0,0005mm$  (0.5mm) y  $g = -10\frac{m}{s^2}$ , se pudo determinar mediante el valor de "t" que: el valor máximo de periodo de muestreo que deberá ofrecer el complemento electrónico para cumplir con la condición planteada es de **5 milisegundos**, o de mínimo **200Hz** como frecuencia mínima de muestreo teniendo en cuenta el criterio de Nyquist<sup>21</sup>.

$$Y = -\frac{1}{2}gt^2 \quad (3-21)$$

$$t = \sqrt{\frac{-2Y}{g}} \quad (3-22)$$

#### **Cálculo de diámetro y pulsos de encoder:**

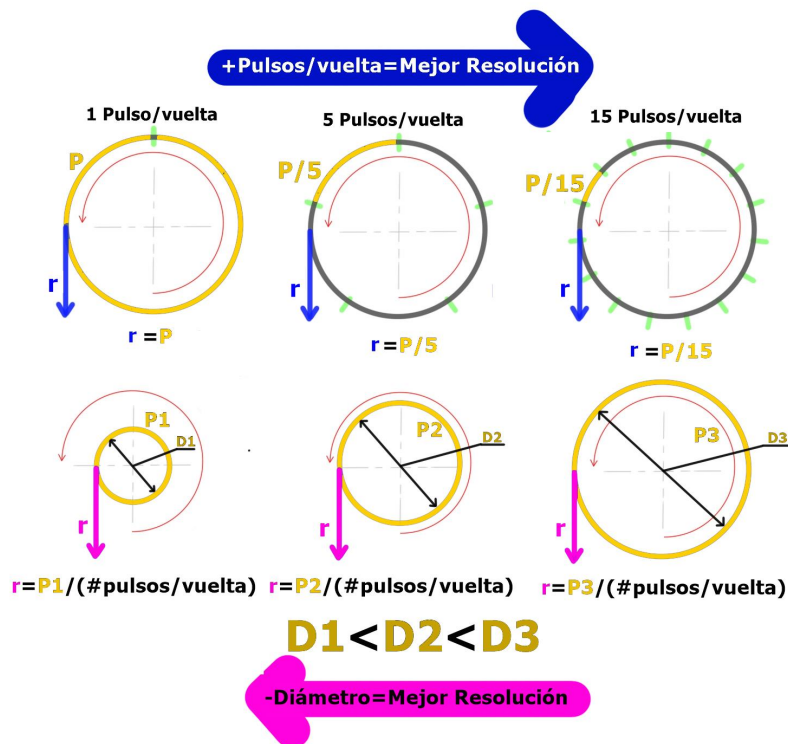
En busca de cumplir con la condición de 0.5 milímetros como mínima resolución, se analizó el funcionamiento del transductor de posición con cable. Logrando de esta manera formular una ecuación mediante la cual se pudiera calcular la resolución de un sensor "CPT" a partir de 2 parámetros: El diámetro del cilindro donde se enrolla el cable y los pulsos por vuelta que son emitidos por el encoder. Los cuales aportan de diferente manera a la resolución del sensor.

Se encontró que la resolución de un CPT para medir distancia depende directamente de la longitud que el cable haya tenido que recorrer sobre perímetro del cilindro en el que se encuentra enrollado para desenvolverse de él. De esta manera, los parámetros de diámetro del cilindro y pulsos por vuelta del encoder actúan conjuntamente para hacer un cálculo

<sup>21</sup>La frecuencia mínima de muestreo debe ser por lo menos del doble de la frecuencia de la señal medida, para evitar aliasing

”por partes” de la distancia que el cable se haya estirado. La magnitud de cada ”parte” de la distancia corresponde a la resolución con la que el sensor mediría el desplazamiento del cable.

Puesto que la resolución del sensor depende directamente del perímetro recorrido por el cable, se deduce que entre más pequeño sea el diámetro del cilindro, menor incertidumbre se tendrá sobre la medida. Asimismo, la resolución también será mejor entre más certeza se tenga sobre la rotación de dicho cilindro. El giro del cilindro es calculado con menor incertidumbre entre mayor sea la cantidad de divisiones realizadas sobre él a través de los pulsos por vuelta que ofrezca el encoder. El efecto de estos parámetros sobre la resolución se presenta en la figura 3-65



**Figura 3-65.:** Contraste del aporte del diámetro del cilindro y pulsos de encoder a la resolución del sensor ”TCP”. En azul se expresa la resolución ( $r$ ) resultante de aplicar diferente cantidad de pulsos por vuelta para dividir el perímetro ( $P$ ). En violeta se expresa la resolución ( $r$ ) resultante de utilizar diferentes diámetros ( $D1, D2, D3$ ) de cilindro sin divisiones en el perímetro correspondiente ( $P1, P2, P3$ ). Entre mayores sean los pulsos por vuelta, y menor sea el diámetro del cilindro, la resolución será mejor. Imagen elaborada por el autor.

Con el fin de determinar opciones de diámetro y pulsos por vuelta que conjuntamente cumplan con una resolución de máximo 0.5 milímetros, se formuló la ecuación 3-23. En la cual

se contempla el diámetro del cilindro (D) y el número de pulsos por vuelta (N) para calcular la resolución resultante de aplicar este par de parámetros.

$$r = \sqrt{\frac{\pi * D}{N}} \quad (3-23)$$

Debido a la gran cantidad de alternativas válidas se desarrolló la tabla **3-18**. En la cual se presenta la resolución (en milímetros) resultante de combinar los valores de pulsos por vuelta más frecuentes en encoders rotacionales (1, 2, 20, 60, 90, 360, 400 y 600 pulsos por vuelta), con un rango de diámetros de cilindro entre 10mm y 45mm.

P.V \ D	10	15	20	25	30	35	40	45
1	31,42	47,12	62,83	78,54	94,25	109,96	125,66	141,37
2	15,71	23,56	31,42	39,27	47,12	54,98	62,83	70,69
20	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07
60	0,52	0,79	1,05	1,31	1,57	1,83	2,09	2,36
90	0,35	0,52	0,70	0,87	1,05	1,22	1,40	1,57
360	0,09	0,13	0,17	0,22	0,26	0,31	0,35	0,39
400	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,27	0,31	0,35
600	0,05	0,08	0,10	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24

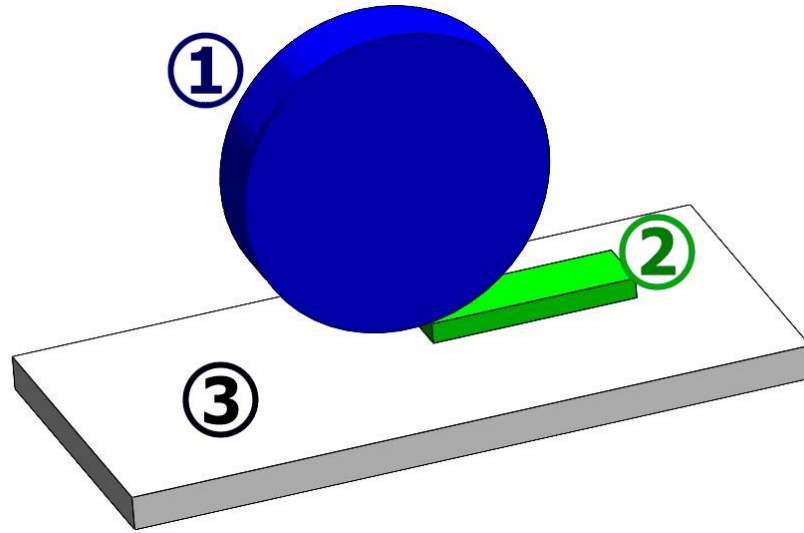
**Tabla 3-18.:** Valores de resolución correspondiente con la aplicación de los pulsos por vuelta más frecuentes (P.V) y un rango de diámetros de cilindro (D). En verde se presentan los valores de resolución adecuados, en rojo los que no. Todos los valores en milímetros. Tabla elaborada por el autor

Mediante la tabla **3-18** se pudo determinar que para cualquier cilindro de diámetro menor a 45 milímetros se cumplirá la condición de resolución siempre que el encoder disponga de más de 360 pulsos por vuelta.

**Computación y verificación** Se construyó el modelo CAD del concepto básico de funcionamiento de un sensor TCP. El modelo desarrollado se presenta en la figura **3-66**, el cual consiste de un suelo (3) tomado como referencia espacial, una lámina (2) para representar el desplazamiento del cable y el cilindro (1) en dónde se encontraría enrollado el cable.

Esta representación del transductor de posición con cable permitiría corroborar la resolución resultante de asignarle al cilindro los diámetros expuestos en la tabla **3-18** y la fracción de rotación correspondiente con los pulsos por vuelta del encoder ( $\frac{1}{1}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{20}$ ,  $\frac{1}{60}$ ,  $\frac{1}{90}$ ,  $\frac{1}{360}$ ,  $\frac{1}{400}$  o  $\frac{1}{600}$ ).

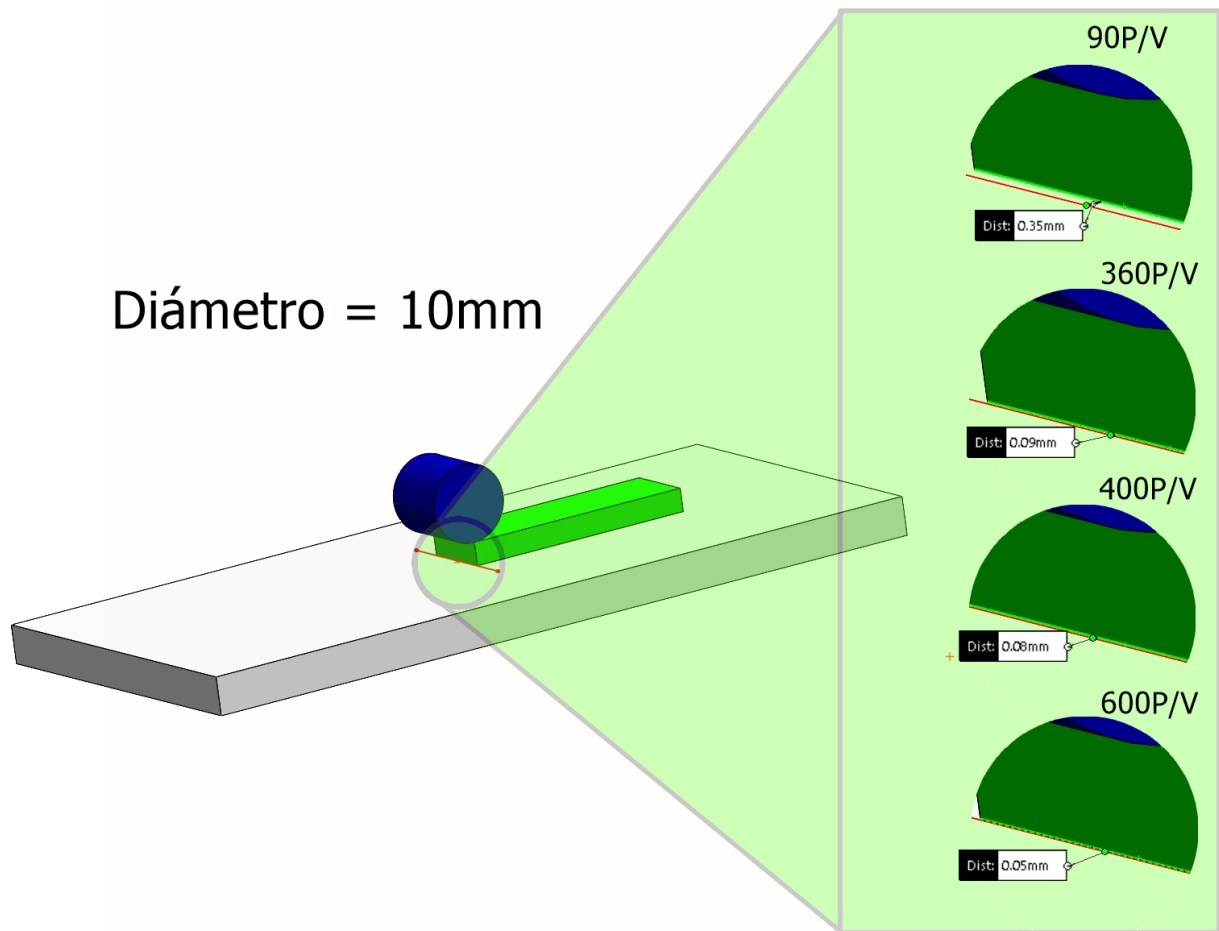




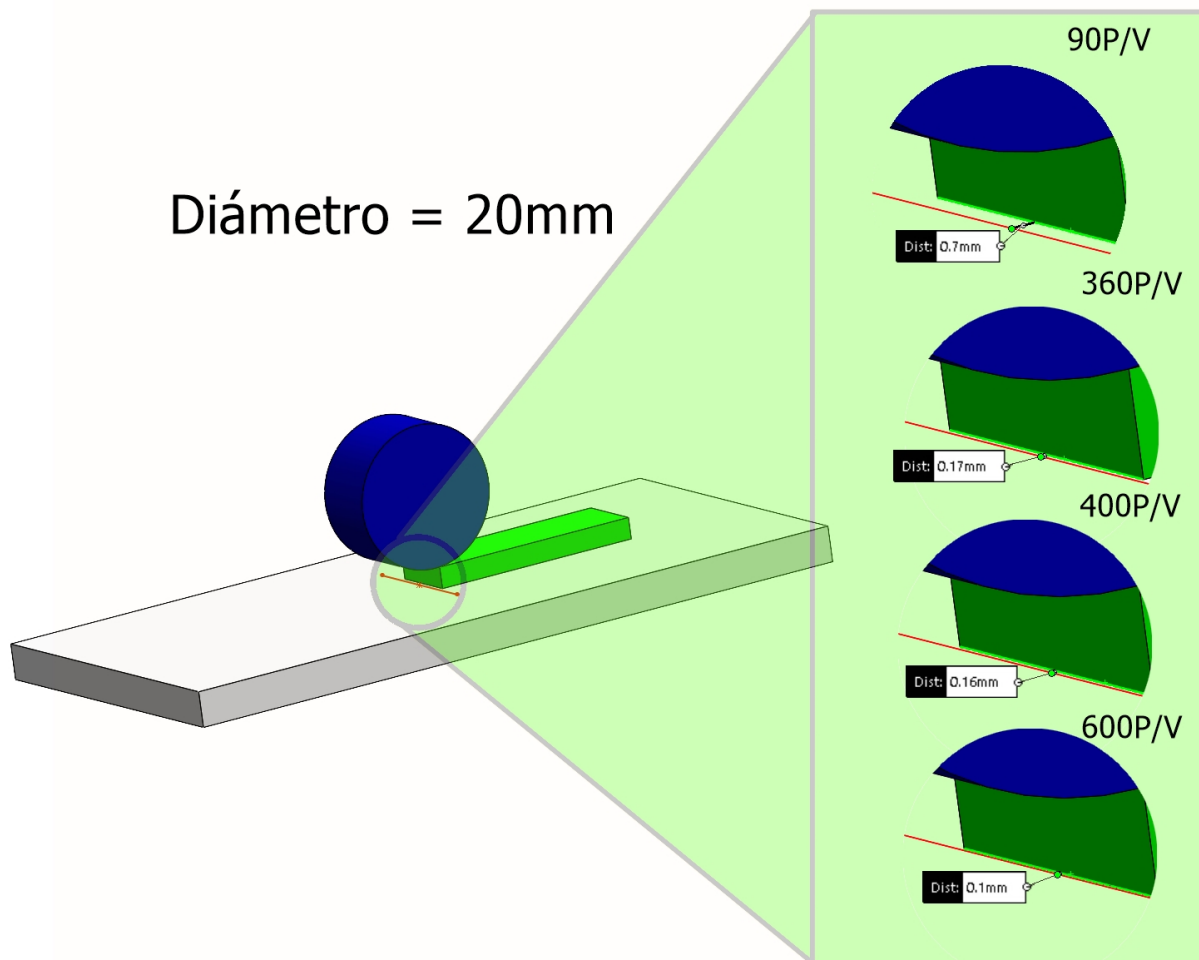
**Figura 3-66.:** Modelo del concepto de un sensor "TCP" elaborado con la herramienta de modelado de piezas y ensamblaje de Solidworks. 1: Cilindro, 2: Cable, 3: suelo. Imagen elaborada por el autor.

**Validación del modelo** Con la intención de validar la resolución resultante de aplicar los valores expuestos en la tabla **3-18**, se desarrolló un análisis sobre el ensamblaje CAD de la figura **3-66**, en el cual, según la cantidad de pulsos por vuelta, se le asignó al cilindro un giro de  $4^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $0.9^\circ$  o  $0.6^\circ$  para representar la fracción de giro entre pulso y pulso medidos por un encoder de 90, 360, 400 y 600 pulsos por vuelta respectivamente. De manera similar, para cada fracción de giro, el diámetro del cilindro fue alterado para validar el desempeño de un "CPT" con medidas de 10, 20, 35 y 45 milímetros.

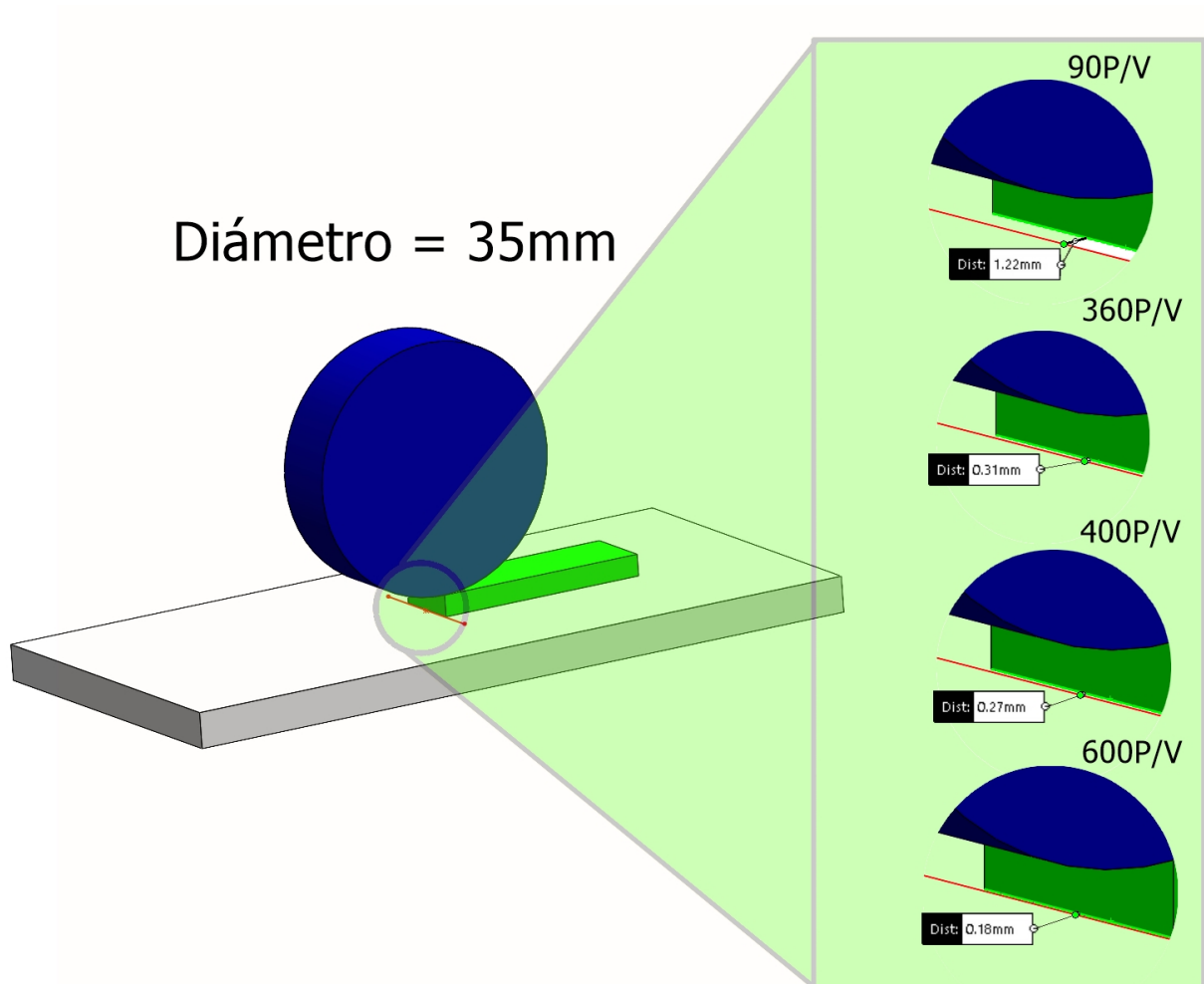
Para cada combinación de pulsos por vuelta y diámetro de cilindro, el cable (representado con un objeto sólido) se trasladó una distancia lineal acorde con la resolución expresada en la tabla **3-18**, gracias a la relación de posición mecánica que le fue asignada con el diámetro del cilindro. Se logró comprobar el modelo matemático formulado anteriormente mediante la medición de dicho desplazamiento sobre las diferentes configuraciones desarrolladas sobre el ensamblaje, en las figuras **3-67**, **3-68**, **3-69** y **3-70**.



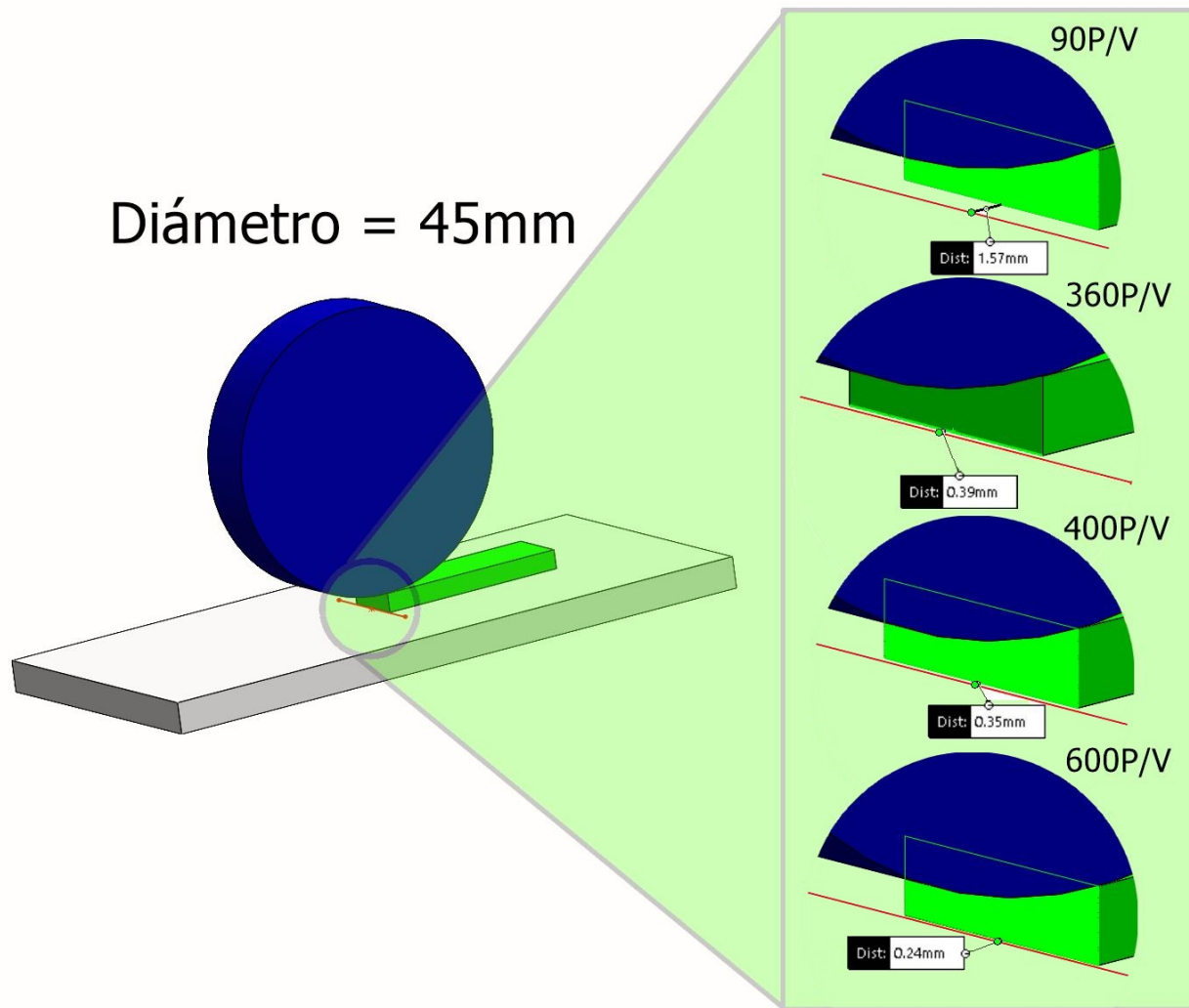
**Figura 3-67.:** Desplazamiento del cable para un sensor "CPT" con un cilindro de 10 milímetros de diámetro. Análisis realizado sobre el ensamble conceptual del transductor de posición con cable hecho en Solidworks. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-68.:** Desplazamiento del cable para un sensor "CPT" con un cilindro de 20 milímetros de diámetro. Análisis realizado sobre el ensamble conceptual del transductor de posición con cable hecho en Solidworks. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-69.:** Desplazamiento del cable para un sensor "CPT" con un cilindro de 35 milímetros de diámetro. Análisis realizado sobre el ensamble conceptual del transductor de posición con cable hecho en Solidworks. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-70.:** Desplazamiento del cable para un sensor "CPT" con un cilindro de 45 milímetros de diámetro. Análisis realizado sobre el ensamble conceptual del transductor de posición con cable hecho en Solidworks. Imagen elaborada por el autor.

## PDS

Sobre el diseño conceptual del complemento electrónico se concretaron los siguientes aspectos técnicos:

- Identificación del producto:
  - Nombre: Complemento Electrónico
  - Funciones básicas:

- Hacer seguimiento de las variables cinemáticas en el ejercicio de la prensa de banco.
- Apoyar la detección de una situación de riesgo durante la ejecución del ejercicio de la prensa de banco.
- Favorecer la comunicación de las necesidades de asistencia por parte del levantador hacia el observador.
- Características especiales:
  - Compatible con el equipo tradicional para la prensa de banco.
  - Compatible con el desarrollo normal del ejercicio de la prensa de banco.
  - Compatible con la supervisión y la asistencia del ejercicio de la prensa de banco, brindada en conjunto por el observador y el soporte mecánico diseñado anteriormente.
- Actuadores:
  - Alarma auditiva.
  - Alarma visual.
  - Muelle de torsión.
- Sensores:
  - Transductor de posición con cable.
  - Acelerómetro.
- Acometida energética: Por definir.
- Ambiente de trabajo: Uso exclusivo en interiores.
- Entrenamiento de usuario requerido:
  - Conocimiento básico del equipo la prensa de banco, el soporte mecánico diseñado anteriormente y la instalación del "complemento electrónico".
  - Conocimiento básico del funcionamiento del "complemento electrónico".
- Descripción física:
  - Dimensiones externas generales: 700X150X150mm.
  - Restricciones de uso: Implementación exclusiva en conjunto con el "Soporte Mecánico", en el contexto de la supervisión de la Prensa de Banco.
- Requerimientos sociales, políticos y legales:
  - Estándares:
    - Normativa IPC para circuitos electrónicos.

- Normativa IP para protección de elementos electrónicos.
- Responsabilidades para con el producto: Utilizar exclusivamente en la tarea para la que fue diseñado.
- Especificaciones de manufactura:
  - Requerimientos de manufactura: Capacidad de manufactura de una tarjeta electrónica de desempeño "IPC Clase 1" [?].
  - Protección: Protección frente partículas y líquidos grado IP-10.
  - Proveedores: Proveedores de actuadores de luz y sonido, sensores, microcontroladores.

## Revisión del diseño

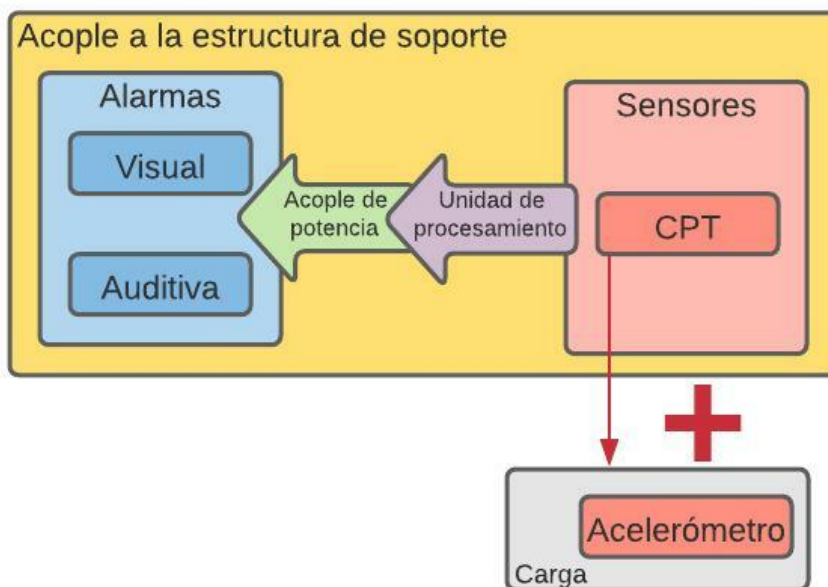
Según G.Dieter y L.Schmidt [20], a esta altura del proyecto se debe hacer una identificación de estrategias para minimizar tiempo de ciclo y los recursos de material, equipo y dinero necesarios para conformar el proyecto. Sin embargo, dichos factores serán desatendidos, dado que no comprometen directamente el diseño del producto que se presenta.

## Materialización del diseño

Se formalizaron los aspectos técnicos que describirán por completo este diseño electrónico:

## Arquitectura del producto

Reflexionando sobre tareas puntuales dentro del diseño realizado, se establecieron 5 conjuntos para diferenciar los elementos que constituirán el complemento electrónico. Estos conjuntos se organizaron de la forma cómo se muestra en el diagrama la figura **3-71** según su ubicación espacial dentro del proyecto y su correlación con los demás grupos de elementos.



**Figura 3-71.:** Esquema de organización del complemento electrónico. Imagen elaborada por el autor.

### Conjuntos:

- **Acople a la estructura de soporte (subconjunto):** Este subconjunto se encarga esencialmente de asegurar el complemento electrónico sobre el soporte mecánico.

#### Funciones:

- Ubicar los componentes del complemento mecánico en la posición concretada sobre el boceto conceptual de la figura 3-63.
- Brindar un soporte dónde los demás conjuntos (alarmas, sensores, unidad de procesamiento y acople de potencia) se puedan organizar y funcionar.
- Proteger el complemento electrónico frente a partículas y líquidos, de manera acorde con el grado de protección definido en las especificaciones de diseño del producto (IP-10).

#### Interacciones:

- Soporta físicamente los conjuntos de alarmas, sensores, unidad de procesamiento y acople de potencia.
- Se mantiene unido a la estructura de soporte.

#### Componentes:

- Elemento "5" en la figura 3-63.



- **Alarmas (subconjunto):** Medio comunicativo entre las necesidades del levantador y el observador.

**Funciones:**

- Advertir sobre el nivel de riesgo durante el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco a través de alarmas visuales.
- Advertir sobre el nivel de riesgo durante el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco a través de alarmas sonoras.

**Interacciones:**

- Es controlado por la unidad de procesamiento.
- Su suministro energético es regulado por el acople de potencia, según lo indicado por la unidad de procesamiento.
- Interactúa constantemente con el observador, para quien van dirigidas las alertas visuales y sonoras.

**Componentes:**

- Elemento "9" (bocina) en la figura **3-63**.
- Elemento "1" (alarma visual) en la figura **3-63**.

- **Sensores (subconjunto):** Se encargan de rastrear el comportamiento cinemático de la barra durante el ejercicio de la prensa de banco.

**Funciones:**

- Hacer un seguimiento de los patrones cinemáticos de la barra (posición, velocidad y aceleración).

**Interacciones:**

- Mantiene un contacto directo con la barra, a la cual le hace seguimiento sobre su comportamiento cinemático.
- Transmite hacia la unidad de procesamiento, los valores medidos sobre la posición, velocidad y aceleración de la barra.

**Componentes:**

- Elemento "6" (transductor de posición con cable, CPT) en la figura **3-63**, el cual se ubica físicamente sobre el acople a la estructura de soporte, pero conservando una conexión física con la carga.
- Elemento "7" (acelerómetro) en la figura **3-63**, ubicado directamente sobre la carga.

- **Unidad de procesamiento (subconjunto):** Se encarga de controlar los procesos llevados a cabo al interior del complemento electrónico.

**Funciones:**

- Adquirir la información recolectada por los sensores.
- Procesar la información recolectada por los sensores.
- Reconocer según la información adquirida, los indicios sobre el nivel de riesgo que el usuario experimente durante el ejercicio de la prensa de banco.
- Gestionar el manejo de las alarmas de manera acorde con el nivel de riesgo que haya sido reconocido.

**Interacciones:**

- Recibe la información recolectada por los sensores.
- Las señales emitidas por la unidad de procesamiento para el manejo de las alarmas son transmitidas directamente al acople de potencia.

**Componentes:**

- Elemento "3" (unidad de procesamiento) en la figura **3-63**.
- **Acople de potencia (subconjunto):** Es el medio a través del cual, la unidad de procesamiento logra un manejo de las alarmas.

**Funciones:**

- Regular la alimentación de las alarmas de manera acorde con las señales emitidas por la unidad de procesamiento.

**Interacciones:**

- Recibe las señales de control de la unidad de procesamiento.
- Regula la alimentación de las alarmas visual y auditiva.

**Componentes:**

- Elemento "2" (módulo de control de la alarma visual y auditiva) en la figura **3-63**.
- **Complemento electrónico (conjunto global):** Es el medio a través del cual, el observador es asistido en la identificación de riesgos durante el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco.

**Funciones:**

- Realizar un seguimiento de la carga durante el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco.
- Reconocer indicios de una situación de riesgo durante el ejercicio de la prensa de banco.
- Advertir al observador sobre el nivel de riesgo durante el desarrollo del ejercicio de la prensa e banco.

**Interacciones:**

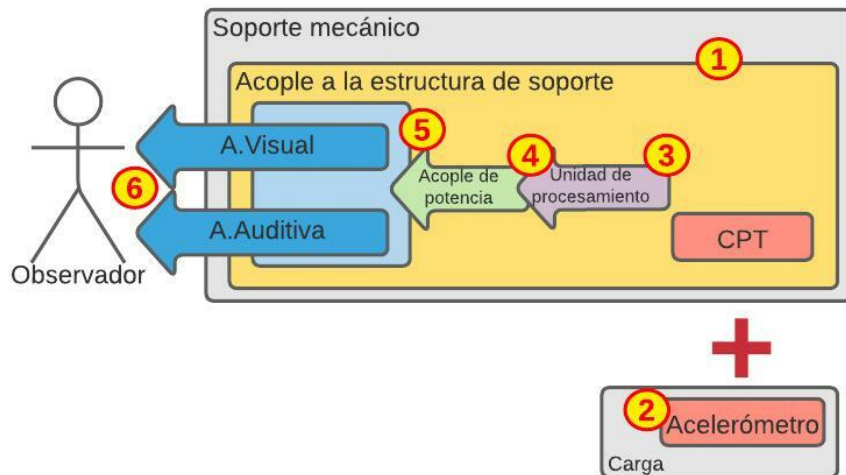
- Mantiene un contacto directo con la carga implicada en el ejercicio de la prensa de banco.
- Mantiene una relación directa con el observador, hacia quien van dirigidas las alarmas de riesgo.

### Componentes:

- Todos los elementos expuestos en la figura 3-63.

### Diseño de piezas y componentes

De la propuesta conceptual final (figura 3-63) se determinaron 6 relaciones entre subconjuntos. Estas se presentan en el esquema de la figura 3-72, mediante el cual se explicará con mayor detalle las características de pieza más importantes. Además, por cada relación se indicarán los elementos comerciales seleccionados.



**Figura 3-72.:** Esquema de relaciones entre subsistemas, cada uno destacado con un color indicativo. Se resaltan en círculos rojos con fondo amarillo las 6 relaciones esenciales entre subconjuntos. Imagen elaborada por el autor.

- **Relación No.1:** Se da en el "soporte mecánico", sobre cuya estructura se encuentra acoplado firmemente el "acople a la estructura de soporte". La importancia de esta relación radica en que mediante esta, los demás subconjuntos serán ubicados en una posición que no interfiera con el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco, y que además sea apropiada para el funcionamiento del complemento electrónico.

Para este fin se considera el mecanizado de una lámina de PVC o nylon para conformar una base sobre la cual se ubicaran los componentes. Respecto del aseguramiento de dicha base a la estructura de soporte, se contempla un mecanismo con tornillo, que asegure el "complemento electrónico" al "soporte mecánico" mediante presión.

- **Relación No.2:** Se da entre el acelerómetro y la carga. En esta relación, mediante el acelerómetro se realiza una medición de la inclinación de la barra.

Para lograr dicha medición, se considera la implementación de un acelerómetro bluetooth. Esta decisión se fundamenta en su reducido tamaño y en las altas frecuencia de muestreo que ofrecen; cualidades que en conjunto permiten un apropiado seguimiento temporal de la barra sin interferir con el desarrollo normal del ejercicio de la prensa de banco.

- **Relación No.3:** Se da entre la unidad de procesamiento con el acelerómetro y el transductor de posición con cable. En esta relación, los datos captados por ambos sensores son transmitidos hacia el equipo seleccionado para procesar esta información.

Se considera la implementación de un microcontrolador que disponga de los periféricos que le permitan recibir la información proveniente de los sensores seleccionados. De esta manera, dicho microcontrolador deberá ser dotado con un módulo de comunicación bluetooth en concordancia con el acelerómetro contemplado para la relación No.2. Por otro lado, la unidad de procesamiento deberá disponer de las interrupciones adecuadas para registrar los pulsos provenientes del encoder en el transductor de posición con cable. Cabe agregar que dicho transductor será diseñado, debido a su alto costo comercial y disponibilidad con niveles lógicos de voltaje incompatibles con el manejo por microcontroladores.

- **Relación No.4:** Se da entre la "unidad de procesamiento" y el "acople de potencia". En esta relación, las señales de control enviadas por el microcontrolador (seleccionado como unidad de procesamiento en la relación No.3) son traducidas en un manejo correspondiente con mayor acometida eléctrica.

Para esta tarea se contempla el uso de relés debido a la simplicidad en su manejo; especialmente a través de los módulos relé que facilitan la conexión de componentes.

- **Relación No.5:** Se da entre el "acople de potencia" y las alarmas. A través de esta relación se maneja la alimentación de la alarma visual y la auditiva.

En esta relación aplica la misma selección expresada en la relación No.4, sobre la adaptación de las señales de control en unas aptas para el manejo de potencia sobre la alimentación de las alarmas.

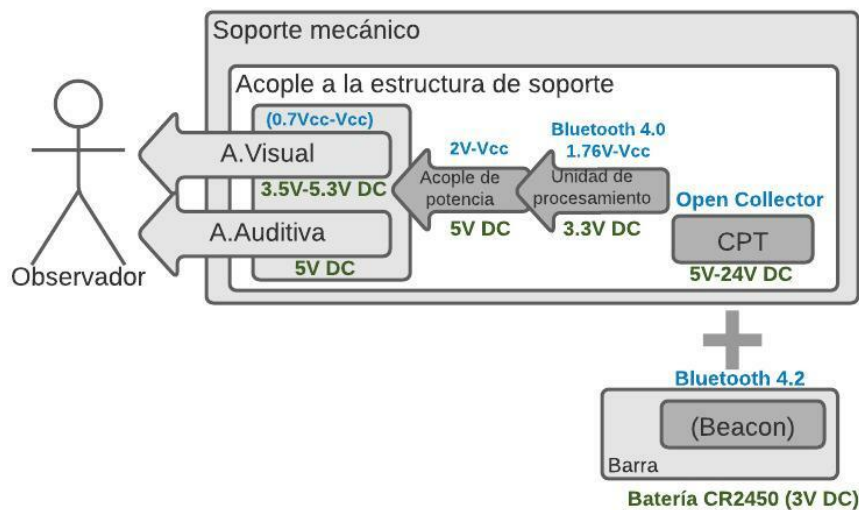
- **Relación No.6:** Se da entre las alarmas y el observador. En esta relación, el nivel de riesgo detectado por el complemento electrónico es comunicado hacia el observador mediante actuadores visuales y auditivos.

Se espera lograr una efectiva comunicación con el observador del ejercicio de la prensa de banco mediante tiras de diferentes colores LED y un zumbador. La activación de estos elementos se dará conforme el nivel de riesgo manifestado durante el desarrollo del ejercicio.

### Diseño paramétrico de partes

Se concretaron las dimensiones más importantes, los materiales y suministros de las piezas faltantes. A continuación se expondrán las decisiones tomadas sobre las piezas de diseño propio y elementos comerciales seleccionados.

Cabe agregar que la selección de componentes fue llevada a cabo teniendo en cuenta una compatibilidad entre los niveles lógicos de voltaje y la alimentación eléctrica que cada componente requiere. En el esquema de la figura 3-73 se expone para cada subconjunto el voltaje lógico y de alimentación acorde con el elemento comercial considerado hasta el momento.



**Figura 3-73.:** Esquema de compatibilidad entre los elementos comerciales seleccionados para cada subconjunto. En verde: Voltaje de alimentación, en azul: Protocolo de comunicación o nivel lógico de voltaje de entrada y salida. Imagen elaborada por el autor.

#### ■ Acople de potencia:

##### ● Módulo Relé:

- Voltaje de alimentación: 5V
- Señal de entrada: Niveles de tensión lógica TTL, 0V a 0.8V como "0" lógico y 2V a 5V como "1" lógico
- Señal de Salida: Control de voltaje hasta 10A 250VAC o 10A 30VDC.

#### ■ Acople a la estructura de soporte:

##### ● Base:

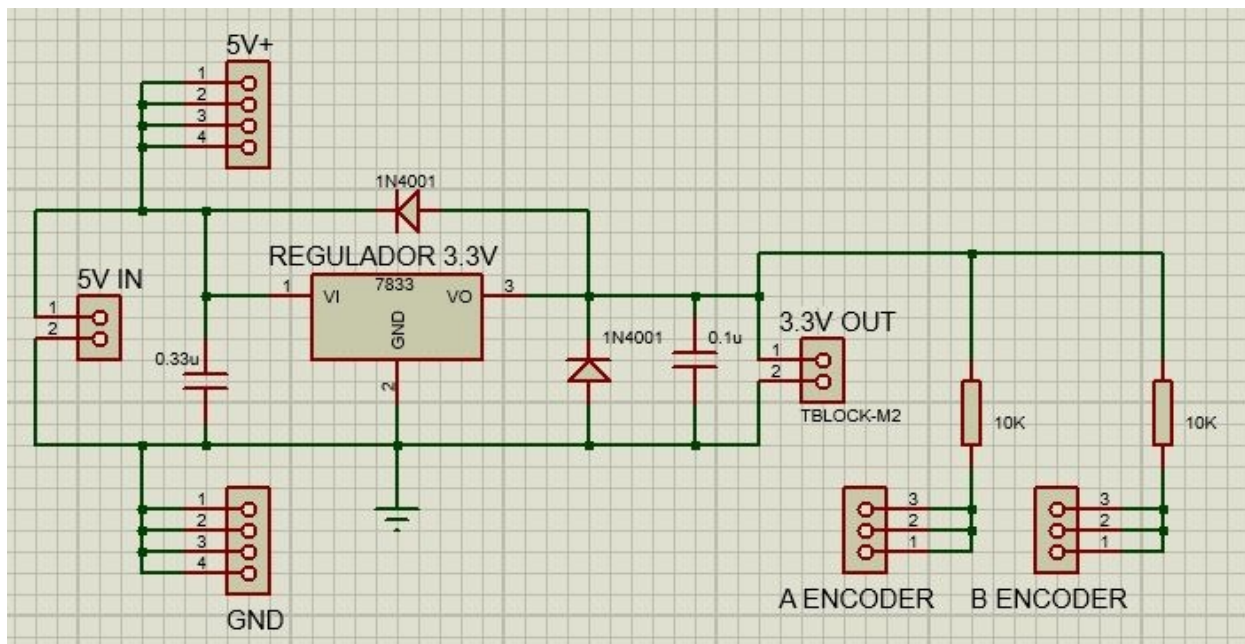
- Material: Plástico de ingeniería.

- Suministro: Lámina de PVC o nylon de 4mm.
- Dimensiones: 114 X 200 x 4mm.
- **Brazos:**
  - Material: Plástico de ingeniería.
  - Suministro: Barras de PVC o nylon de 1 pulgada de diámetro.
  - Dimensiones: Largo de 241 milímetros
- **Alarmas:**
  - **Módulo zumbador:**
    - Voltaje de alimentación: 3.3V a 5V DC.
    - Señal de entrada: 3.3V a 5V DC.
    - Señal de Salida: Potencia acústica de 90 a 110 dB.
  - **Cinta led:**
    - Voltaje de alimentación: 3.5V a 5.3V DC.
    - Señal de entrada: del 70 % al 100 % del voltaje de alimentación.
    - Señal de Salida: Intensidad luminosa de 600 a 900 900 Lumen por metro.
- **Sensores:**
  - **CPT:**
    - Voltaje de alimentación: 5V a 24V DC para el encoder de la referencia LPD3806.
    - Material: Estructura basada en el termoplástico usado en prototipado rápido ABS, e hilo de nylon como cable de medición.
    - Señal de salida: Salida en colector abierto de pulsos en cuadratura.
  - **Acelerómetro:**
    - Voltaje de alimentación: Baterías CR2450 de 3V DC.
    - Señal de salida: Lecturas (16 bits) de la aceleración en los 6 ejes, con protocolo bluetooth 4.2 (velocidad de transmisión de hasta 1Mbps).
- **Unidad de procesamiento:**
  - **Tarjeta de desarrollo (microcontrolador) ESP-32S:**
    - Voltaje de alimentación: 3.3V DC.
    - Señal de entrada: 1.76V a 3.3V DC como "1" lógico, protocolo bluetooth 4.2.
    - Señal de salida: 3.3V DC.

## Diseño de detalle

Se desarrolló un circuito impreso mediante el cual se facilitaría la distribución de energía a los componentes del complemento electrónico. El esquema de este circuito se presenta en la figura 3-74, del cual se dispondrían de las borneras correspondientes con las funciones listadas a continuación:

- 5V IN: Entrada de 5 voltios cómo fuente externa de alimentación.
- 5V+: Borneras disponibles para alimentación a 5 voltios.
- GND: Borneras disponibles para conexiones adicionales a tierra.
- 3.3V OUT: Bornera disponible para alimentación eléctrica de 3.3 voltios.
- A ENCODER y B ENCODER: Borneras dispuesta con resistencias "pull-up" para la lectura de las señales en cuadratura del encoder, las cuales se encuentran internamente cómo salidas en colector abierto.



**Figura 3-74.:** Esquema del circuito diseñado para facilitar el suministro de energía a los componentes del complemento electrónico. Esquema elaborado por el autor.

Los planos de pieza y ensamble del complemento electrónico que son acoplados al "Soporte Mecánico" se presentan en el anexo B: Planos del complemento electrónico. Mientras que los planos de pieza y ensamble del acople del acelerómetro sobre la carga se presentan en el anexo C: Planos del complemento electrónico (acelerómetro). Cabe aclarar que el suministro

externo de energía (de 5V) no fue considerado en dichos planos por ser un elemento inherente al proceso de elaboración de un prototipo físico.

Mediante la unión del complemento electrónico sobre la estructura de soporte se concreta el sistema de seguridad para el ejercicio hipertrófico de la prensa de banco. En la figura 3-75 se puede observar la instalación apropiada del complemento electrónico sobre la estructura de soporte, y la representación práctica del uso del producto diseñado, con la incorporación de modelos humanos del levantador y el observador.



**Figura 3-75.:** Aspecto final del sistema de seguridad para el ejercicio hipertrófico de la prensa de banco. Imagen elaborada por el autor mediante la herramienta de renderizado de Solidworks.

## Algoritmo

Se presenta a continuación el algoritmo desarrollado para el cumplimiento de las funciones básicas concretadas en las Especificaciones de Diseño del Producto (PDS) del complemento electrónico. Mediante la programación de este algoritmo sobre la unidad de procesamiento seleccionada, el complemento electrónico tendría la capacidad de:

1. **Reconocimiento del inicio del ejercicio:** Identificar cuando la carga se encuentre sobre los soportes del equipo para prensa de banco, o si por el contrario esta está siendo empleada en el desarrollo del ejercicio.



2. **Reconocimiento de la fase del ejercicio:** Reconocer la fase excéntrica y concéntrica del ejercicio, que corresponden respectivamente con la bajada y subida de la barra.
3. **Medición de variables cinemáticas:** Medir y registrar las variables cinemáticas de la barra sobre el plano sagital, cómo lo son: desplazamiento ( $r$ ), velocidad ( $r'$ ), aceleración ( $r''$ ), tiempo ( $t$ ) y ángulo de desplazamiento ( $\beta$ ).
4. **Reconocimiento de patrones de riesgo:** Reconocer y evaluar los patrones de riesgo más relevantes durante el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco.
5. **Control de las alarmas correspondientes:** Activar las alarmas visuales y auditivas según el nivel de riesgo percibido.

## Arquitectura del algoritmo

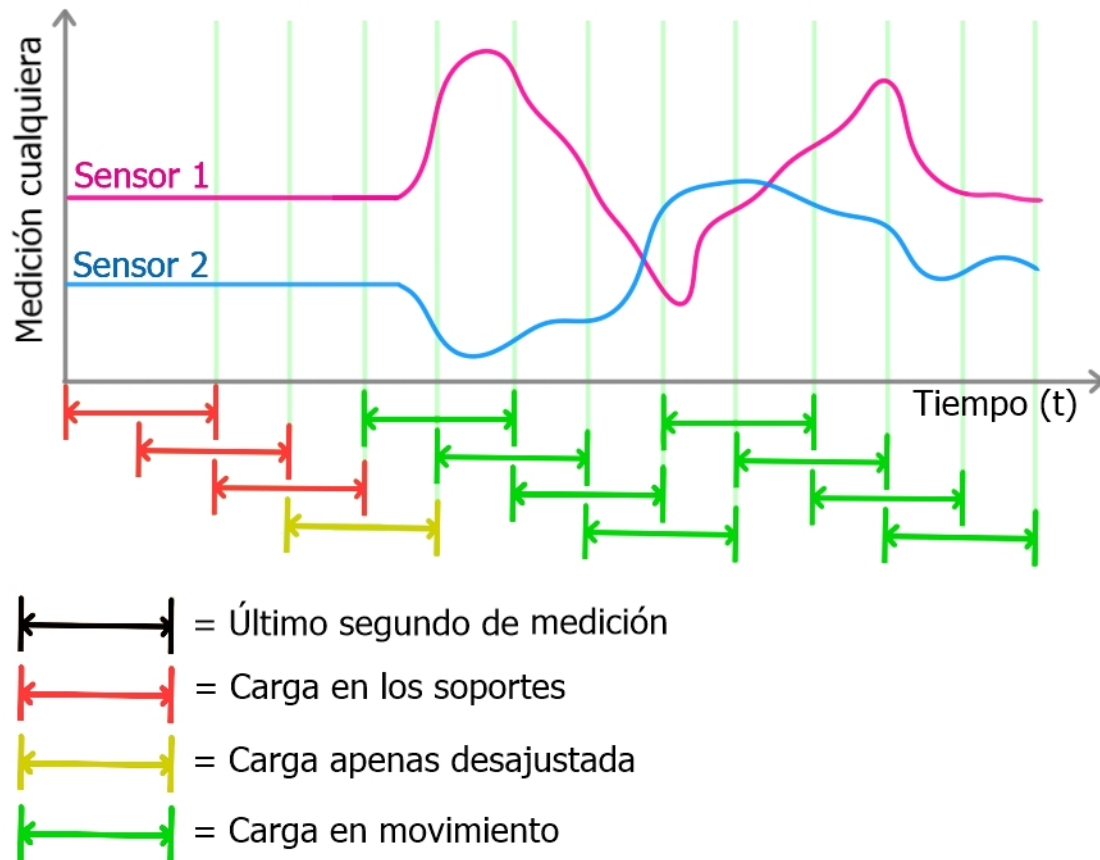
### 1. Reconocimiento del inicio del ejercicio:

Se desarrolló un algoritmo para brindarle al complemento electrónico la capacidad de reconocer el instante en que la barra ha sido sacada de los soportes del equipo para la prensa de banco.

La ubicación de la carga se reconocería mediante la revisión del último segundo de muestras provenientes del acelerómetro y el transductor de posición con cable. Según el comportamiento de estas medidas, se podría identificar si la barra reposa sobre los soportes para la prensa de banco o no, y el momento en que esta ha sido levantada por el usuario antes de dar inicio al ejercicio. Cada caso sería identificado conforme a las siguientes condiciones:

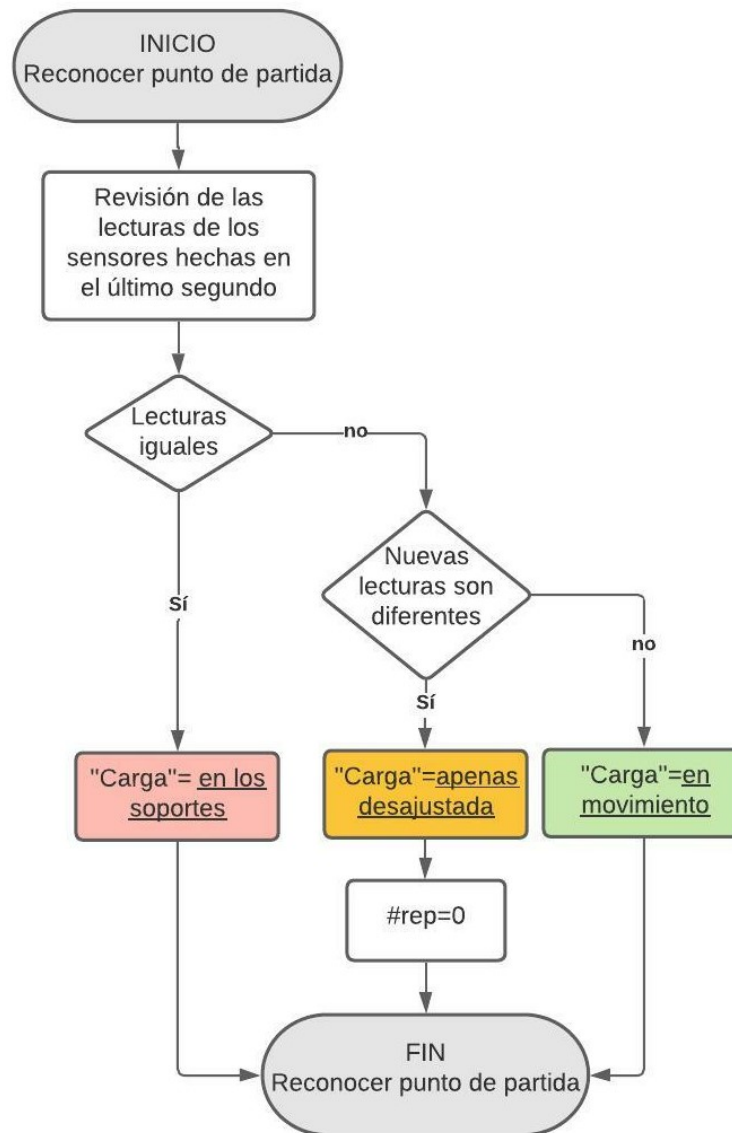
**Nota:** Las condiciones de similitud entre medidas para la identificación de la posición de la carga se expresan gráficamente sobre la figura 3-76.

- **Carga en los soportes:** Del último segundo de medición de cada sensor se determina que todas sus lecturas son iguales. Esto dentro de un rango acorde con el ruido que cada sensor posea.
- **Carga apenas desajustada:** Del último segundo de medición de cada sensor se identifica que las nuevas lecturas de los sensores difieren de todas las anteriores.
- **Carga en movimiento:** No existe homogeneidad entre las lecturas realizadas por cada sensor en el último segundo de medición.



**Figura 3-76.:** Condiciones para el reconocimiento de la ubicación de la carga. Intervalo rojo: Carga sobre los soportes, intervalo amarillo: Carga apenas desajustada, intervalo verde: Carga en movimiento. Imagen elaborada por el autor.

Las condiciones presentadas anteriormente fueron representadas en el subproceso "Reconocer punto de partida" de la figura 3-77. En este algoritmo dónde se contempla además la inicialización de la variable "#rep" para la identificación del número de repetición que esté siendo llevada a cabo por el levantador.



**Figura 3-77.:** Algoritmo para el reconocimiento de la ubicación de la carga: "en los soportes", "apenas desajustada" o "en movimiento". Imagen elaborada por el autor.

## 2. Reconocimiento de la fase del ejercicio:

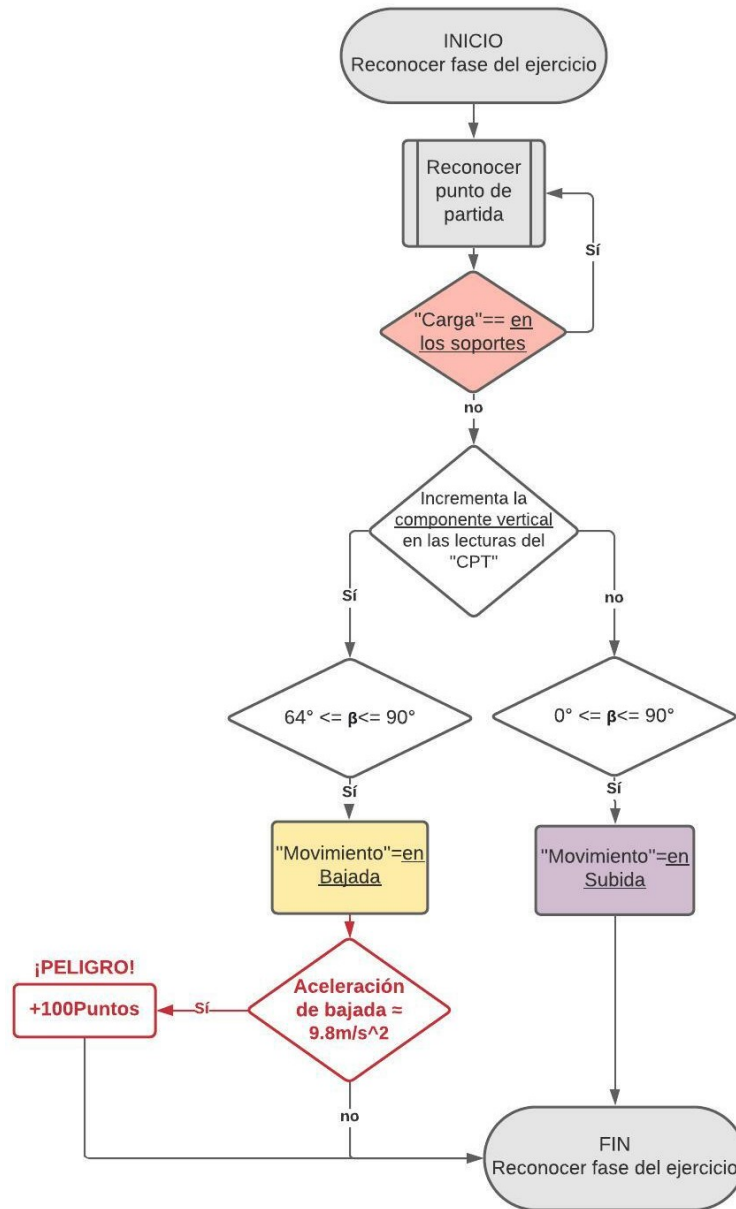
Se desarrolló un algoritmo para brindarle al complemento electrónico la capacidad de reconocer la fase excéntrica o concéntrica del ejercicio. Sin embargo, para que alguna de estas fases fuese identificada, la barra necesariamente tendría que haber sido extraída previamente de sus soportes; razón por la cual, el algoritmo desarrollado en este caso considera, antes de proseguir con la identificación de las etapas del ejercicio, una respuesta negativa a la variable lógica "carga en los soportes" del subproceso "Reconocer Punto de partida".

De la investigación del capítulo 2, sobre el mecanismo de la prensa de banco, se descubrió que durante la ejecución del ejercicio de la prensa de banco, la barra se traslada sobre el plano sagital con unos ángulos particulares: Entre los 14 y los 26 grados (respecto de la vertical en dirección contraria a las manecillas del reloj) durante la fase excéntrica (bajada de la barra), y entre los 0 y los 90 grados (respecto de la horizontal izquierda en dirección de las manecillas del reloj) durante la fase concéntrica (elevación de la barra) [23, 48, 49, 78].

De esta manera, se reconocería la fase excéntrica (carga en bajada) del ejercicio cuando se detectara un aumento en la extensión del cable del "CPT" junto con un ángulo " $\beta$ " entre los 64 y los 90 grados (64° a 76° estrictamente según los estudios consultados) respecto de la horizontal. Por otro lado, se reconocería la fase concéntrica (carga en subida) siempre que la distancia medida por el "CPT" se hiciera más corta a la par con un ángulo de desplazamiento " $\beta$ " entre los 0 y los 90 grados.

Del algoritmo planteado en esta sección cabe agregar la identificación del primer patrón de riesgo, y es en el caso de que durante la fase excéntrica, la carga baje con un valor de aceleración aproximado al de la gravedad. Pues esta información daría cuenta de que la barra ha sido soltada y se encuentra desplazándose en caída libre. Razón por la cual una alarma debería ser emitida instantáneamente.

En el diagrama de flujo de la figura **3-78** se expresa gráficamente el algoritmo desarrollado para el reconocimiento de la fase excéntrica y concéntrica del ejercicio.

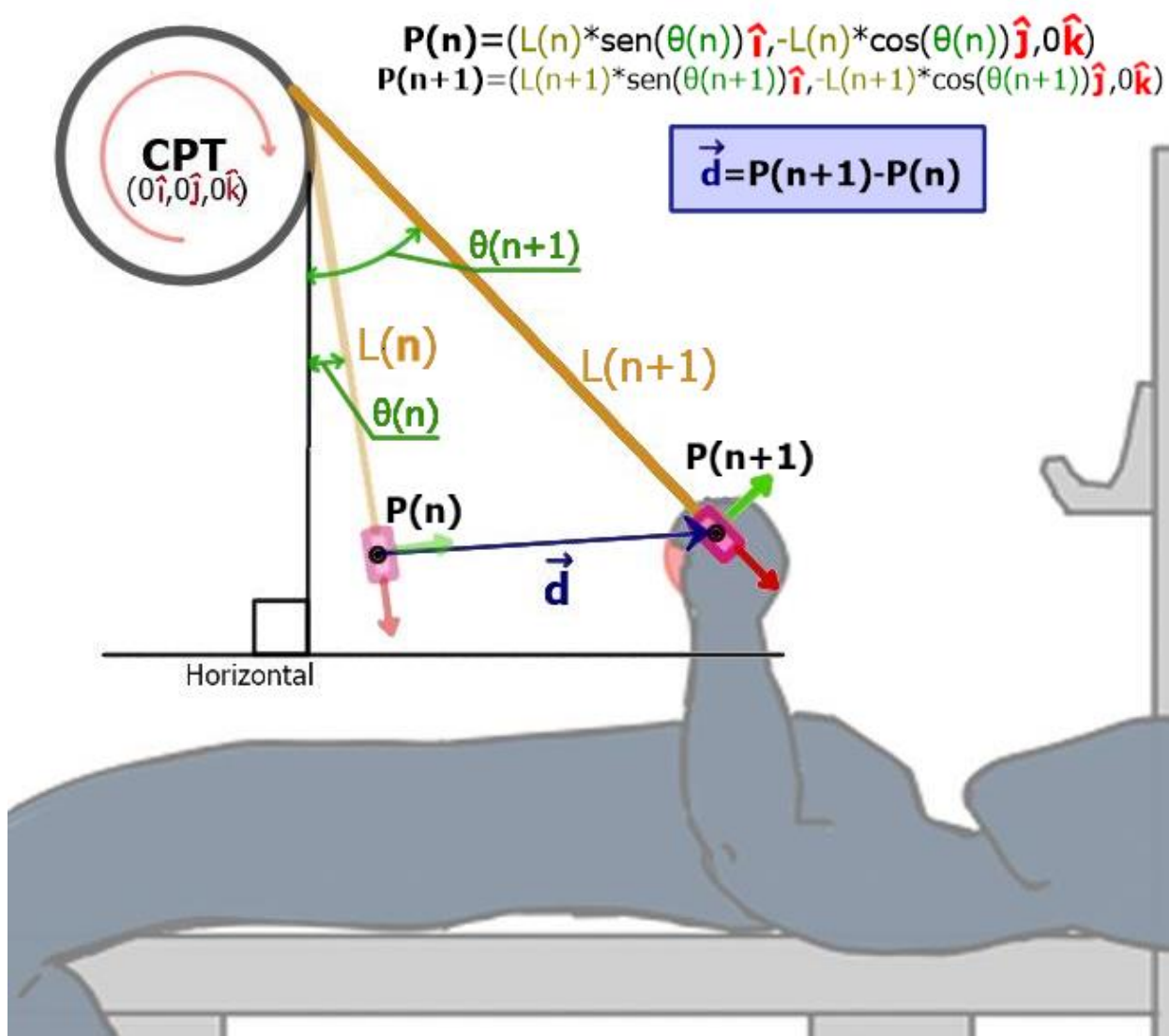


**Figura 3-78.:** Algoritmo para el reconocimiento de la fase del ejercicio. Imagen elaborada por el autor.

### 3. Medición de variables cinemáticas:

Se desarrolló un algoritmo para brindarle al complemento electrónico la capacidad de medir y guardar registro de las variables físicas pertinentes para el reconocimiento de patrones cinemáticos en el ejercicio de la prensa de banco. Cabe aclarar que serán consideradas únicamente aquellas variables físicas manifestadas durante el desplazamiento de la carga en el plano sagital, en concordancia con la literatura consultada sobre el estudio del ejercicio de la prensa de banco.

La medición de la cinemática de la carga se basa en la resta vectorial entre puntos (muestras) sobre el plano sagital adquiridos a través de los sensores disponibles; concepto que se explica gráficamente en la figura 3-79. Conociendo las distancias  $L(n)$  y  $L(n+1)$  junto con los ángulos  $\theta(n)$  y  $\theta(n+1)$  respectivamente de los puntos  $P(n)$  (ecuación 3-24) y  $P(n+1)$  (ecuación 3-25), sería posible calcular el vector  $\vec{d}$ . El cual representa la transición espacial de la barra entre una muestra y otra de los sensores "acelerómetro" y "CPT".

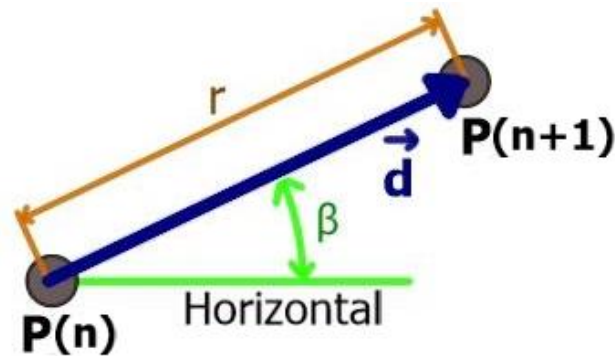


**Figura 3-79.:** Concepto de cálculo de las variables cinemáticas de la carga.  $\theta(n)$ : Ángulo anterior,  $\theta(n + 1)$ : Ángulo actual,  $L(n)$ : Distancia a la referencia anterior,  $L(n+1)$ : Distancia a la referencia actual,  $P(n)$ : Posición anterior,  $P(n+1)$ : Posición actual,  $\vec{d}$ : Desplazamiento entre muestras. Imagen elaborada por el autor.

$$P(n) = (L(n) * \sin(\theta(n))\hat{i}, -L(n) * \cos(\theta(n))\hat{j}, 0\hat{k}) \quad (3-24)$$

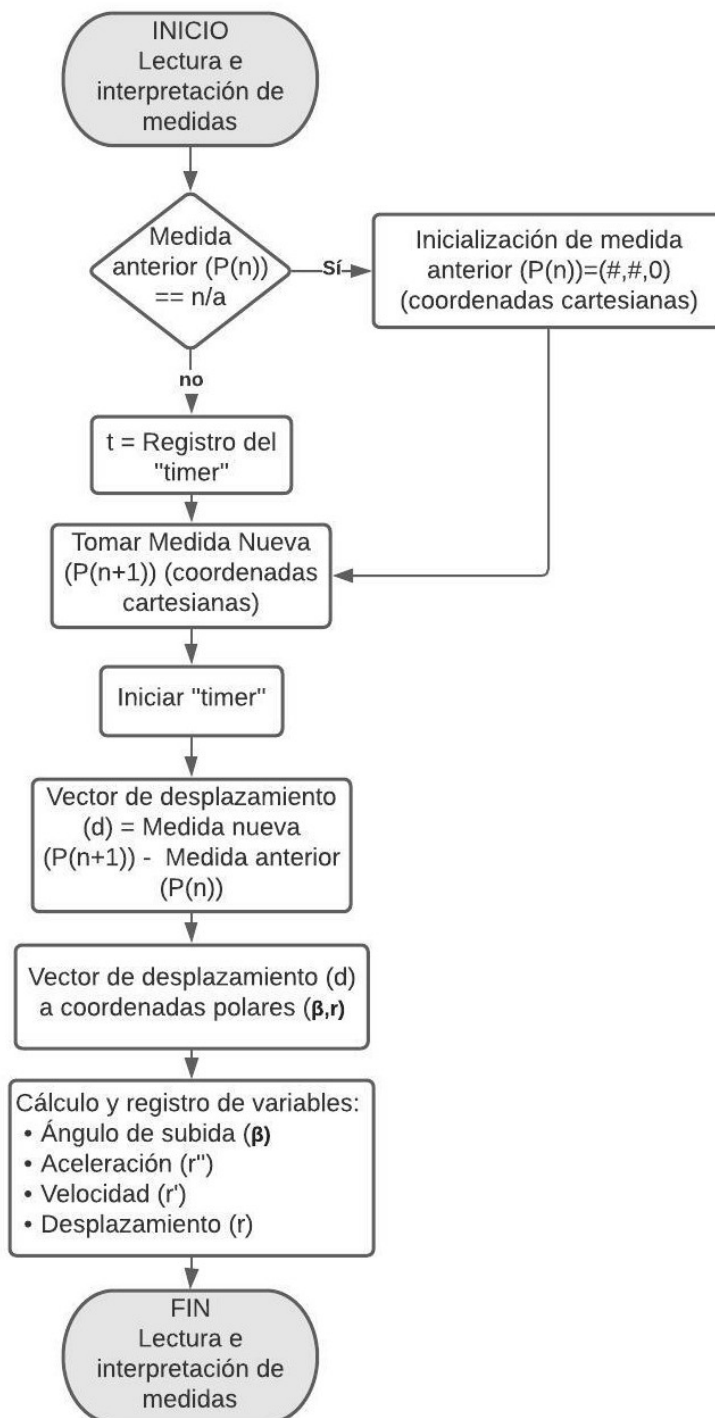
$$P(n+1) = (L(n+1) * \sin(\theta(n+1))\hat{i}, -L(n+1) * \cos(\theta(n+1))\hat{j}, 0\hat{k}) \quad (3-25)$$

De la representación del vector  $\vec{d}$  en coordenadas polares (figura 3-80), y considerando el lapso de tiempo (t) entre la muestra P(n) y la muestra P(n+1), sería posible extraer las variables cinemáticas de desplazamiento (r), velocidad ( $r'$ ), aceleración ( $r''$ ) y ángulo ( $\beta$ ) sobre el plano sagital. Cabe agregar que durante este proceso, se considera la ubicación del sensor "CPT" cómo origen de referencia.



**Figura 3-80.:** Representación del vector  $\vec{d}$  en coordenadas polares. Imagen elaborada por el autor.

El algoritmo desarrollado para la medición y registro de las variables físicas descritas anteriormente se presenta en la figura 3-81. En este algoritmo se contempla además la inicialización de una primera muestra desde la cual iniciar el cálculo de la cinemática de la carga, con unos valores cualquiera dentro del plano sagital, y considerando en todo momento un valor de profundidad igual a cero.



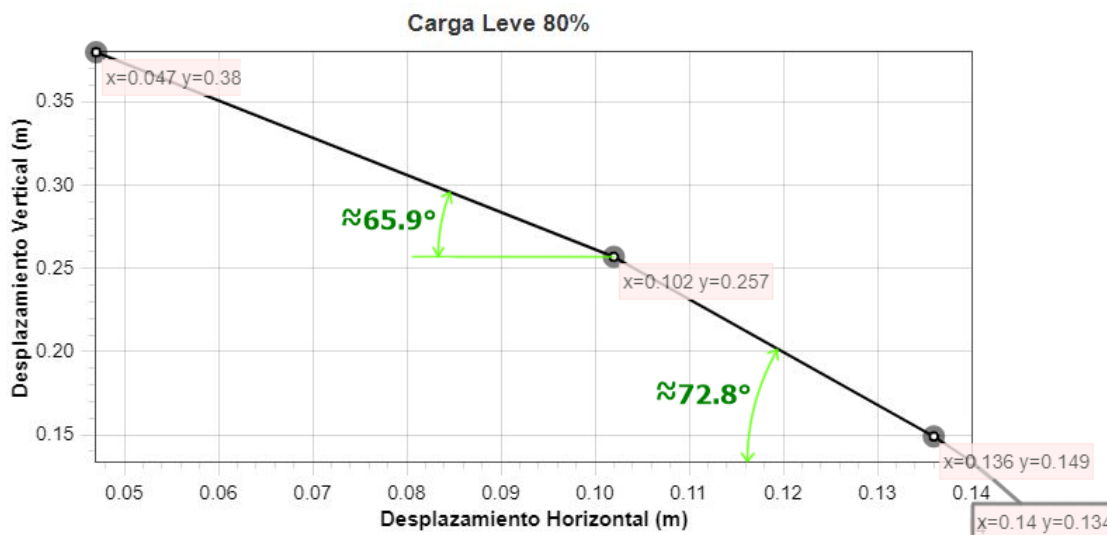
**Figura 3-81.:** Algoritmo desarrollado para el cálculo y registro de las variables cinemáticas  $\beta$ ,  $r$ ,  $r'$  y  $r''$ . Imagen elaborada por el autor.

#### 4. Reconocimiento de patrones de riesgo:

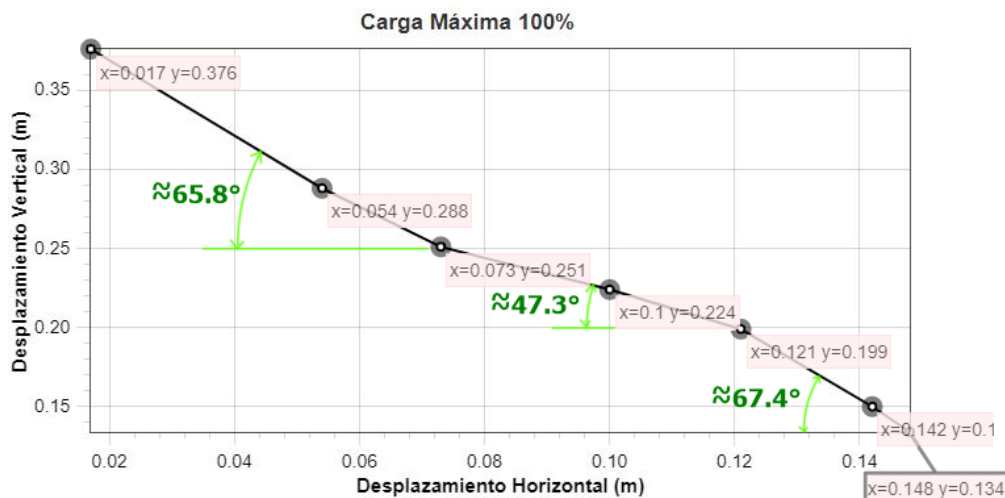


Se desarrolló un algoritmo para brindarle al complemento electrónico la capacidad de reconocer los patrones de riesgo extraídos de la investigación sobre el mecanismo de la prensa de banco expuesta en el capítulo 2. Estos patrones deberían ser reconocidos a partir de la información proveniente de las variables físicas registradas ( $\beta$ ,  $r$ ,  $r'$  y  $r''$ ).

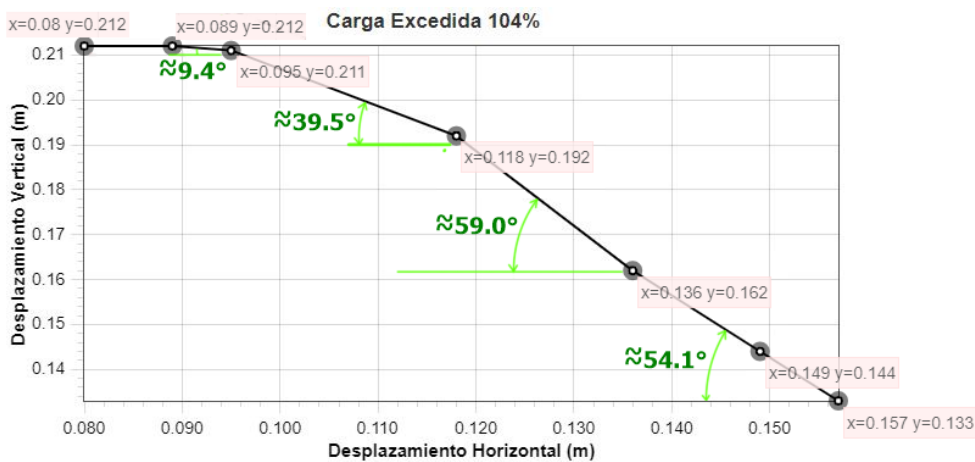
Algunas de las gráficas presentadas en el capítulo 2 fueron reconstruidas mediante la herramienta "graphreader.com" en busca de extraer los valores numéricos de aquellos estudios en dónde no se especifican magnitudes concretas. Esto con la intención de reconocer tendencias en las curvas de desplazamiento y aceleración de levantamientos con carga leve, máxima y excedida, contra los cuales se pudieran contrastar las variables físicas registradas por el complemento electrónico ( $\beta$ ,  $r$ ,  $r'$  y  $r''$ ). Las gráficas reconstruidas corresponden con el desplazamiento de la barra en el plano sagital durante la fase concéntrica con carga leve **3-82**, máxima **3-83** y excedida **3-84**; así como la fuerza en el tiempo ejercida sobre una carga leve **3-85**, máxima **3-86** y excedida **3-87**.



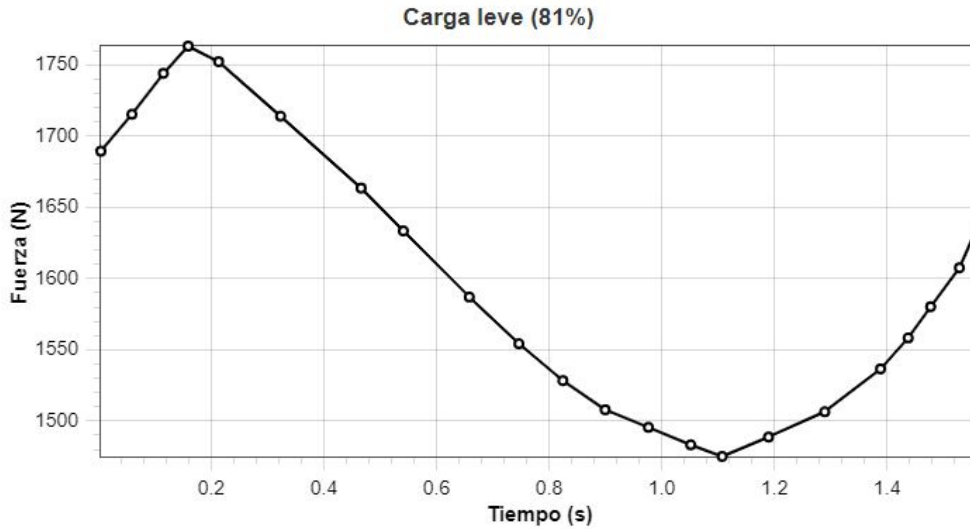
**Figura 3-82.:** Reconstrucción de la curva de desplazamiento en el plano sagital con carga leve (81 %) en la figura 2-4 del estudio de B.Elliot et al [23]. Imagen elaborada por el autor con el apoyo de la herramienta "graphreader.com".



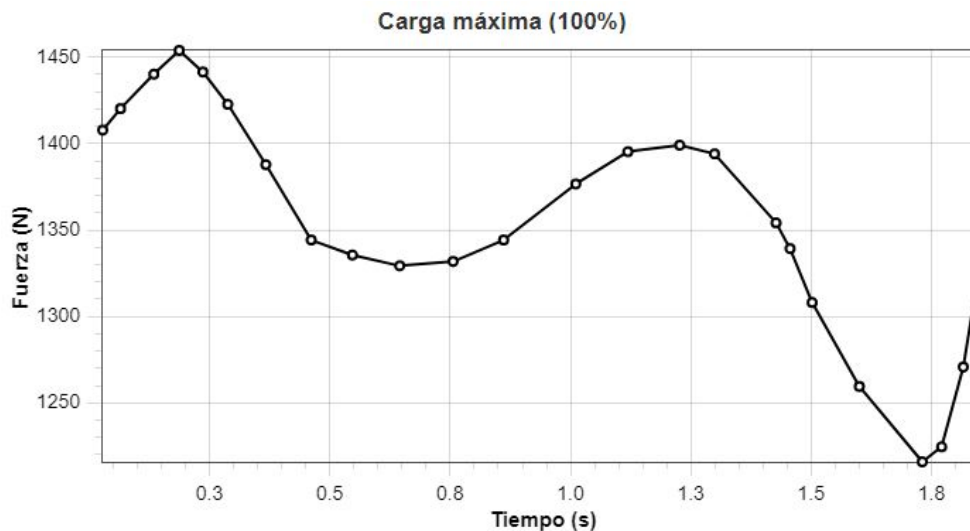
**Figura 3-83.:** Reconstrucción de la curva de desplazamiento en el plano sagital con carga máxima (100%) en la figura 2-4 del estudio de B.Elliot et al [23]. Imagen elaborada por el autor con el apoyo de la herramienta "graphreader.com".



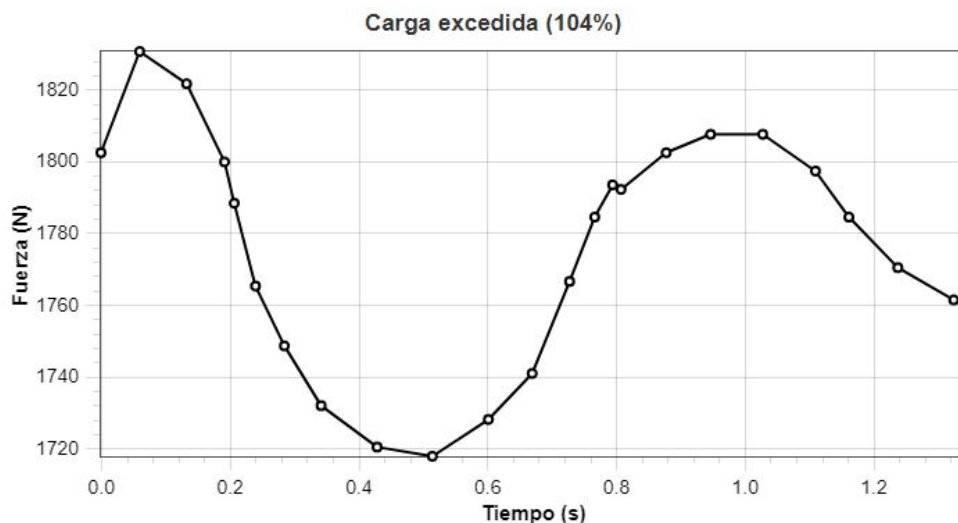
**Figura 3-84.:** Reconstrucción de la curva de desplazamiento en el plano sagital con carga excedida (104%) en la figura 2-4 del estudio de B.Elliot et al [23]. Imagen elaborada por el autor con el apoyo de la herramienta "graphreader.com".



**Figura 3-85.:** Reconstrucción de la curva de fuerza en el tiempo ejercida sobre una carga leve (81%) en la figura 2-3 del estudio de B.Elliot et al [23]. Peso de la carga ( $m \cdot g$ ) = 1635N, masa de la carga ( $m$ ) = 166.83Kg, fuerza mínima ( $F$ ) = 1475N. Imagen elaborada por el autor con el apoyo de la herramienta "graphreader.com".



**Figura 3-86.:** Reconstrucción de la curva de fuerza en el tiempo ejercida sobre una carga máxima (100%) en la figura 2-6 del estudio de B.Elliot et al [23]. Peso de la carga ( $m \cdot g$ ) = 1340N, masa de la carga ( $m$ ) = 136.73Kg, fuerza mínima ( $F$ ) = 1215N. Imagen elaborada por el autor con el apoyo de la herramienta "graphreader.com".



**Figura 3-87.:** Reconstrucción de la curva de fuerza en el tiempo ejercida sobre una carga excedida (104 %) en la figura 2-12 del estudio de B.Elliot et al [23]. Peso de la carga ( $m \cdot g$ ) = 1790N, masa de la carga ( $m$ ) = 182.65Kg, fuerza mínima ( $F$ ) = 1715N. Imagen elaborada por el autor con el apoyo de la herramienta "graphreader.com".

De las figuras 3-82, 3-83 y 3-84 se distingue una tendencia en el desplazamiento de la barra en moverse de manera más horizontal conforme al levantador se le dificulta más levantarla, siendo un factor determinante de esto el ángulo mínimo de subida " $\beta$ " de aproximadamente  $\approx 65,9^\circ$  con carga leve,  $\approx 47,3^\circ$  con carga máxima y  $\approx 0^\circ$  con carga excedida. Por otro lado, de las figuras 3-85, 3-86 y 3-87 se pudo extraer mediante la ecuación 3-26, la aceleración ( $a$ ) mínima de subida, cuyo valor tiende a aumentar entre más difícil resulte para el levantador terminar una repetición del ejercicio ( $-0,9591m/s^2$  con carga leve,  $-0,9142m/s^2$  con carga máxima, y  $-0,4106m/s^2$  con carga excedida).

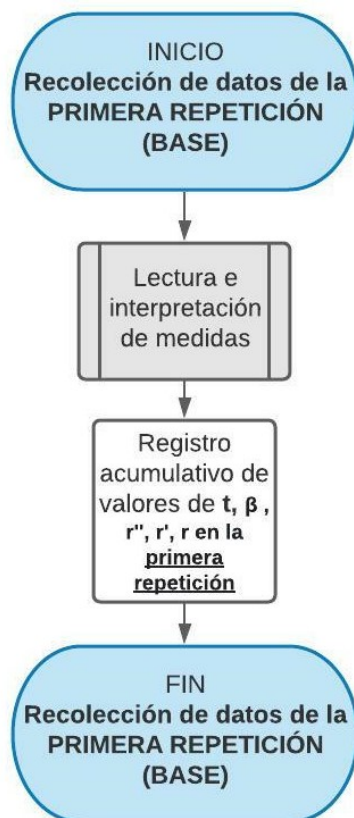
$$a = (F - m \cdot g)/m \quad (3-26)$$

Junto con la alteración del ángulo y la aceleración mínima de subida en levantamientos individuales con carga leve, máxima y excedida, las tendencias presentadas en la tabla 3-19 serían de gran utilidad para reconocer la dificultad del levantador en elevar sucesivamente la barra. Lo anterior respaldado en los estudios de M.Duffey et al [22] y H.Król et al [46], donde se determinó que conforme una serie de repeticiones es desarrollada con una carga leve, los patrones cinemáticos iniciales se convierten progresivamente en unos característicos de levantamientos con carga máxima y excedida.

	C.Leve	C.Máxima	C.Excedida
Ángulo mínimo de subida [23]	65,9°	47,3°	0 a 9,4°
Aceleración mínima de subida [23]	-0,9591m/s <sup>2</sup>	-0,9142m/s <sup>2</sup>	-0,4106m/s <sup>2</sup>
Altura media de la barra en subida [22, 46]	0,11m	0,07m	
Velocidad media de subida [22, 46]	0,33m/s	0,15m/s	
Tiempo de subida [22, 46]	1,08s	2,38s	
Duración de región pegajosa [23]	No hay	0,4s	0,49s
Definición de fallo [33]	Más de 1 segundo sin movimiento vertical		

**Tabla 3-19.:** Patrones de fallo encontrados en la literatura sobre el mecanismo de la prensa de banco, reconocibles con la información disponible para el complemento electrónico ( $\beta$ ,  $r$ ,  $r'$  y  $r''$ ). Tabla elaborada por el autor.

En busca de extender la aplicabilidad de las tendencias presentadas en la tabla **3-19** sobre cualquier usuario, el algoritmo desarrollado para el reconocimiento de patrones de riesgo no considera las magnitudes físicas propiamente, sino por el contrario la razón de transformación respecto de la cinemática registrada durante la primera repetición ejecutada por el mismo sujeto. Dentro del reconocimiento de patrones de riesgo se considera el subproceso de la figura **3-88** para tomar registro de la cinemática expresada durante la primera repetición, respecto de la cual serían comparados los valores adquiridos durante las repeticiones restantes.



**Figura 3-88.:** Algoritmo desarrollado para el registro de las variables cinemáticas durante la primera repetición. Imagen elaborada por el autor.

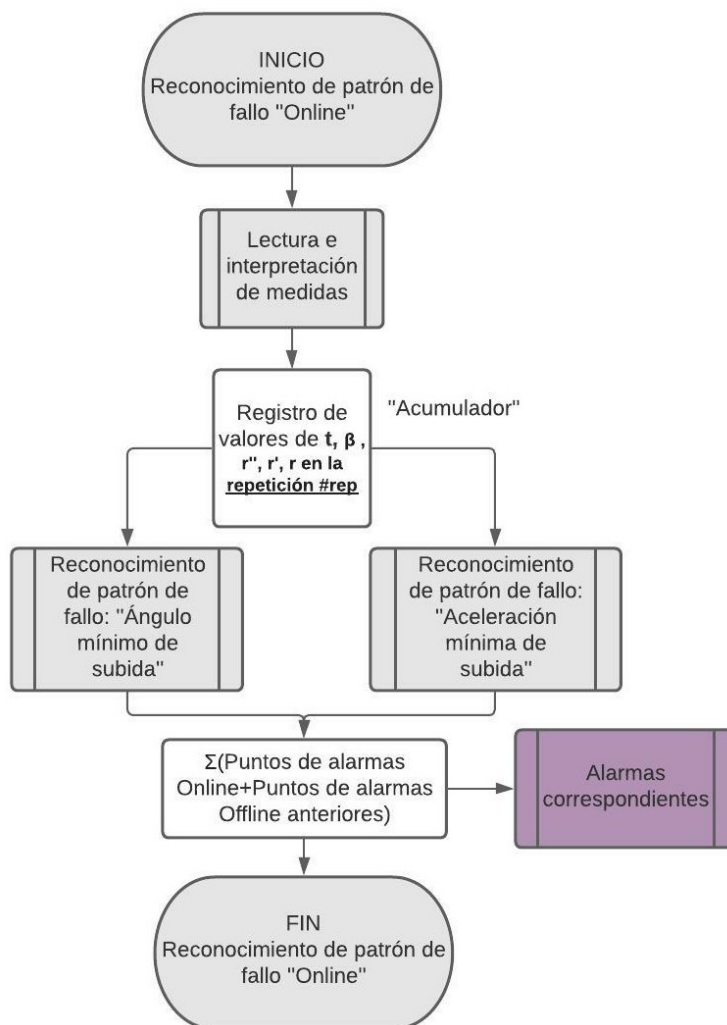
La razón de transformación de las variables cinemáticas presentadas en la tabla **3-19** sería expresada mediante un factor correspondiente con el valor adquirido de la  $n$ -ésima repetición dividida por la registrada en la primera; reconociéndose de esta manera un próximo fallo en el levantamiento de la carga cuando para cada variable se determine un valor mayor o igual al de las columnas "C.Máxima" o "C.Excedida" de la tabla **3-20**. Cabe aclarar sobre esta tabla, la posibilidad de realizar una comparación en tiempo real ("Online" en el caso de comparación entre valores mínimos y la definición de fallo) durante el desarrollo del  $n$ -ésimo levantamiento; mientras que para otras la comparación no podría ser de esta manera debido a la necesidad de culminación de cada repetición para poder hacer la comparación correspondiente ("Offline" para la comparación de tiempos totales de subida y valores promedio).

	C.Leve	C.Máxima	C.Excedida	Momento de análisis
Ángulo mínimo de subida [23]	1	0.717	0 a 0.14	Online
Aceleración mínima de subida [23]	1	0.9532	0.4281	Online
Altura media de la barra en subida [22, 46]	1	0.64		Offline
Velocidad media de subida [22, 46]	1	0.45		Offline
Tiempo de subida [22, 46]	1	2.20		Offline
Definición de región pegajosa [23]	tp	tp/tn	tp/tn	Offline
Definición de fallo [33]	más de 1 segundo sin movimiento			Online

**Tabla 3-20.:** Patrones de fallo expresados de manera relativa al desempeño en la primera repetición (carga Leve). En el patrón de región pegajosa, tp: Tiempo de duración de la primera región pegajosa detectada, tn: tiempo de duración de cada una de las repeticiones subsiguientes. Tabla elaborada por el autor.

Se desarrollaron 2 subprocesos diferentes para el reconocimiento de patrones de fallo: uno para abarcar aquellas tendencias manifestadas de manera "Online" y otras para las que se presentarían de manera "Offline". El primero (figura 3-89) ejecutaría en tiempo real el reconocimiento de patrones "Online" mientras consigue recopilar en el proceso las lecturas realizadas sobre la enésima repetición. Por otro lado, el segundo (figura 3-92) se abastece de la información almacenada previamente para reconocer sobre la misma repetición, los patrones de fallo "Offline".

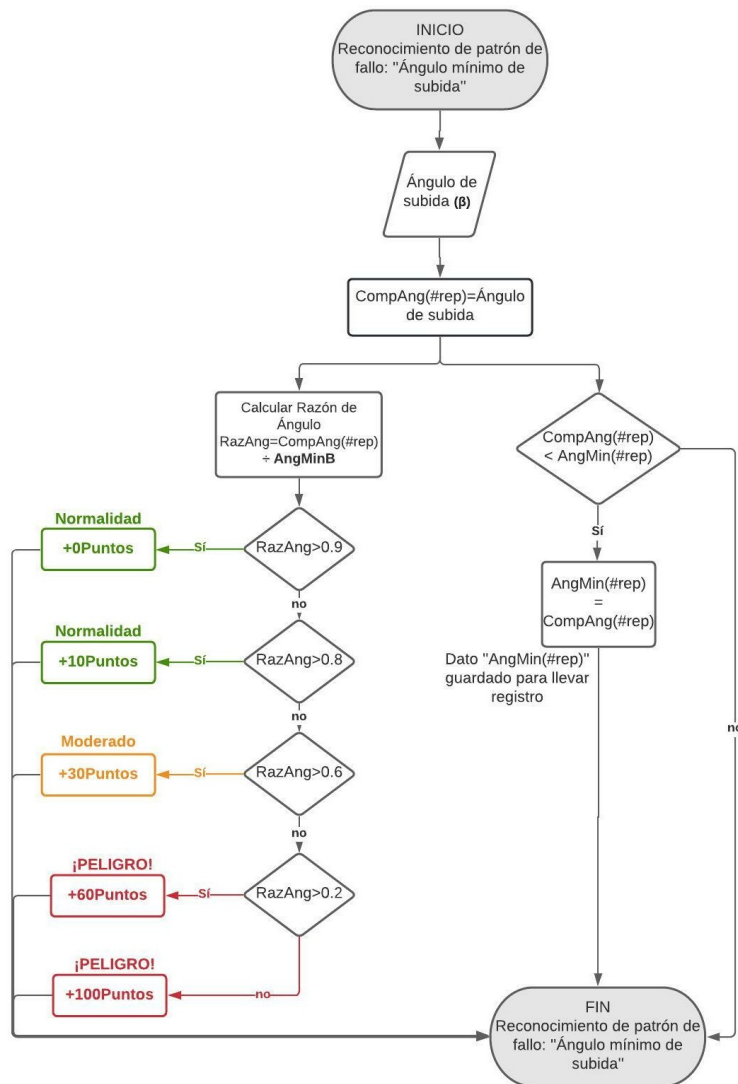
Subproceso para el reconocimiento de patrones "Online":



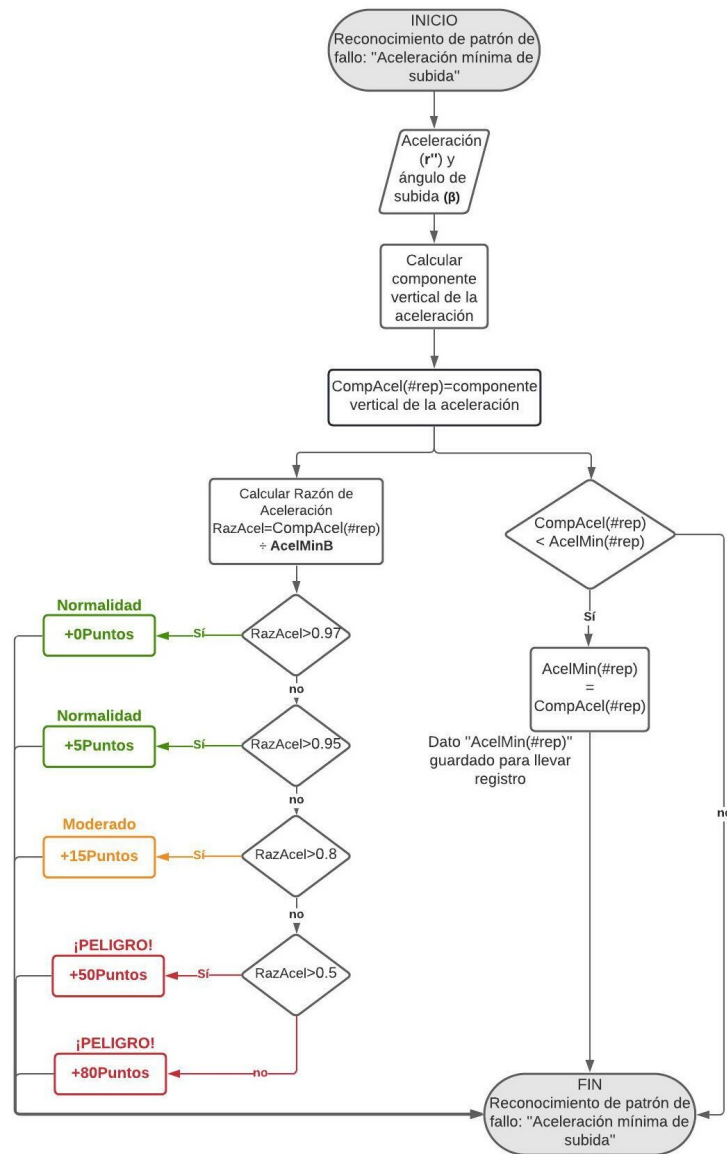
**Figura 3-89.:** Subproceso desarrollado para el reconocimiento de patrones de fallo "Online". Imagen elaborada por el autor.

Dentro del subproceso para el reconocimiento de patrones "Online" se contemplan algoritmos para la identificación de riesgo en el ejercicio, según la disminución del ángulo de subida (figura 3-90) y el aumento de la aceleración mínima de subida (figura 3-91). Cabe agregar que, según la razón de transformación entre el ángulo mínimo de subida de la primera repetición y el de la actual (RazAng) un puntaje es asignado para la posterior activación de las alarmas; al igual que con la aceleración mínima de subida (RazAcel).



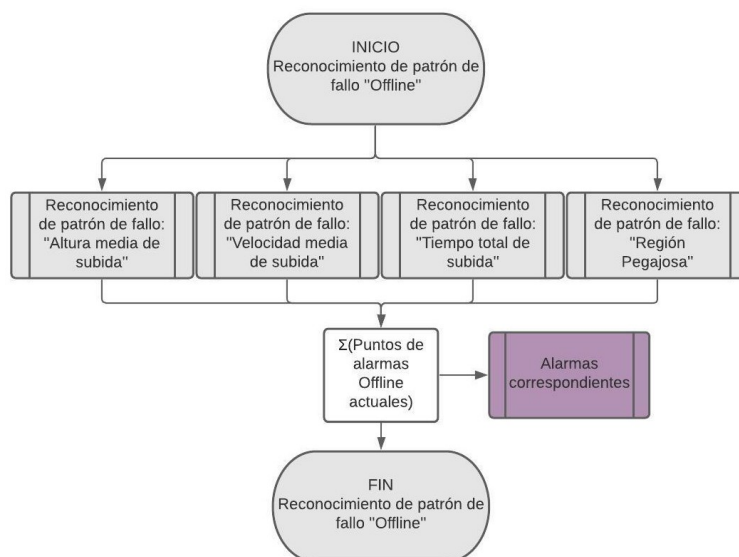


**Figura 3-90.:** Algoritmo desarrollado para la identificación de riesgo en el ejercicio, según el ángulo mínimo de subida. Imagen elaborada por el autor.



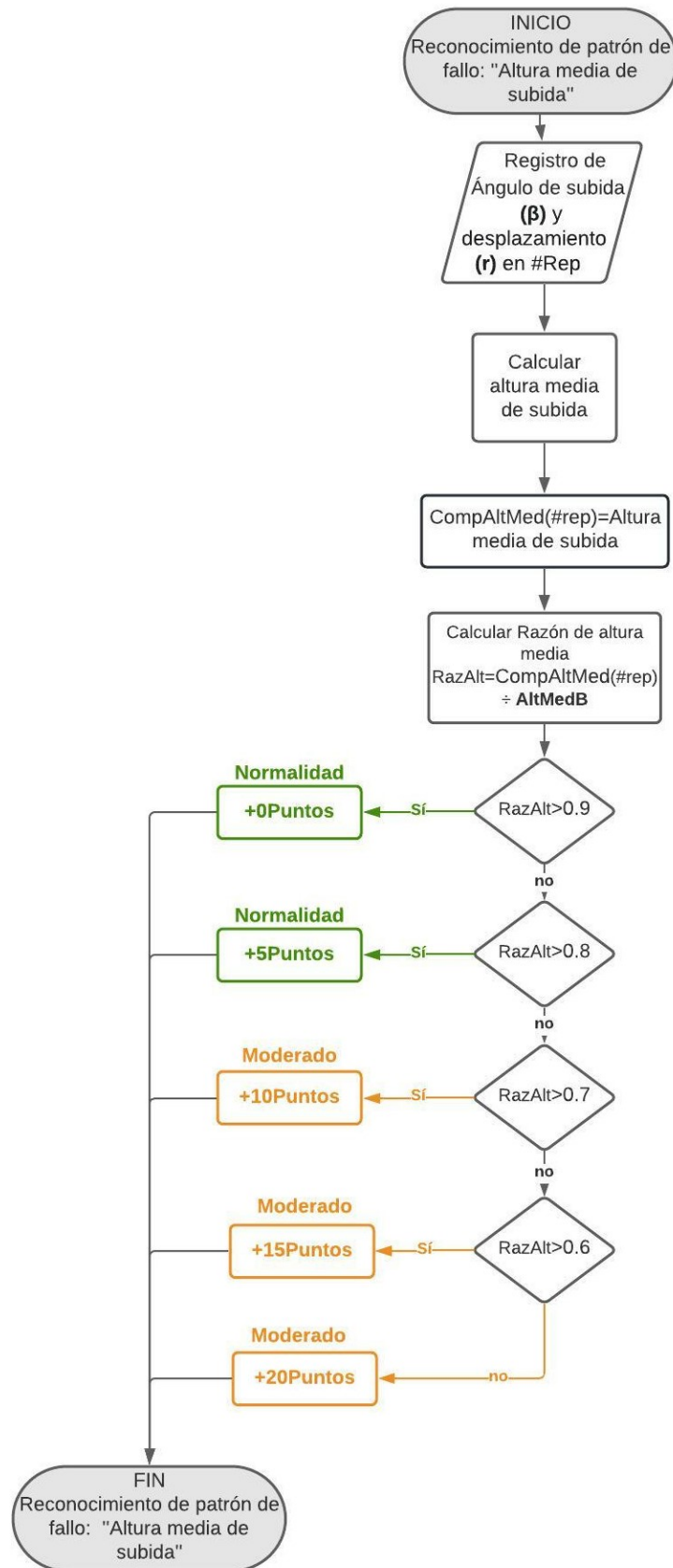
**Figura 3-91.:** Algoritmo desarrollado para la identificación de riesgo en el ejercicio, según la aceleración mínima de subida. Imagen elaborada por el autor.

Subproceso para el reconocimiento de patrones "Offline":

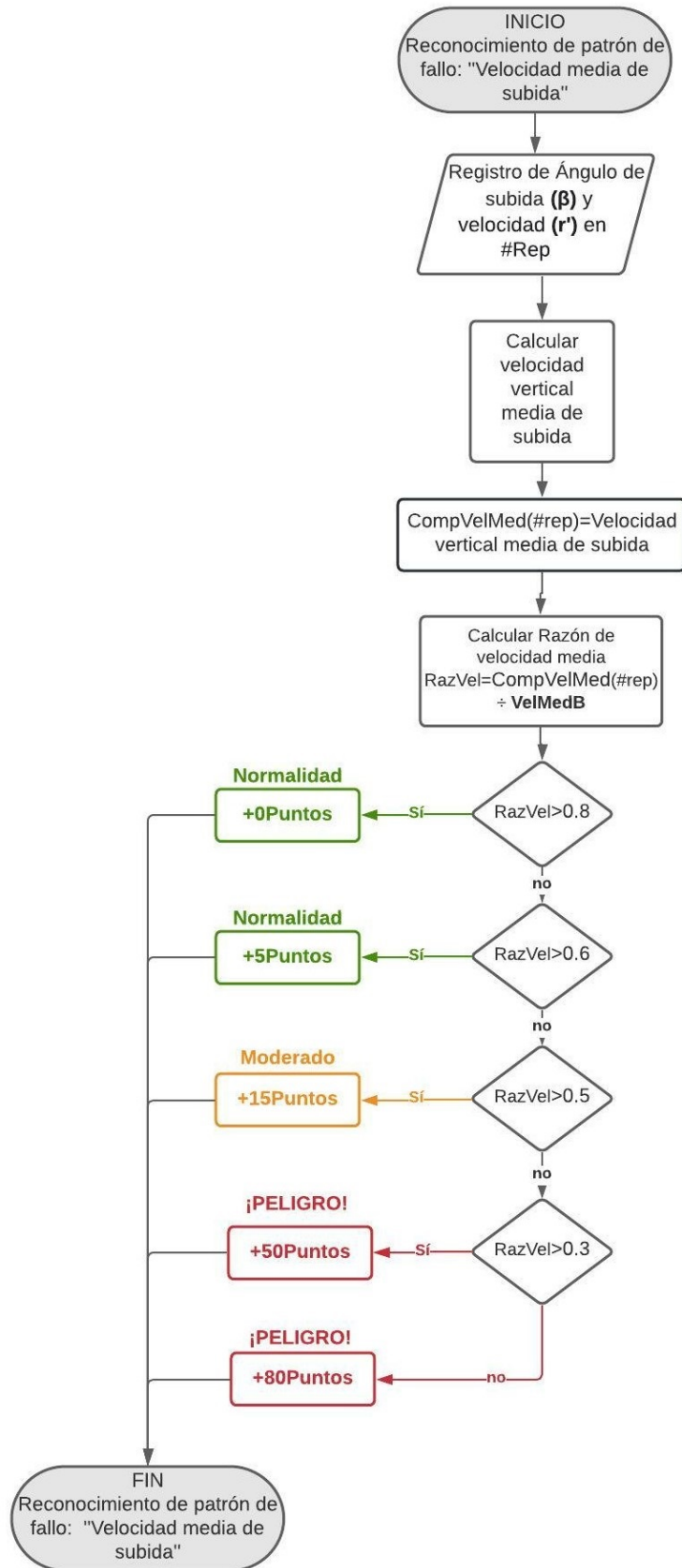


**Figura 3-92.:** Subproceso desarrollado para el reconocimiento de patrones de fallo "Offline".  
Imagen elaborada por el autor.

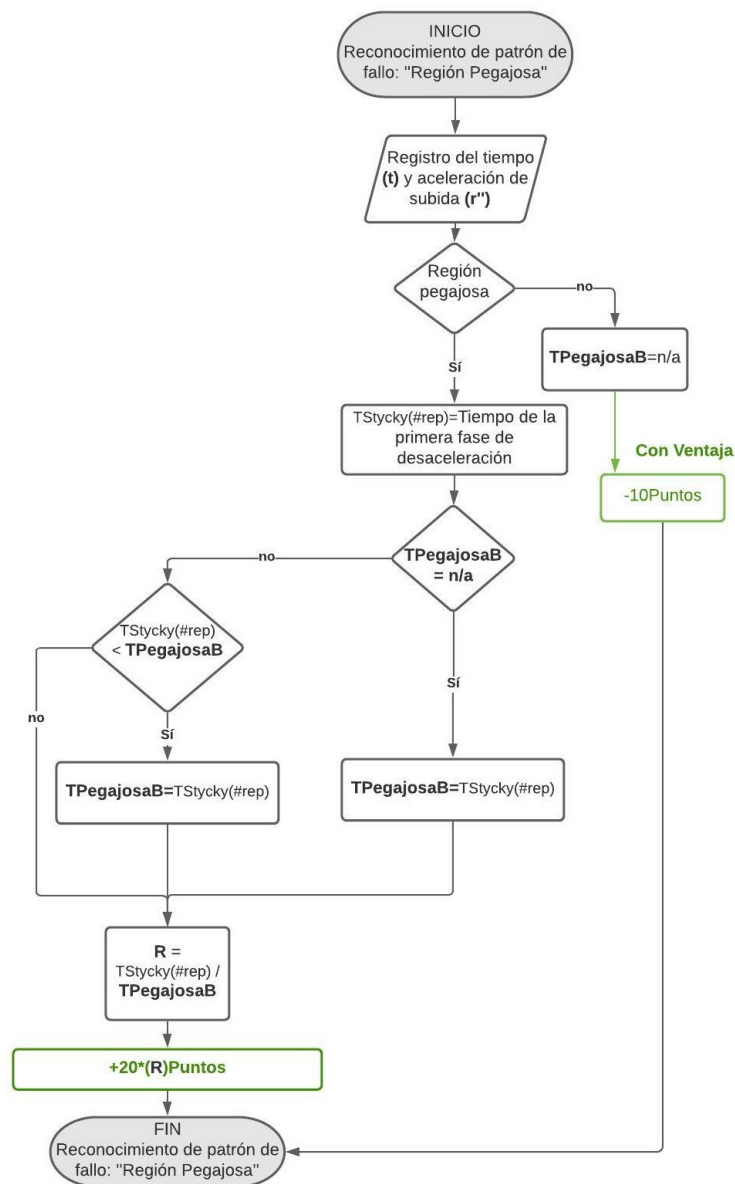
Dentro del subproceso para el reconocimiento de patrones "Offline" se contemplan algoritmos para la identificación de riesgo en el ejercicio, según la disminución en la altura media de subida (factor RazAlt en la figura 3-93) y en la velocidad media de subida (factor RazVel en la figura 3-94), así cómo también el aumento del tiempo de duración de la región pegajosa (factor R en la figura 3-95) y del tiempo total de subida (factor RazT en la figura 3-96). El cambio en estas variables es traducida en un puntaje según el cual se dará manejo a las alarmas correspondientes.



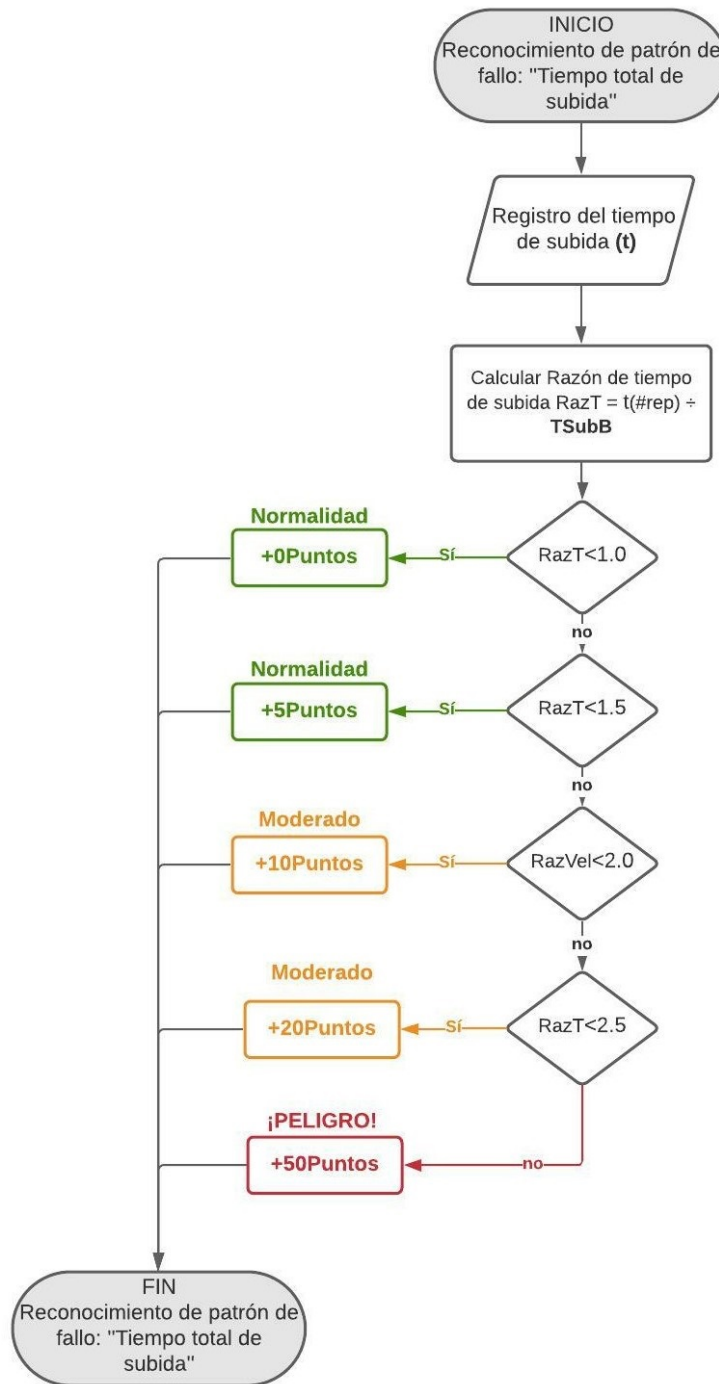
**Figura 3-93.:** Algoritmo desarrollado para la identificación de riesgo en el ejercicio, según la altura media de subida. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-94.:** Algoritmo desarrollado para la identificación de riesgo en el ejercicio, según la velocidad media de subida. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-95.:** Algoritmo desarrollado para la identificación de riesgo en el ejercicio, según la aparición y progresiva extensión de la región pegajosa. Imagen elaborada por el autor.



**Figura 3-96.:** Algoritmo desarrollado para la identificación de riesgo en el ejercicio, según el tiempo total de subida. Imagen elaborada por el autor.

El algoritmo general, que abarca el manejo de los subprocesos anteriores se presenta en la figura 3-97. Mediante este algoritmo se lleva cuenta de la repetición que se encuentre en ejecución (variable #rep), se dirige el registro de las variables cinemáticas ( $\beta$ ,  $r$ ,  $r'$  y

r”) durante la fase de subida, se ordena la identificación de patrones de riesgo ”Offline” y ”Online” incluido el criterio de fallo de M.Izquierdo et al [33] (inmovilidad de la carga por más de 1 segundo) y finalmente se calculan los parámetros de referencia adquiridos durante la primera repetición del ejercicio.



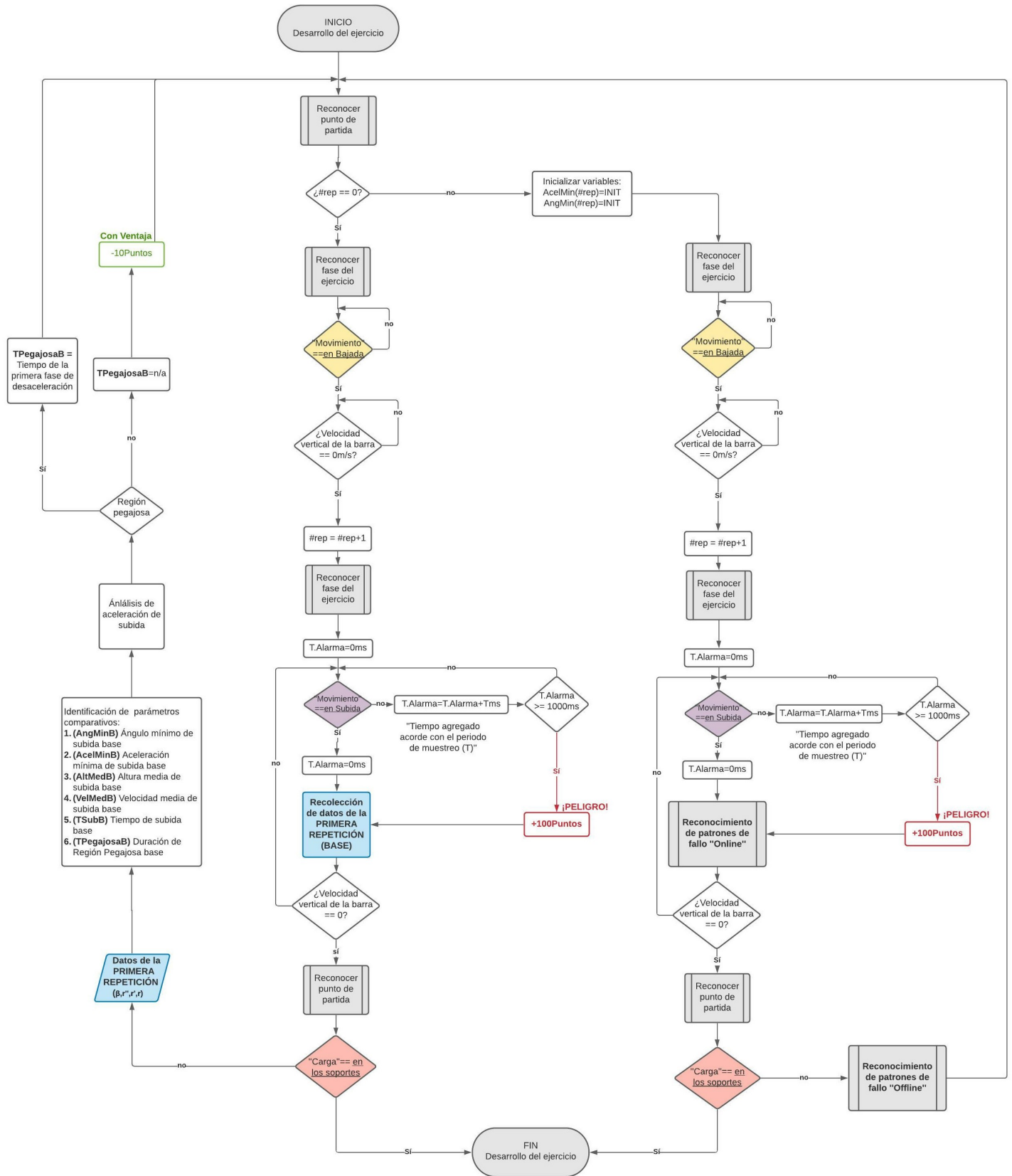


Figura 3-97.: Algoritmo desarrollado para el control general de los procesos internos del complemento electrónico. Imagen elaborada por el autor.

### 5. Control de las alarmas correspondientes:

En busca de dar un manejo de las alarmas proporcionalmente con el nivel de riesgo percibido por el complemento electrónico, se propuso el sistema de evaluación por puntos de la tabla **3-21**. Según el cual se activarían las alarmas visual y sonora de manera correspondiente con las condiciones de la columna "puntaje". El proceso de evaluación de puntaje y consecuente activación de alarmas se expresa mediante el diagrama de flujo de la figura **3-98**.

Puntaje	Nivel de Riesgo	Alarma visual	Alarma sonora
$0 \leq \text{Puntos} < 20$	Nulo	<b>Verde constante</b>	Sin sonido
$20 \leq \text{Puntos} < 40$	Leve	<b>Verde/amarillo titilante</b>	Sin sonido
$40 \leq \text{Puntos} < 60$	Moderado	<b>Amarillo constante</b>	Sin sonido
$60 \leq \text{Puntos} < 80$	Alto	<b>Amarillo/rojo titilante</b>	Sonido titilante
$80 \leq \text{Puntos}$	Muy Alto	<b>Rojo constante</b>	Sonido constante

**Tabla 3-21.:** Evaluación por puntos del nivel de riesgo en el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco. Tabla elaborada por el autor.

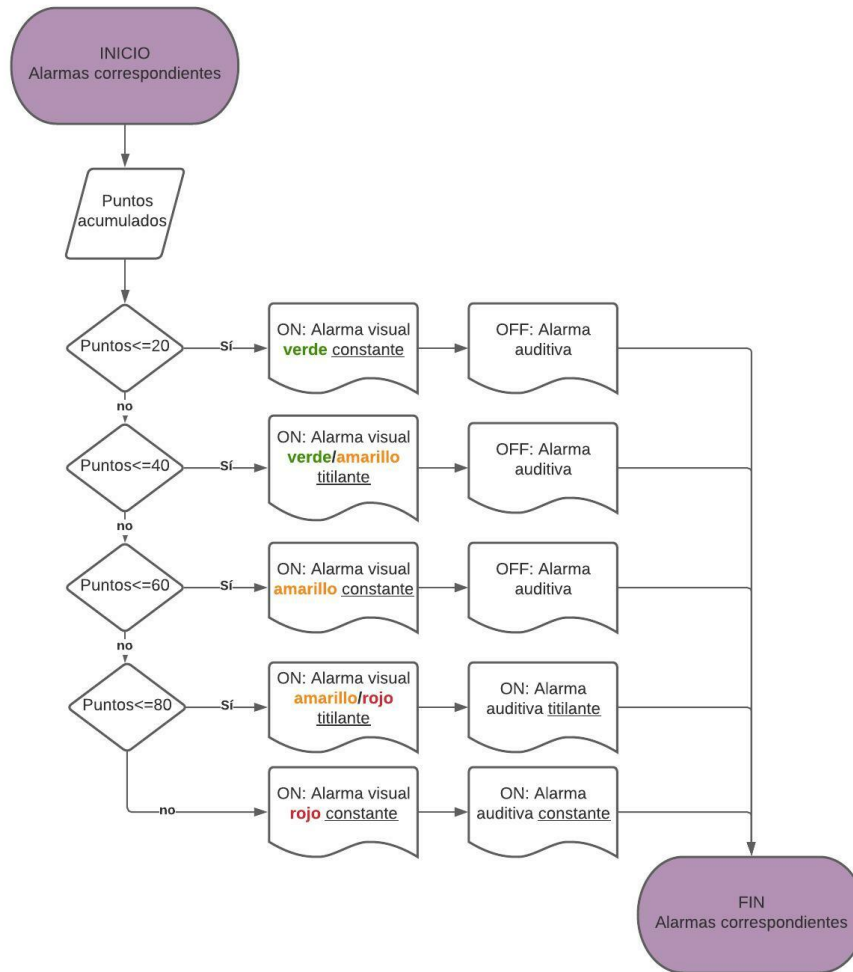


Figura 3-98.: Algoritmo desarrollado para el . Imagen elaborada por el autor.

# 4. Conclusiones

## 4.1. Conclusiones

Se diseñó un dispositivo que permitiría la asistencia del observador en sus tareas de supervisión sobre el ejercicio de la prensa de banco. Esto a través de la aplicación práctica de la metodología propuesta por G.Dieter y L.Schmidt [20] para el desarrollo conceptual, materialización y desarrollo de planos de los componentes del sistema de seguridad para el ejercicio de la prensa de banco; metodología que le permitió al autor enfocar sus esfuerzos en un proceso que diera respuesta a las necesidades más relevantes para el practicante de la prensa de banco.

Se consolidó el diseño de un sistema mecánico capaz de enfrentar y asegurar la carga que amenace la integridad de las personas que se encuentren desarrollando el ejercicio de la prensa de banco. Esto demostrado mediante la verificación con elementos finitos de un factor de seguridad apropiado, ofrecido por parte del diseño mecánico para soportar los esfuerzos resultantes de soportar el peso levantado por el practicante de la prensa de banco.

Se consolidó el diseño de un sistema electrónico capaz de guiar al observador en el desarrollo de su tarea. Esto a través de la consolidación de un algoritmo y conjunto de hardware formulados para el reconocimiento y alerta sobre patrones de riesgo durante el desarrollo del ejercicio de la prensa de banco.

La implementación del método formulado por el autor para la selección y colocación de perfiles de soldadura demostró su efectividad con respecto a la optimización de recursos y la evasión de sobredimensionamientos en el diseño de estructuras mecánicas especiales. Esto verificado sobre los análisis de elementos finitos, cuyos resultados expresan un factor de seguridad homogéneo en gran parte del soporte desarrollado usando esta técnica.

Con objeto de garantizar el funcionamiento de un armazón, se recomienda durante el diseño este, investigar y considerar las condiciones más críticas que se le puedan presentar. Esto se puede contemplar en el diseño de la estructura de soporte, dónde garantizó el funcionamiento este mediante una comprobación de factor de seguridad con una carga considerablemente superior (500Kg) a la soportada por practicantes promedio (80 - 150Kg) del ejercicio de la prensa de banco.

El método morfológico de diseño ofrece más posibilidades para la formulación de soluciones de las que se presentan en el proceso descrito por G.Dieter y L.Schmidt [20]. Puesto que la combinación de varias soluciones para un mismo subproblema puede resultar en conceptos innovadores. Una muestra de ello es el caso del concepto seleccionado para la medición de cinemática espacial a través de la implementación cooperativa entre el acelerómetro y el transductor de posición con cable.

Es de gran importancia seguir al pie de la letra la metodología de diseño propuesta por G.Dieter y L.Schmidt [20], prestando especial cuidado a la revisión de literatura y asesoría de terceros, para evitar predisponer la evolución del proyecto en una dirección que ignore otras soluciones potenciales.

## 4.2. Futuras mejoras

Durante el desarrollo de este trabajo se observaron aspectos que pueden ser mejorados y formas en que podría complementarse el sistema de seguridad diseñado. Estos se presentan a continuación, dentro de los grupos constituidos para diferenciar las ideas concernientes con el diseño mecánico de las relacionadas con el diseño electrónico.

### Del Diseño mecánico:

- Analizar el incremento de la fuerza que deberían soportar los componentes ante la fuerza de choque que se manifestaría cuando el accionamiento automático frena la caída libre de la barra (teorema del impulso).
- El subsistema de corredera de ajuste podría mejorarse para que el accionamiento automático se mueva en sincronía con el carro de la corredera industrial, de esta manera que se brinde aún mayor libertad al movimiento de la carga.
- Añadir seguros para garantizar aún más la posición de la corea sobre los rodillos, especialmente cuando el conjunto de poleas se encuentre en movimiento
- Estudio de tornillería y métodos de soldadura apropiados.
- Aplicación de la 2da etapa de la QFD para la identificación de características de pieza más importantes.
- Aplicación de la 3ra etapa de la QFD Para la identificación de los procesos de manufactura más relevantes.

- Aplicación de la 4ta etapa de la QDF, para la optimización del proceso de manufactura.
- Ampliar el método diseñado por el autor para la selección de perfiles de soldadura, abriendo su aplicación sobre perfiles circulares y de tipo I, C, y L.
- Mejorar el diseño de los rodillos para evitar pérdidas de energía por rozamiento.
- Agregar al diseño mecánico la posibilidad de que el trinquete sea acomodado su accionamiento con el pie izquierdo.
- Desarrollar un estudio de las oportunidades del soporte mecánico en el mercado de equipos de seguridad para el entrenamiento muscular.

#### **Del Diseño electrónico:**

- Desarrollar un prototipo físico del complemento electrónico para cosechar una base de datos, a partir de la cual se complemente el algoritmo desarrollado con un entrenamiento basado en inteligencia artificial y ajustar más apropiadamente los siguientes parámetros:
  - Puntajes asignados a cada variable de riesgo.
  - Puntajes correspondientes con la activación de las alarmas.
  - Nivel de ruido de los sensores para la detección de la ubicación de la carga.
  - Ángulos correspondientes con la bajada y subida de la carga.
- Estudiar patrones de fallo relativos a la cinemática espacial de la barra e incorporar la medición de desplazamiento de la carga fuera del plano sagital para la detección dichos patrones.
- Considerar el efecto de la separación entre muñecas en el desempeño del ejercicio de la prensa de banco. Esto implicaría el uso de sensores adicionales [28].
- Agregar al complemento electrónico la posibilidad de almacenar el desempeño de un mismo usuario para detectar patrones de fallo desde la primera repetición.
- Complementar el equipo tradicional de la prensa de banco con una báscula electrónica, mediante la cual se informe al usuario del peso total que ha cargado sobre la barra; además de un número estimado de repeticiones antes del fallo muscular (estudio de Izquierdo et al [33]).
- Profundizar en las normas IPC para el diseño de circuitos electrónicos.
- Revisar otras opciones de acople de potencia diferentes del módulo relé.

- Asegurar la frecuencia mínima de muestreo de los sensores mediante un estudio del tiempo empleado por el microcontrolador para efectuar el algoritmo de reconocimiento de patrones entre una muestra y la siguiente.
- Desarrollar un estudio de las oportunidades del complemento electrónico en el mercado de equipos para complementar el entrenamiento muscular.

## A. Anexo: Planos de diseño mecánico



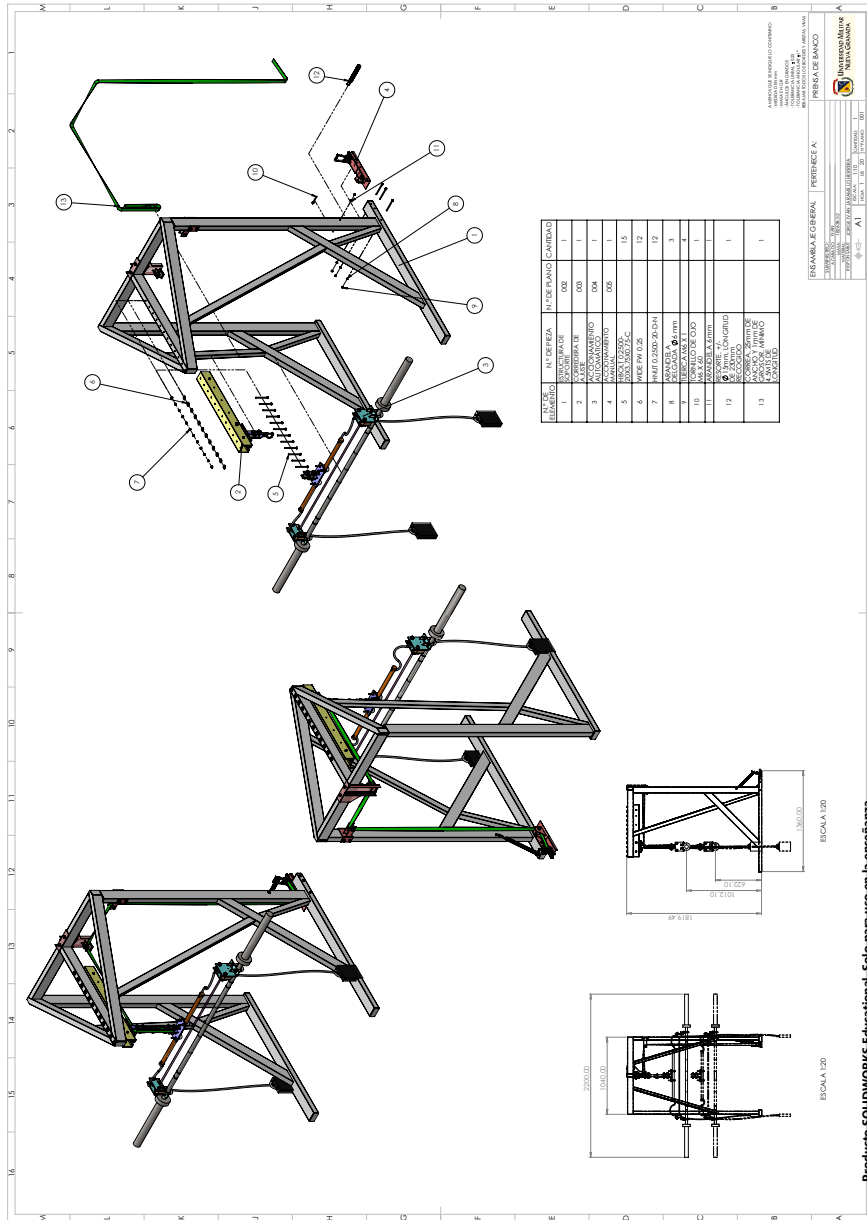


Figura A-1.: Plano 001, del "Ensamble General". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamblaje y dibujo de "Solidworks".



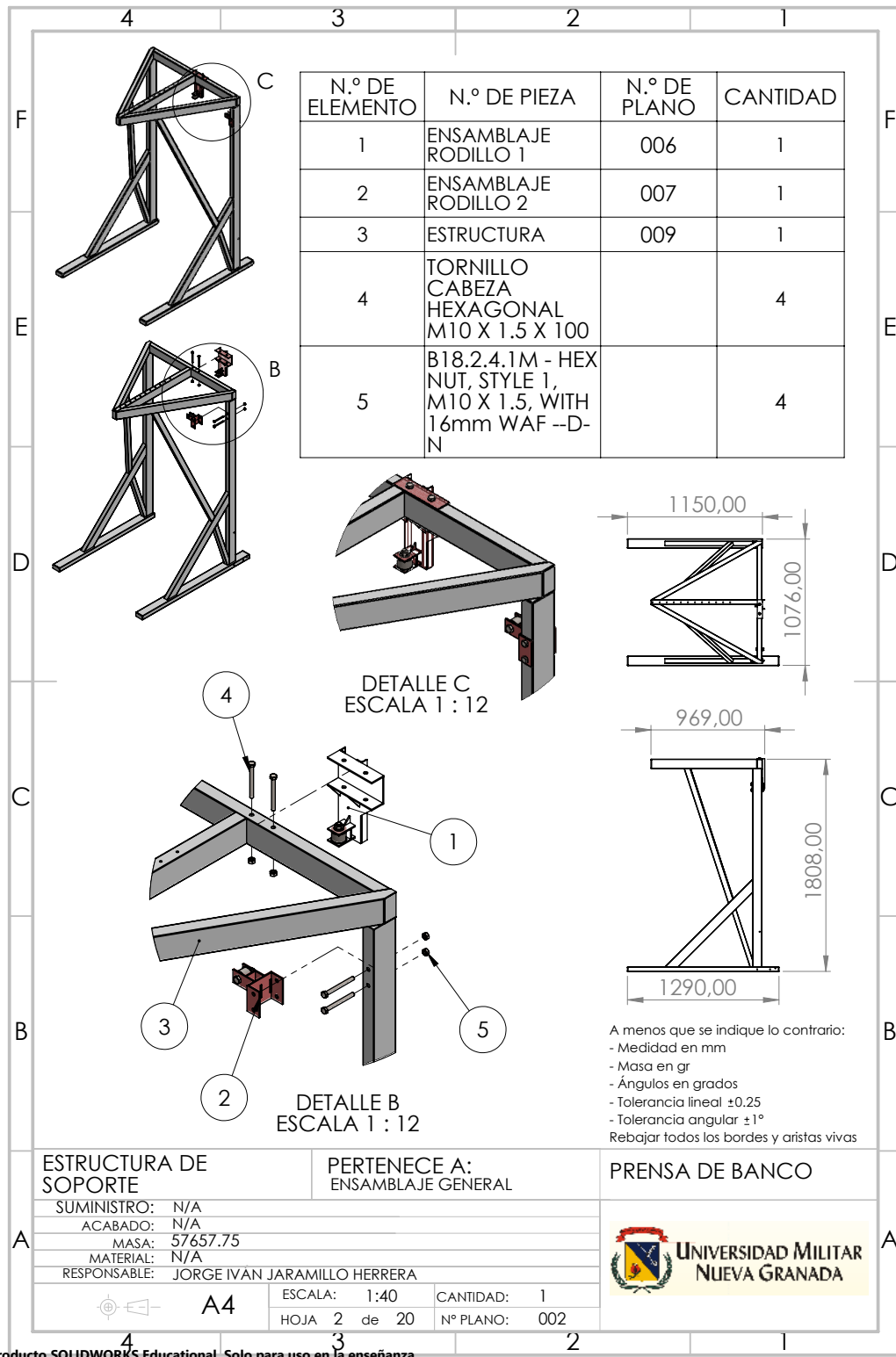


Figura A-2.: Plano 002, del ensamble "Estructura de Soporte". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".

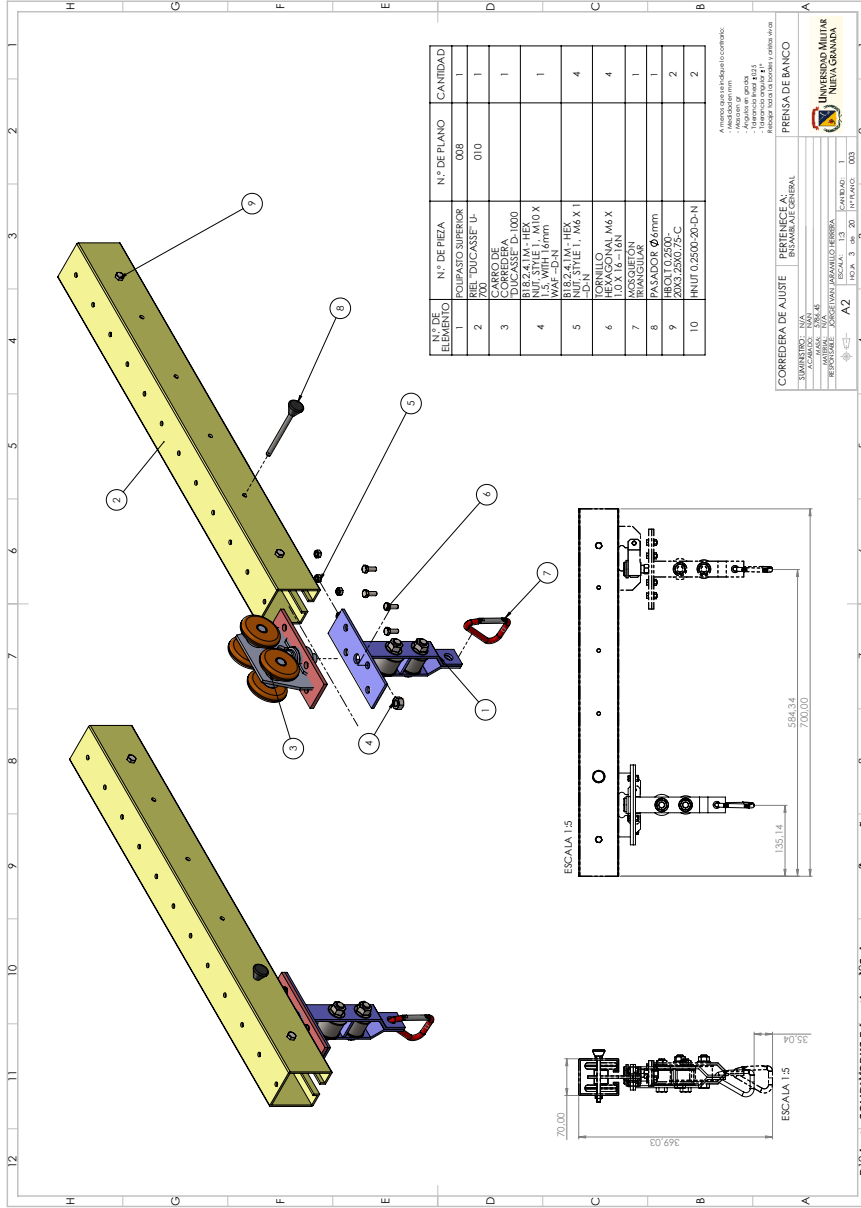


Figura A-3.: Plano 003, del ensamble "Corredera De Ajuste". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".

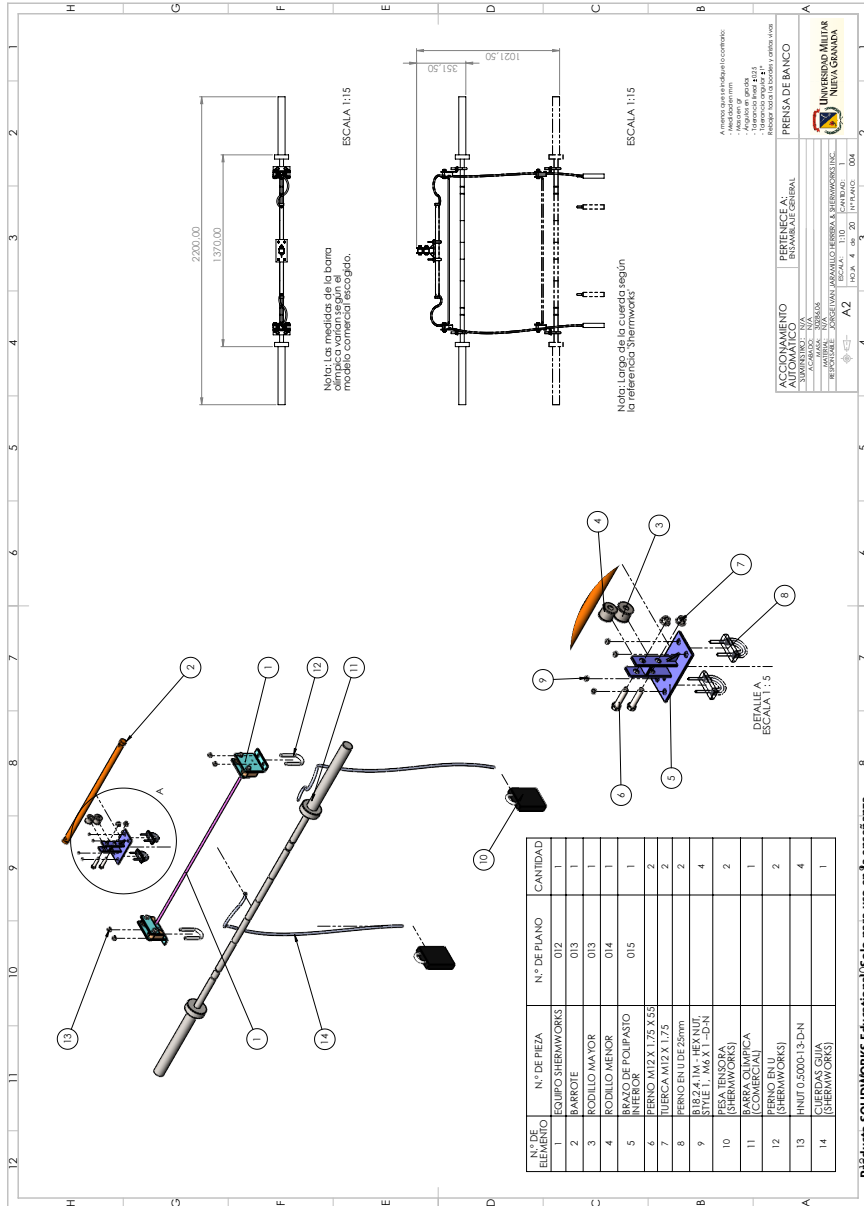


Figura A-4.: Plano 004, del ensamble "Accionamiento Automático": Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".

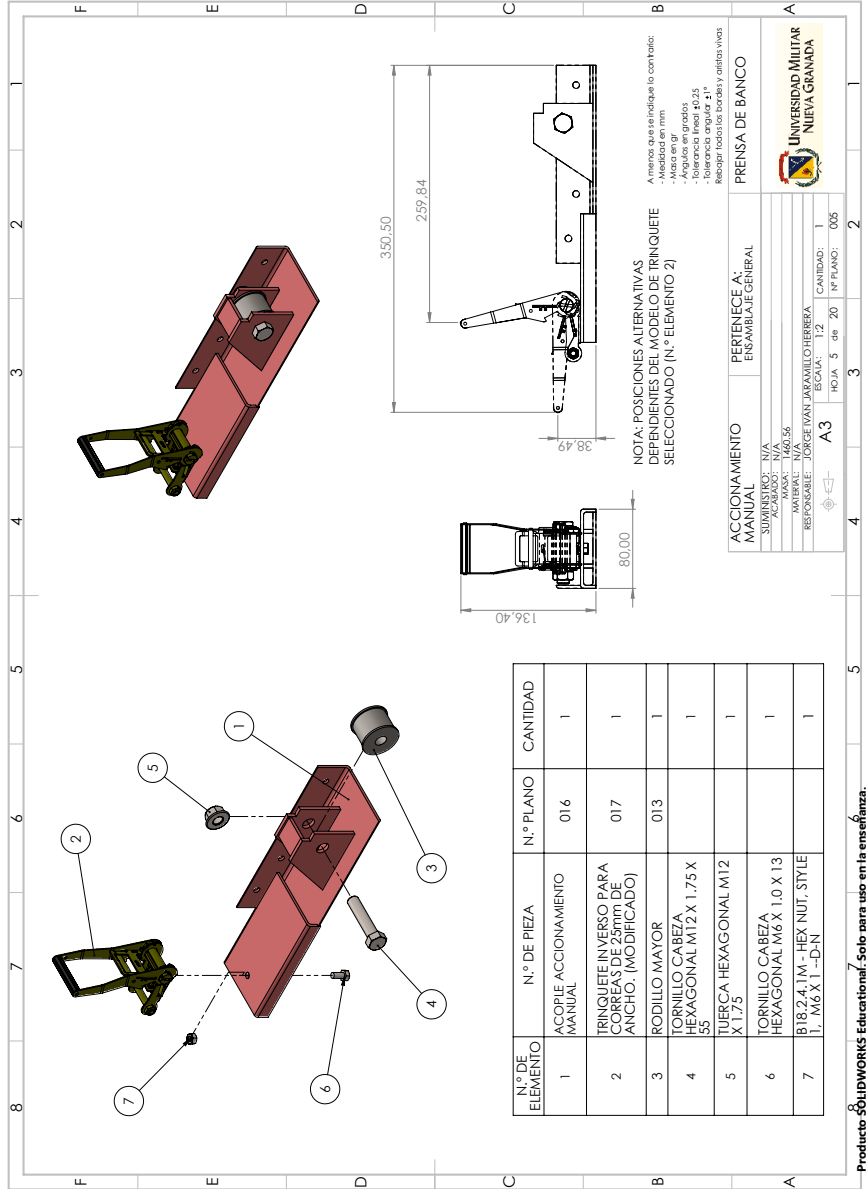
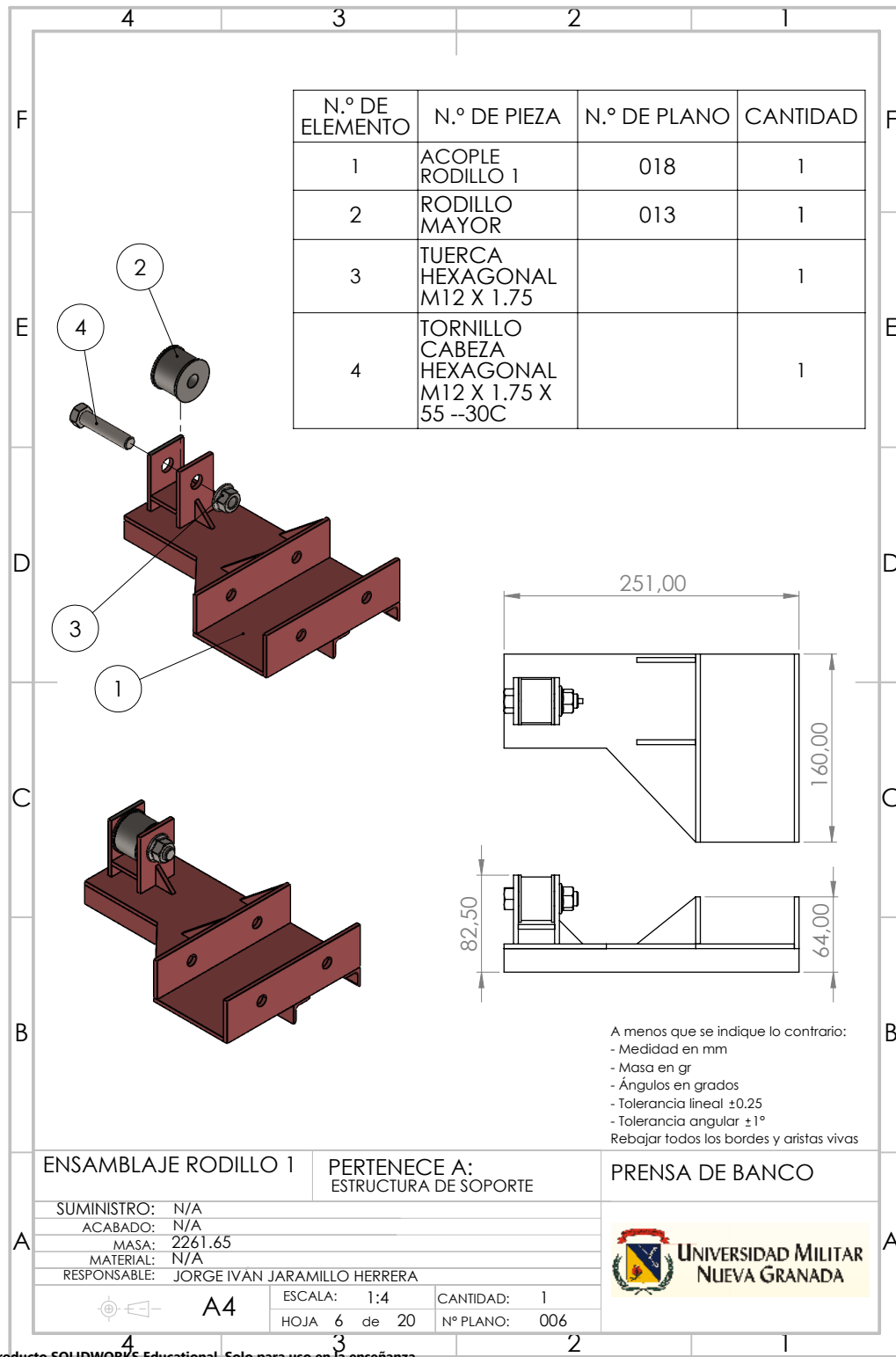


Figura A-5.: Plano 005, del ensamble "Accionamiento Manual". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".





**Figura A-6.:** Plano 006, del "Ensamblaje Rodillo 1". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamblaje y dibujo de "Solidworks".



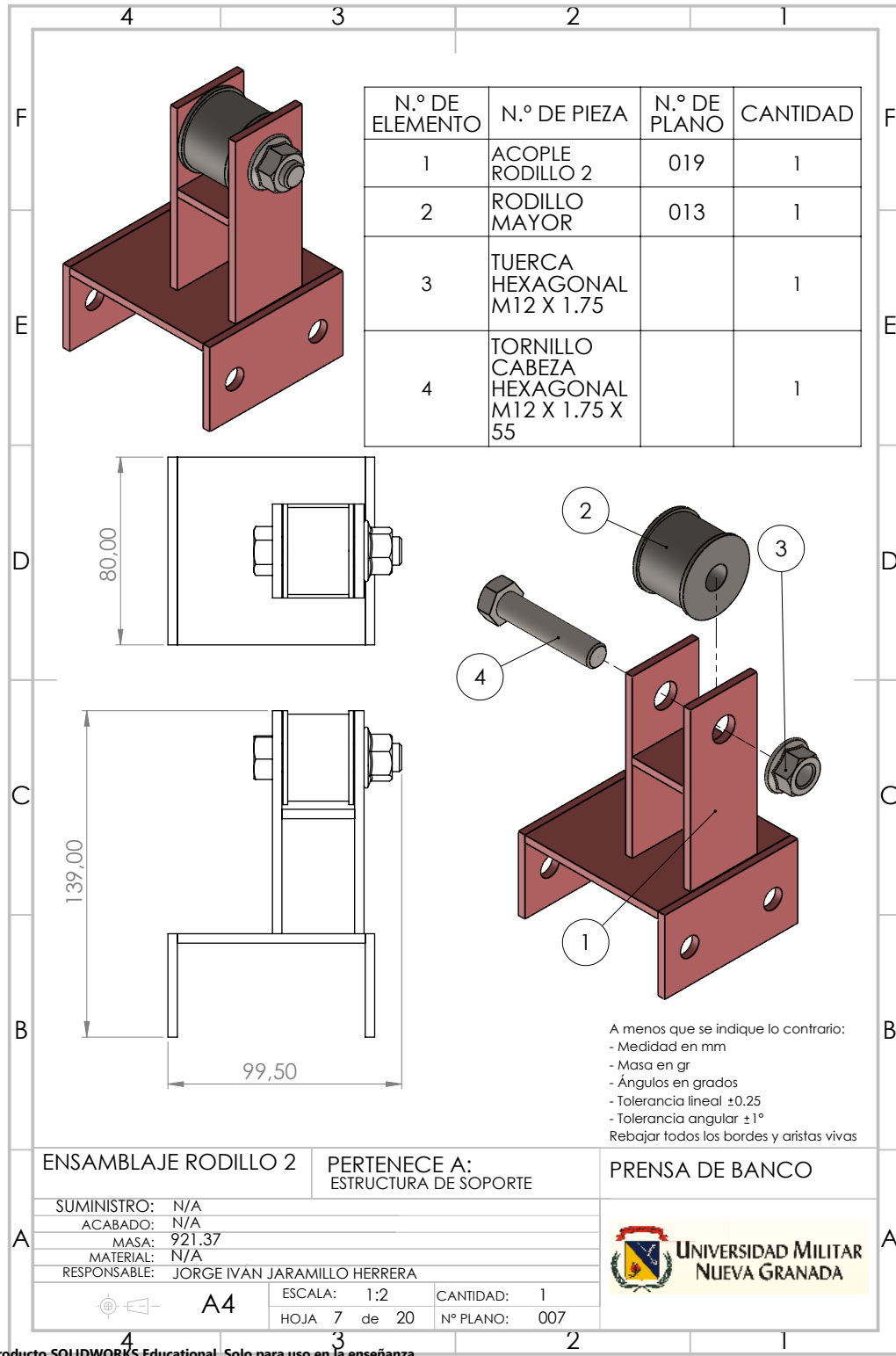


Figura A-7.: Plano 007, del "Ensamblaje Rodillo 2". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".

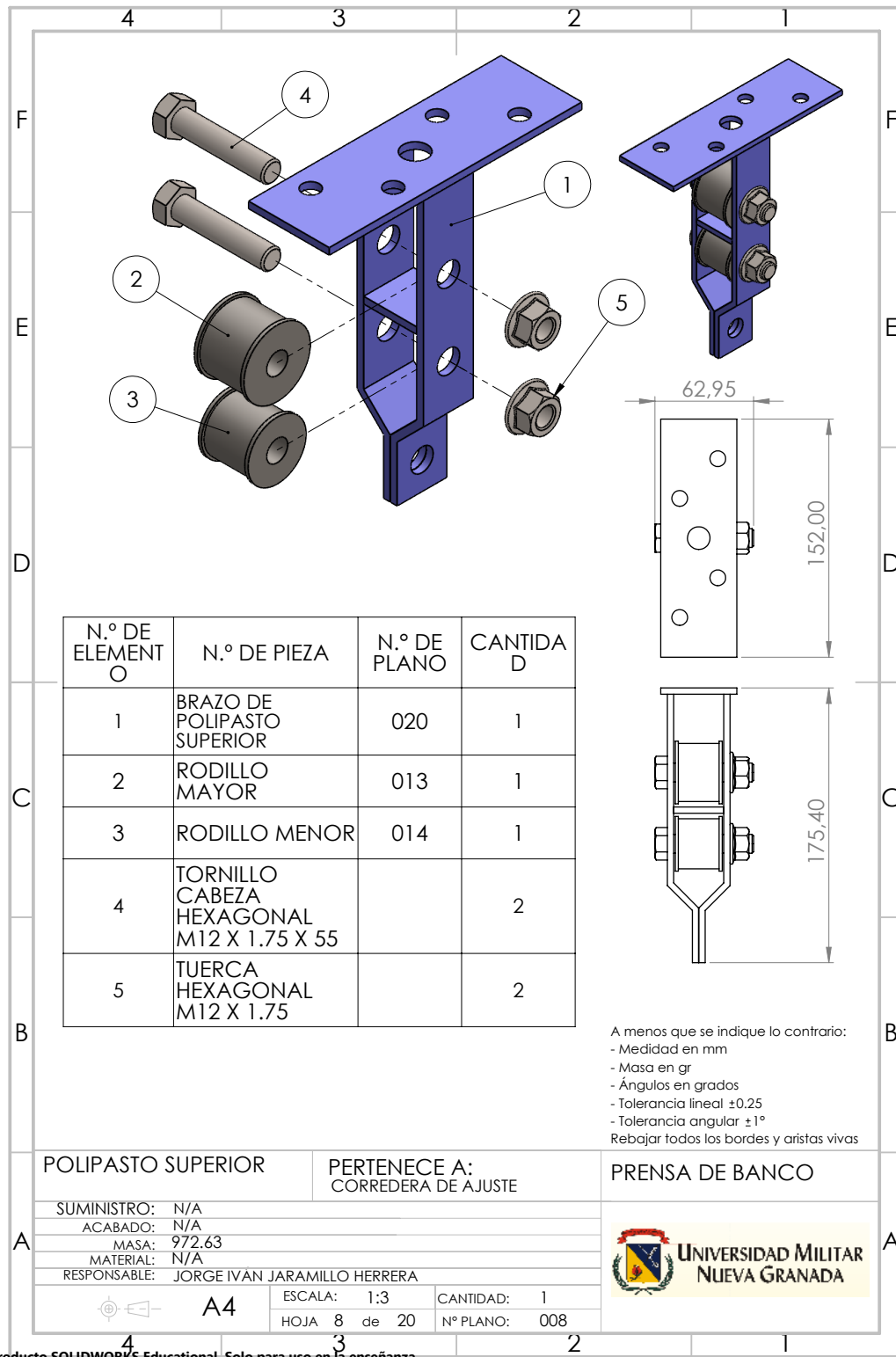


Figura A-8.: Plano 008, del ensamble "Polipasto Superior". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".

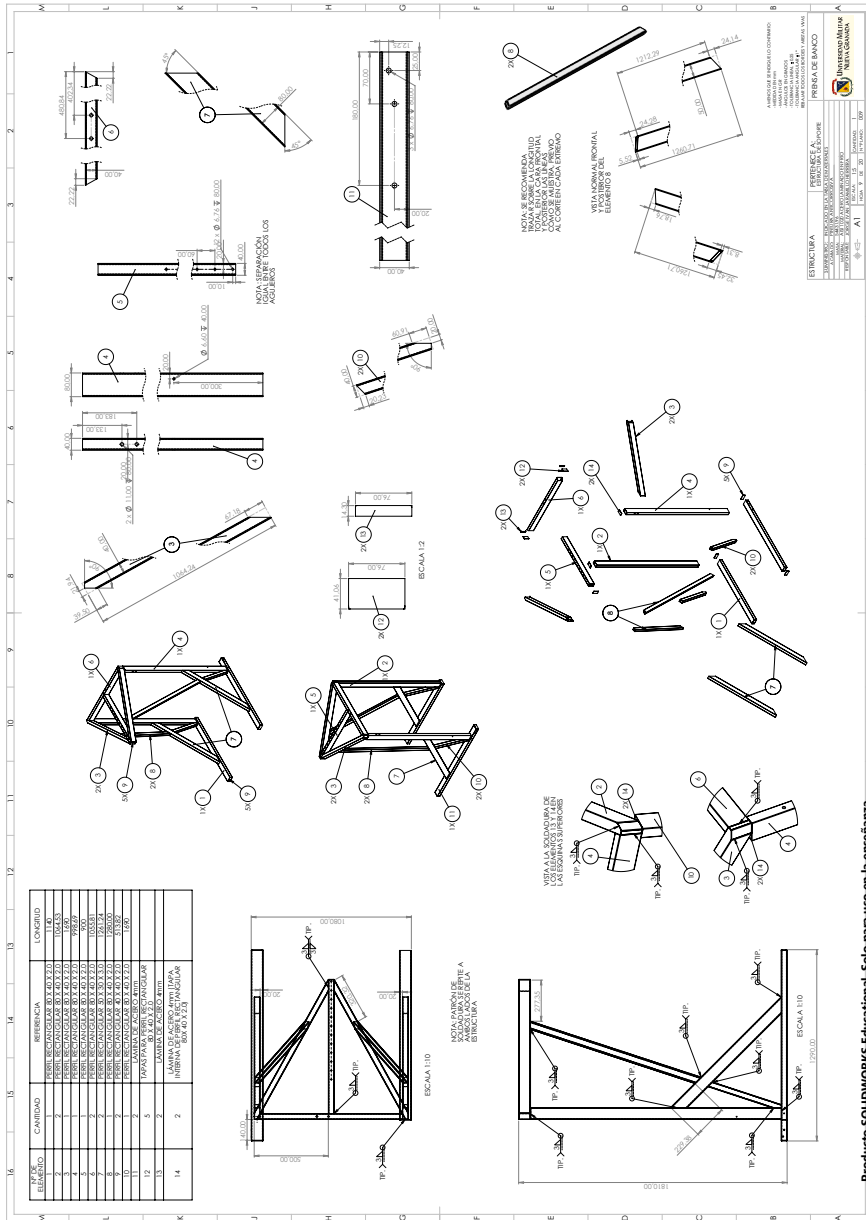
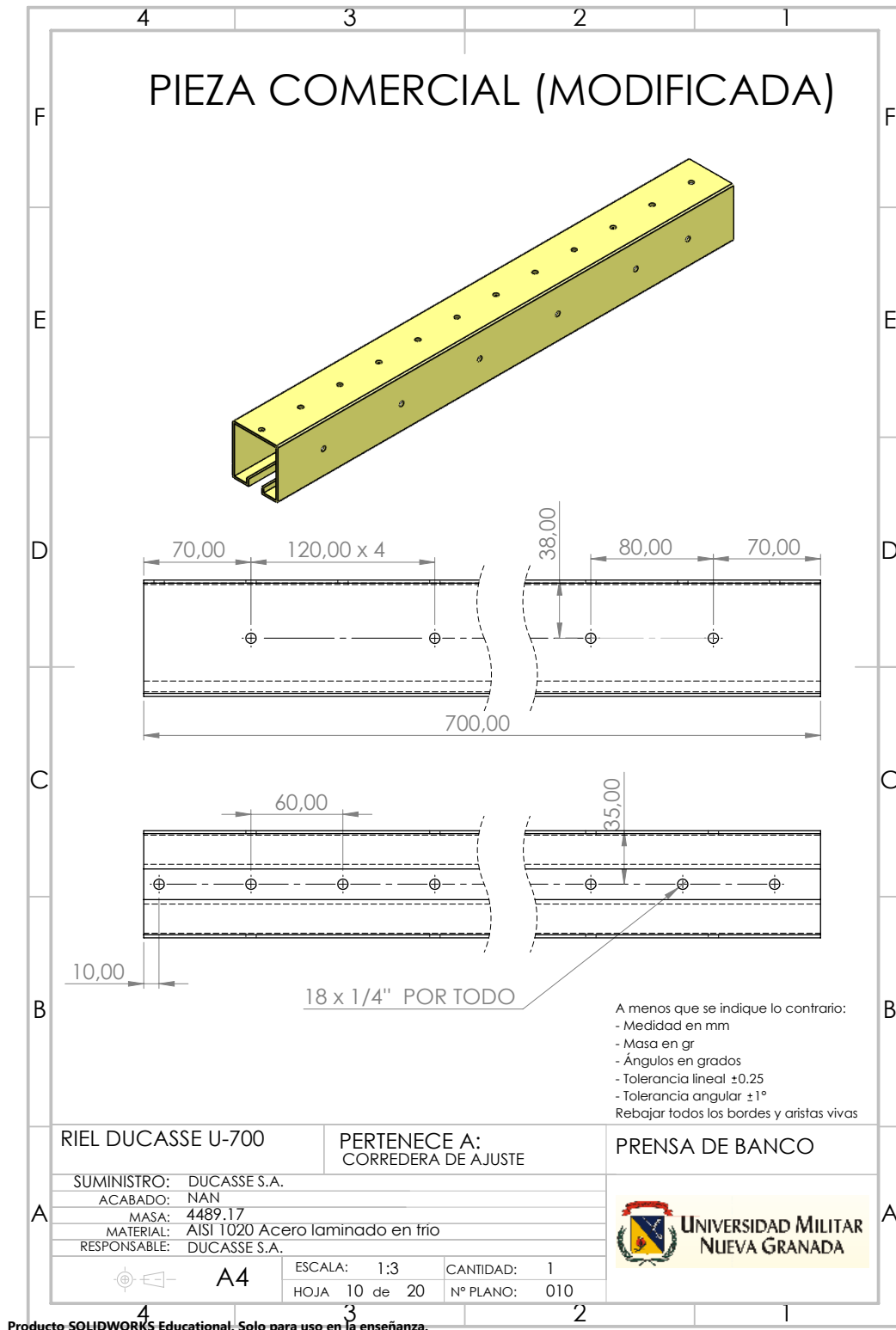
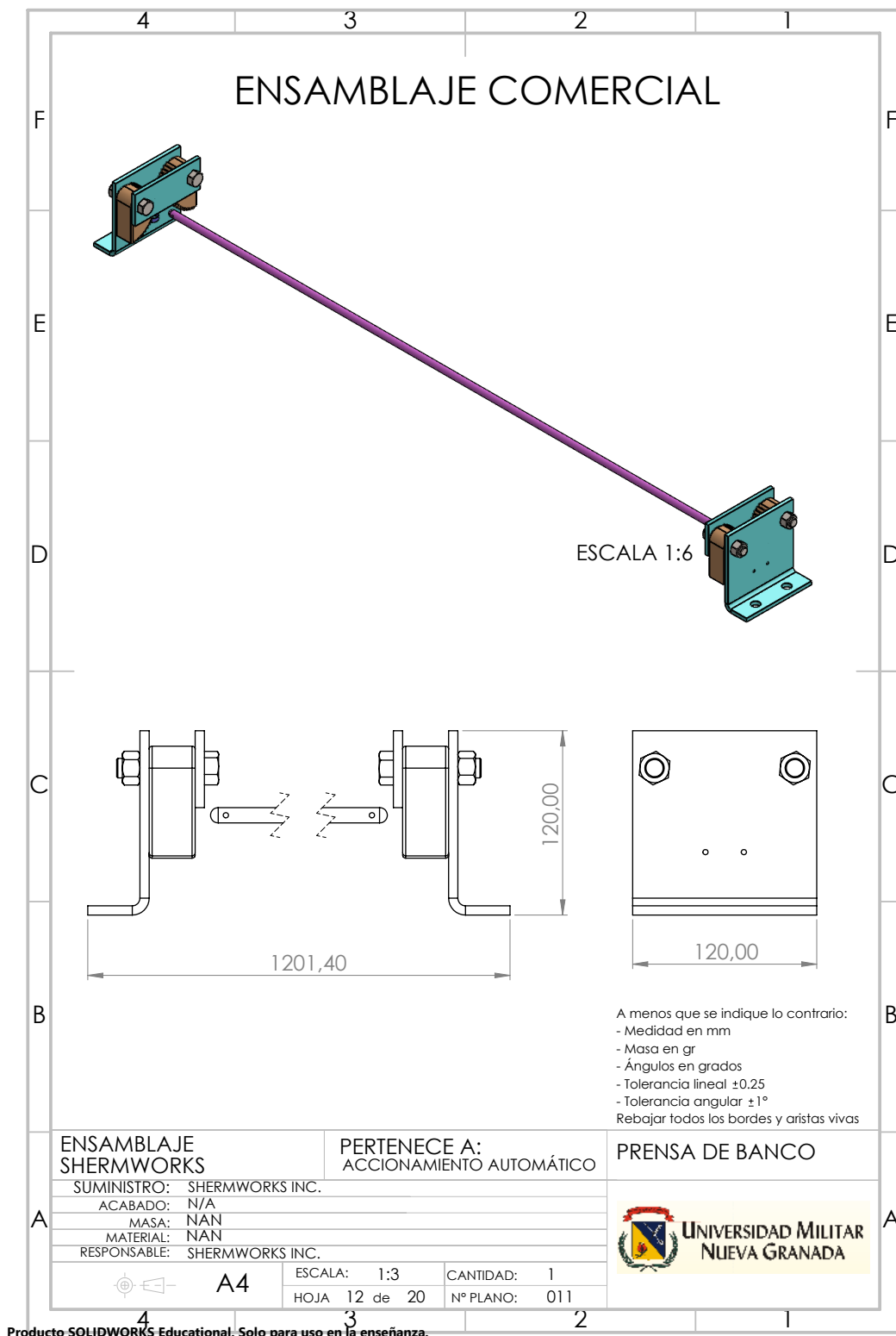


Figura A-9.: Plano 009, de la pieza "Estructura". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".





**Figura A-10.:** Plano 010, de la pieza comercial "Riel Ducasse U-700" [21]. Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".



**Figura A-11.:** Plano 011, del elemento comercial "Barbell Free Spotter" de la empresa Shermworks Inc [72]. Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

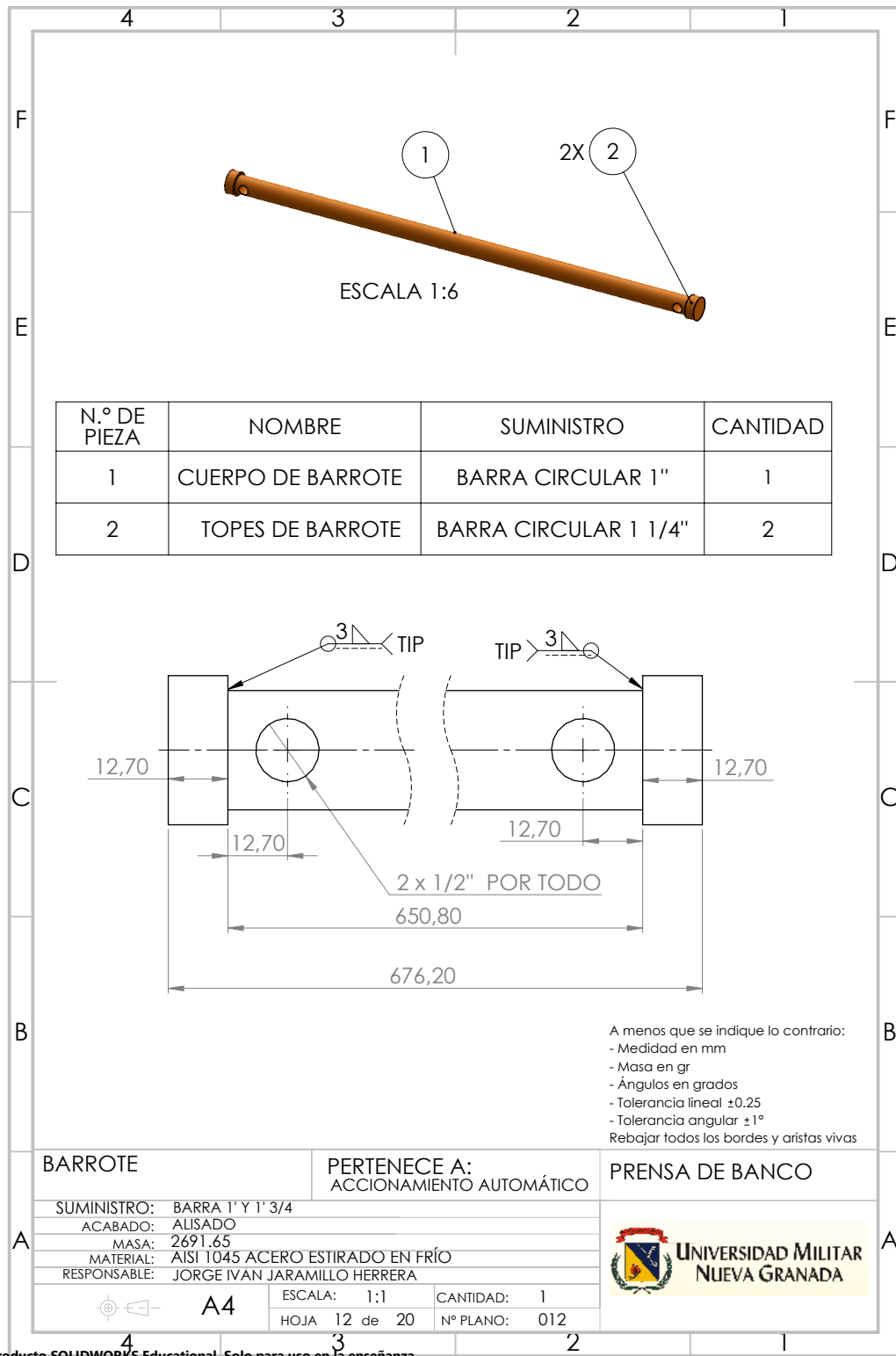
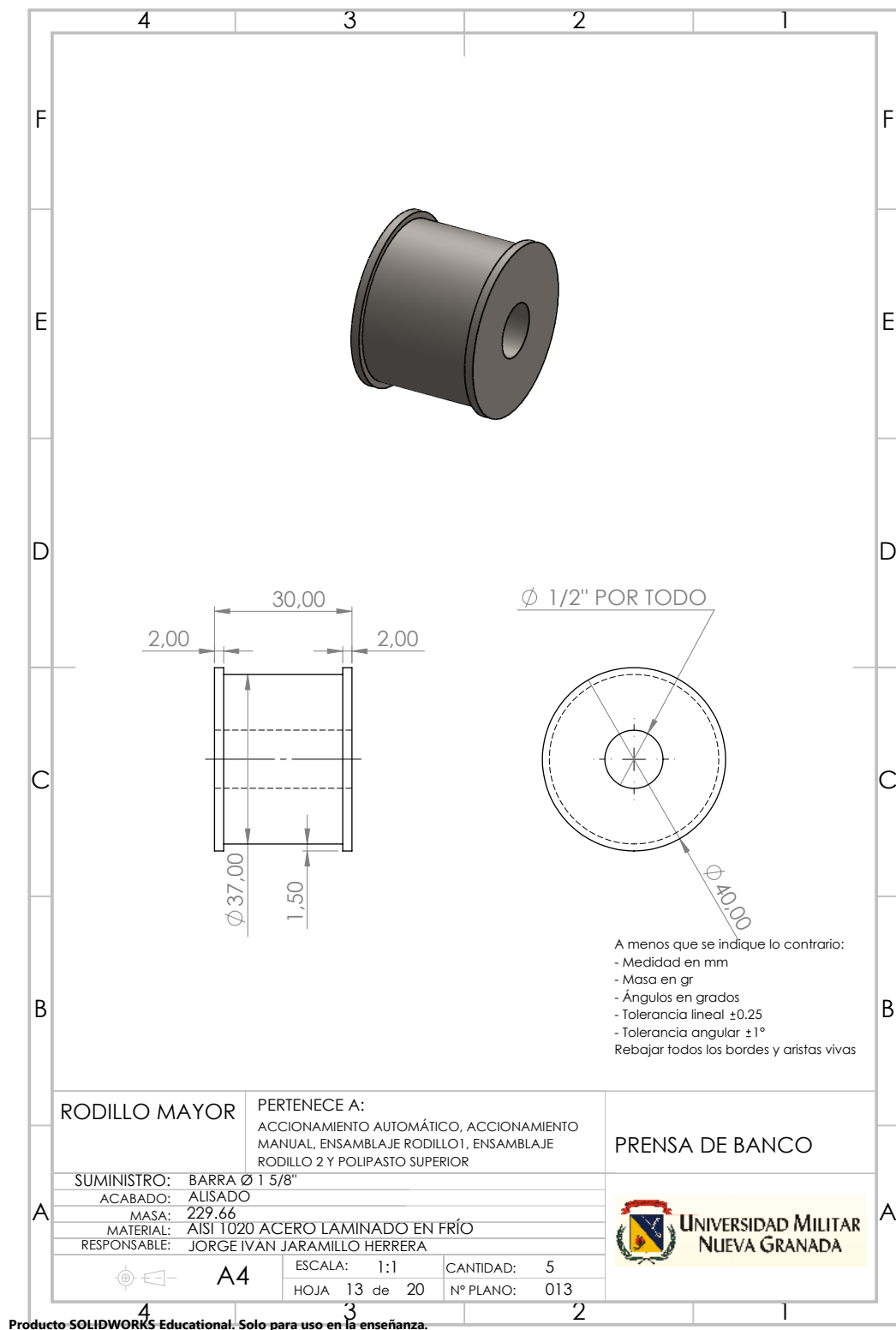


Figura A-12.: Plano 012, de la pieza "Barrote". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**Figura A-13.:** Plano 013, de la pieza "Rodillo Mayor". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".



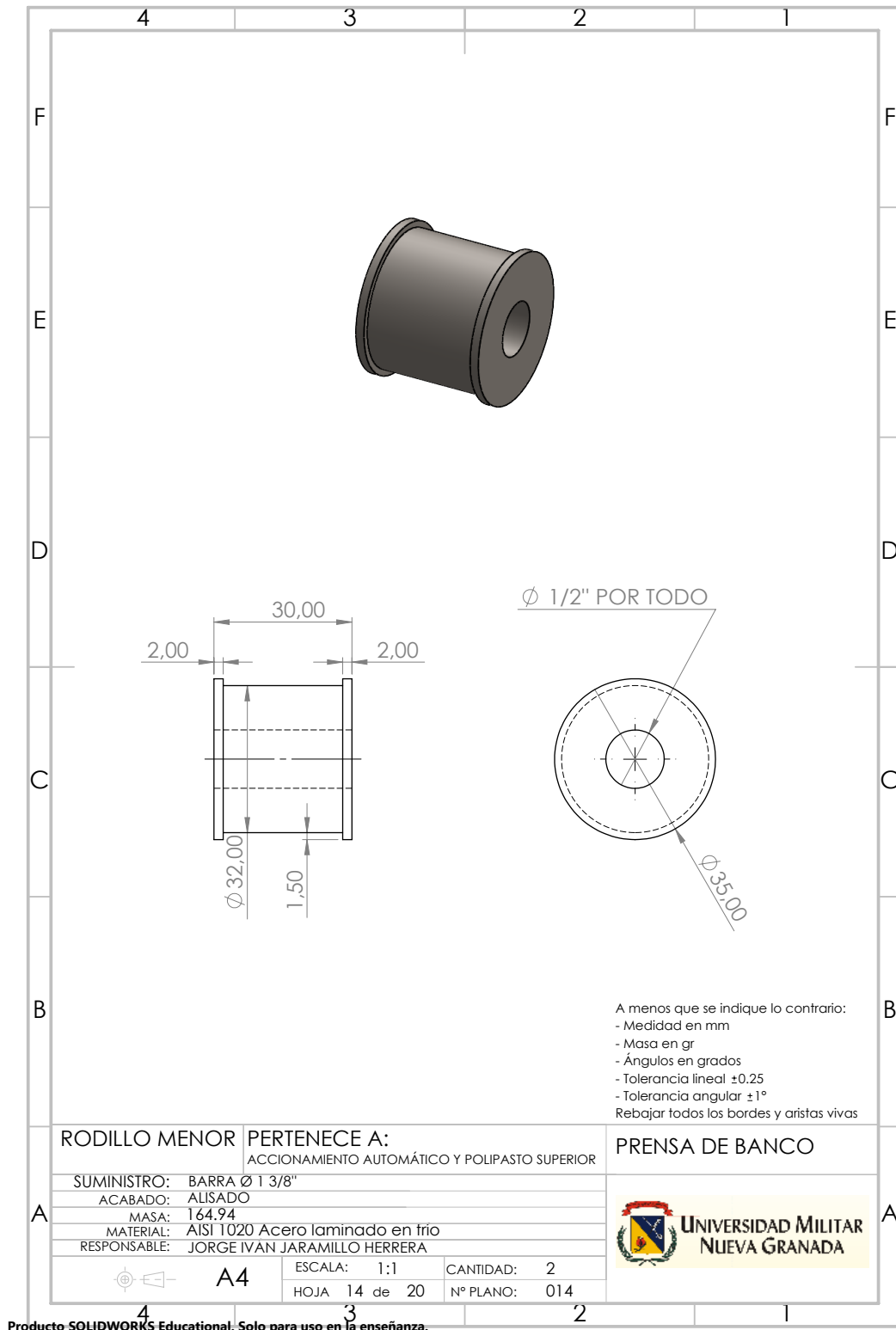


Figura A-14.: Plano 014, de la pieza "Rodillo Menor". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

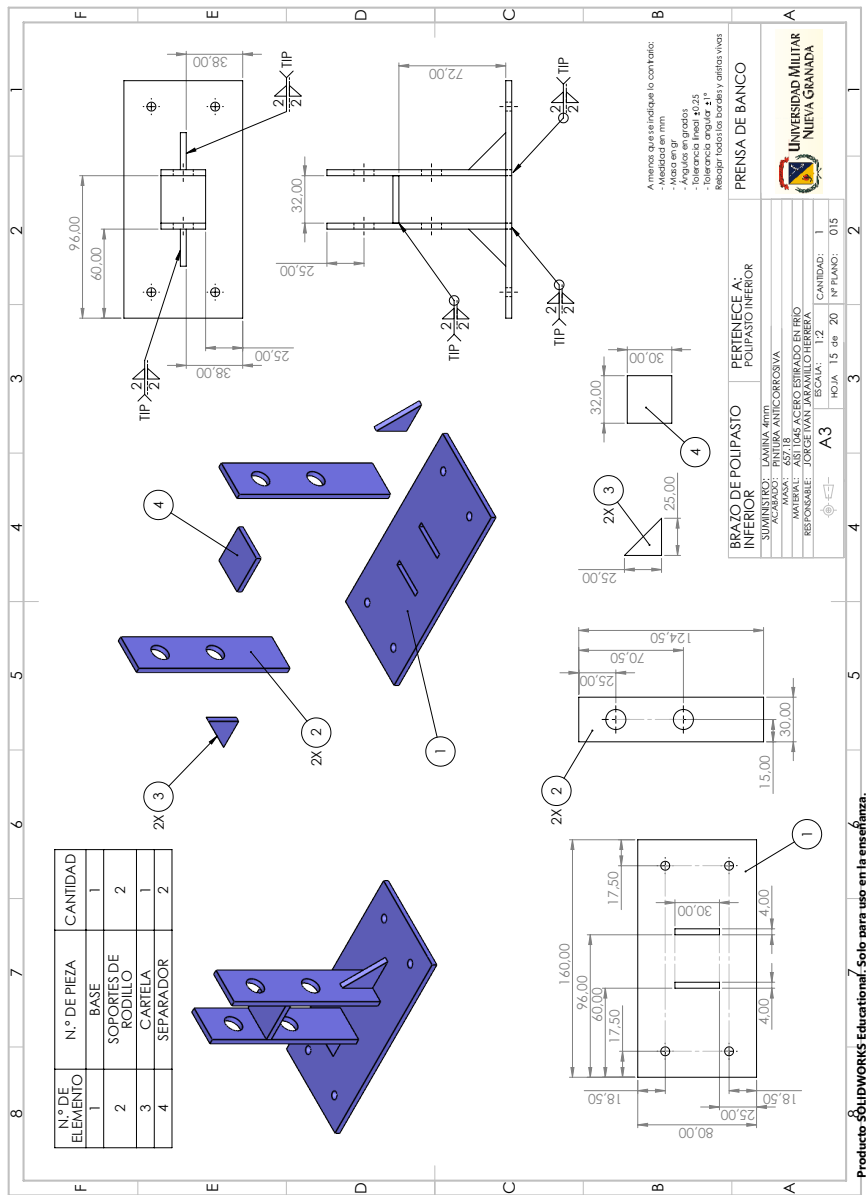


Figura A-15.: Plano 015, de la pieza "Brazo de Polipasto Inferior". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

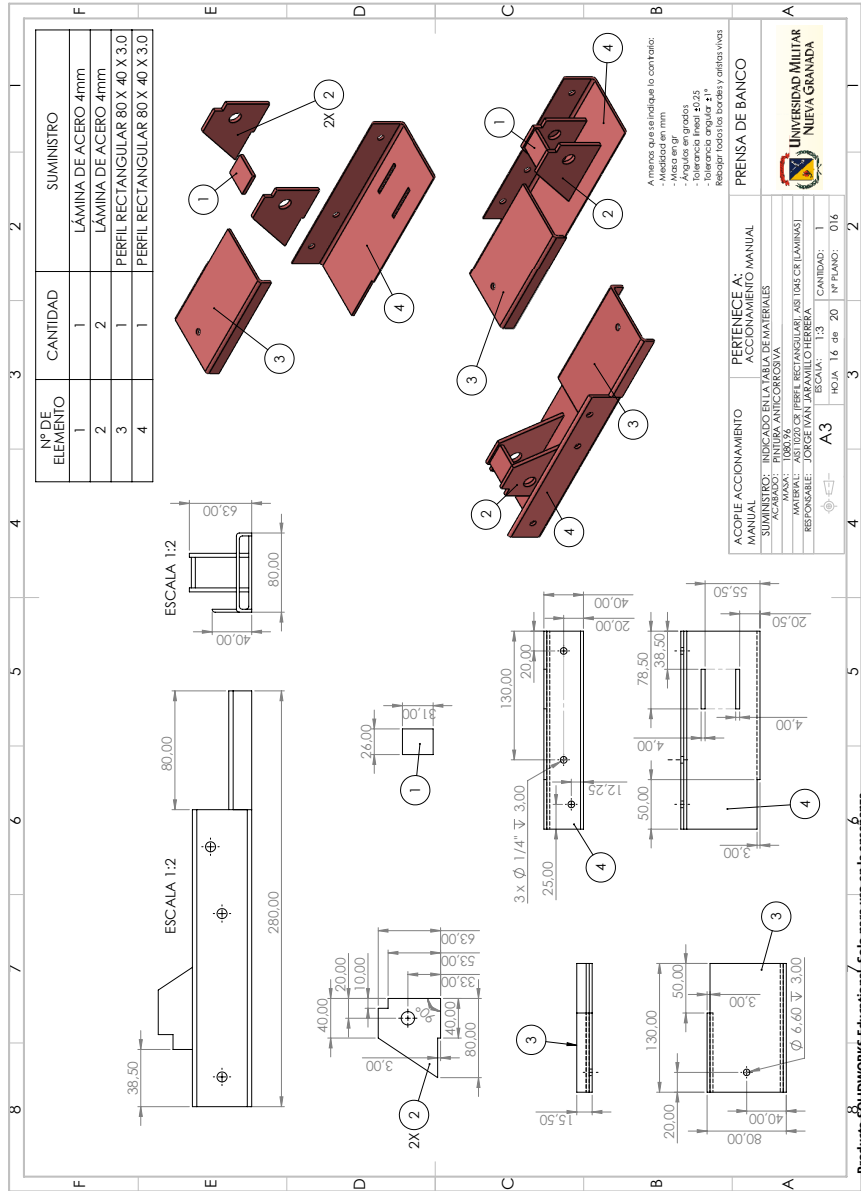
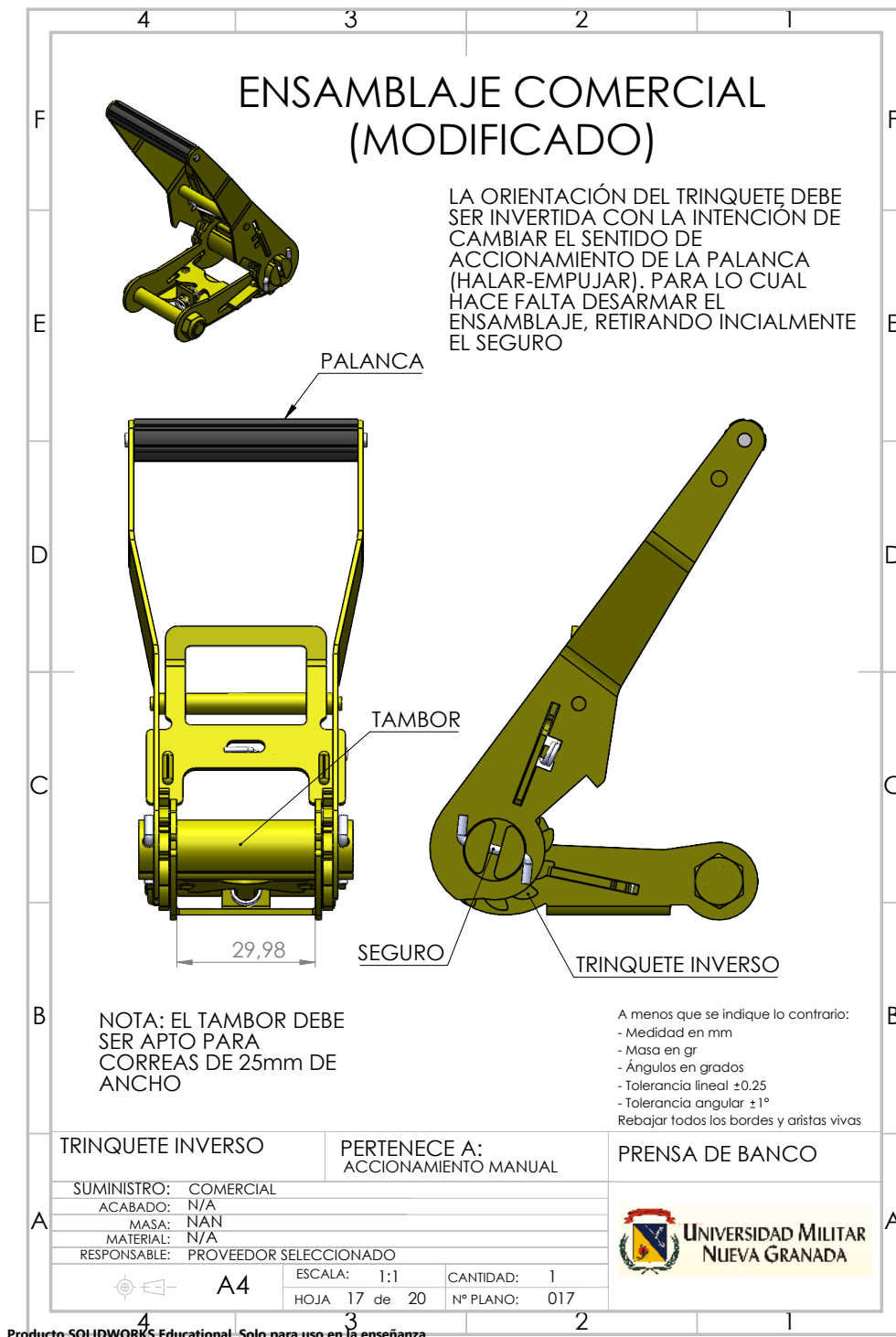


Figura A-16.: Plano 016, de la pieza "Acople Accionamiento Manual". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".





Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**Figura A-17.:** Plano 017, de la pieza comercial **modificada** "Trinquete Inverso". Modelo CAD desarrollado por M.Wade [?]; descargado y modificado posteriormente por el autor (Escala para correa de 25mm de ancho, y la orientación del trinquete invertida). Plano elaborado por el autor mediante la herramienta dibujo de "Solidworks".

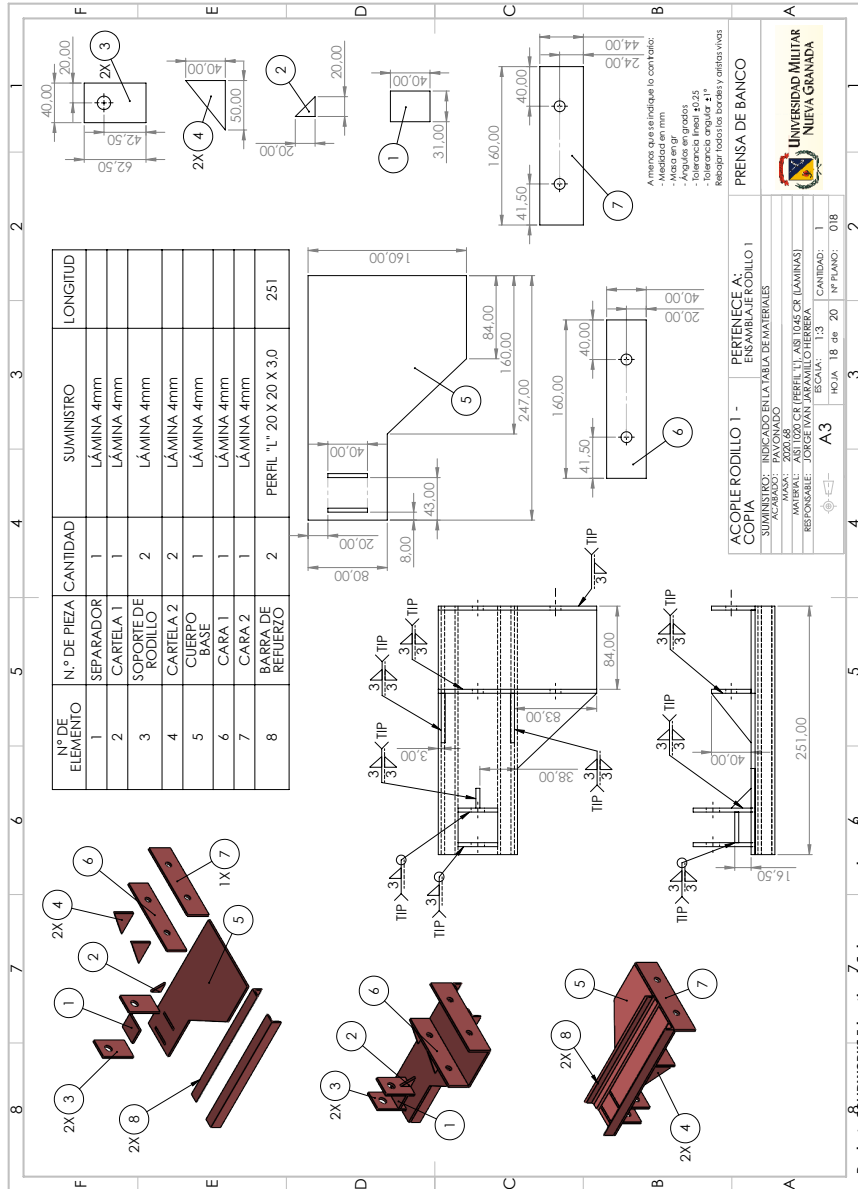


Figura A-18.: Plano 018, de la pieza "Acople Rodillo 1". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

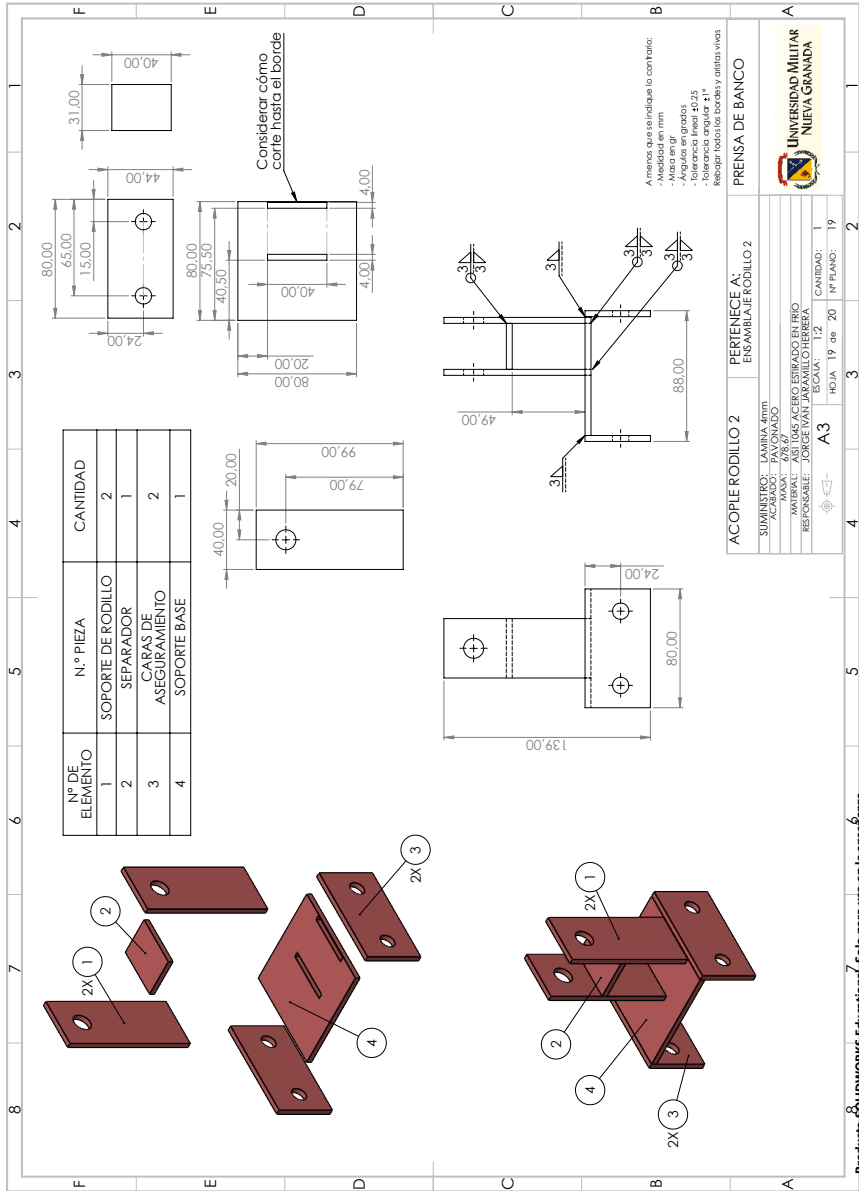


Figura A-19.: Plano 019, de la pieza "Acople Rodillo": Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

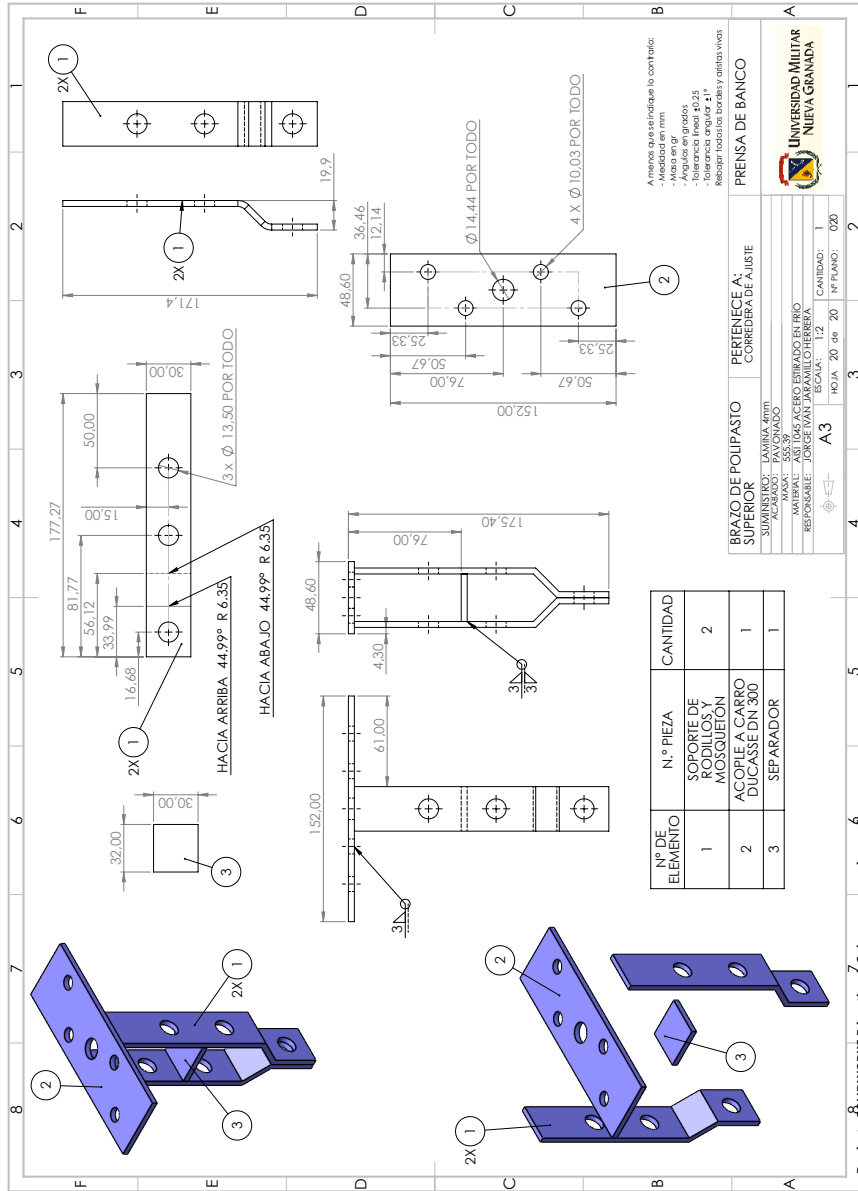


Figura A-20.: Plano 020, de la pieza "Brazo de Polipasto Superior". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".



## B. Anexo: Planos del complemento electrónico

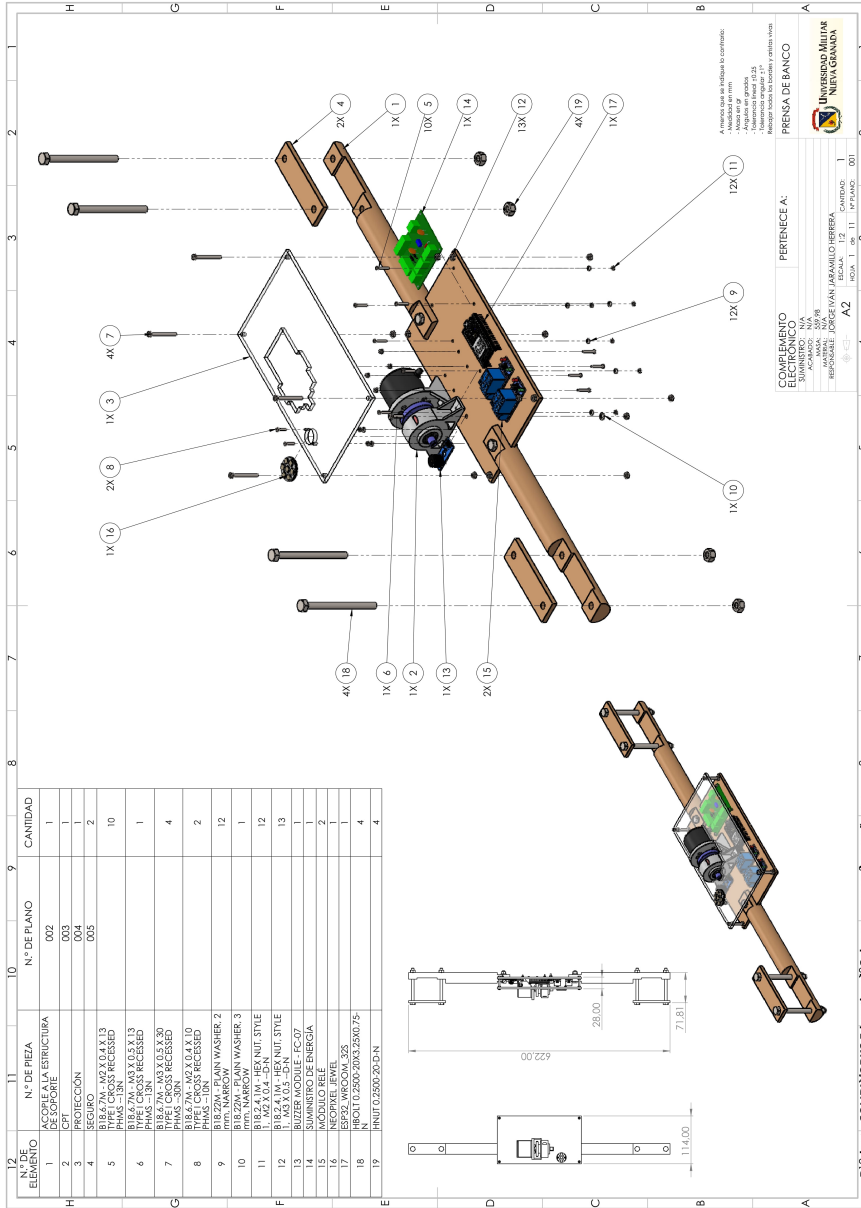


Figura B-1.: Plano 001, del conjunto "Complemento Electrónico". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamblaje y dibujo de "Solidworks".

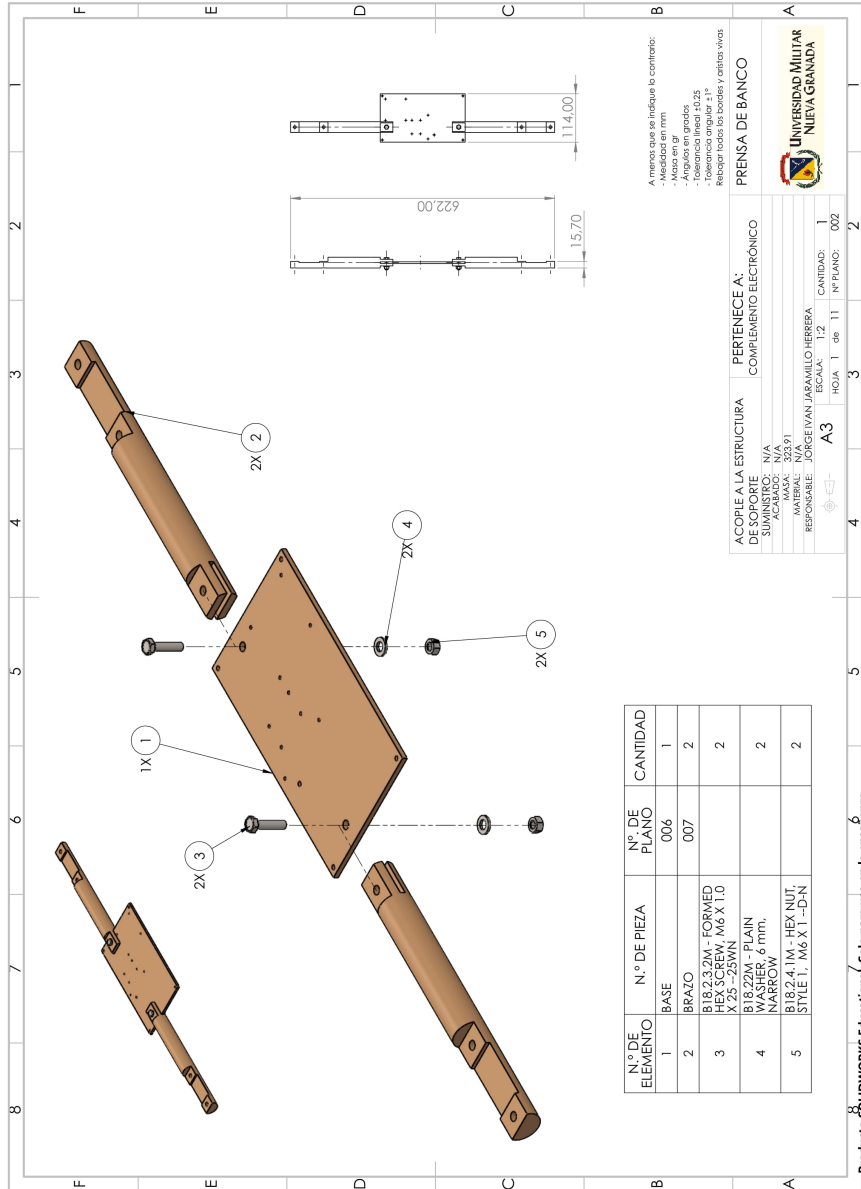


Figura B-2.: Plano 002, del conjunto "Acople a la Estructura de Soporte". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".

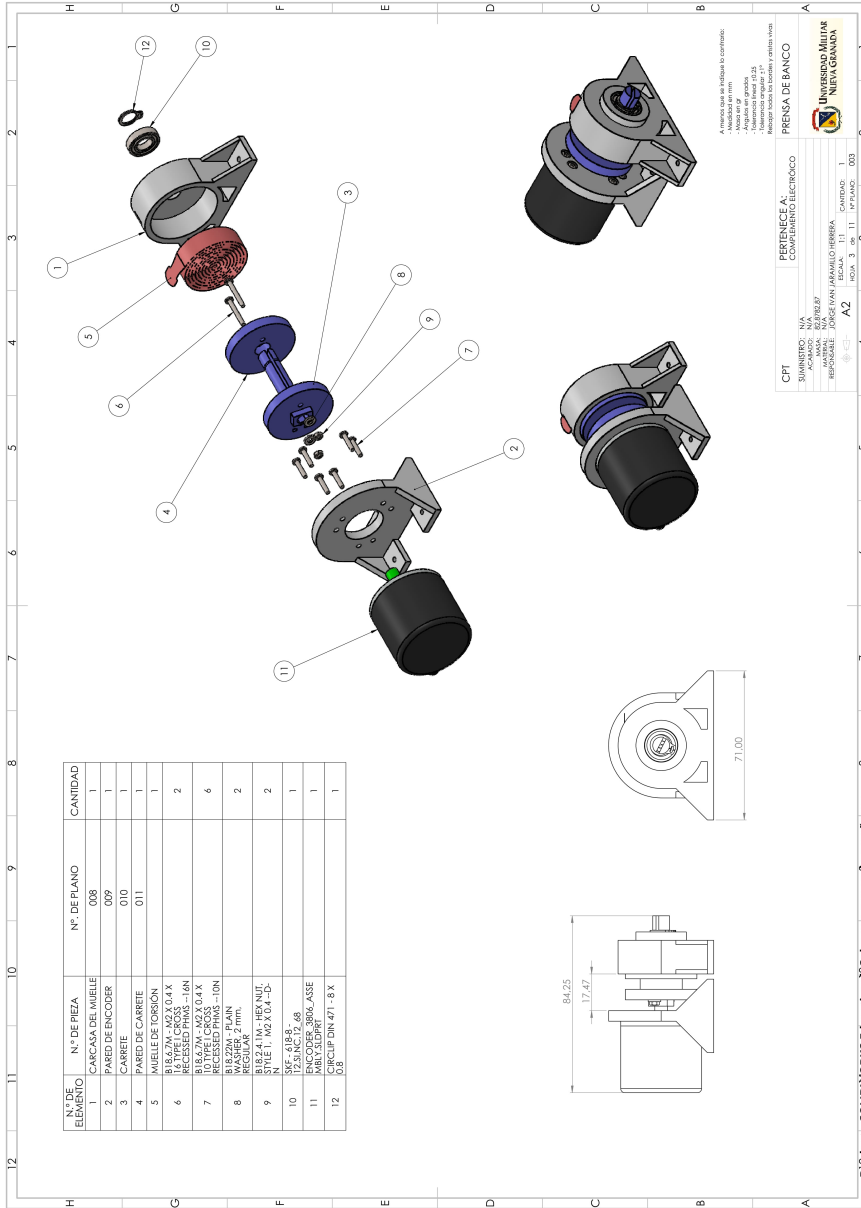


Figura B-3.: Plano 003, del conjunto "Transductor de Posición con Cable (CPT)". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".



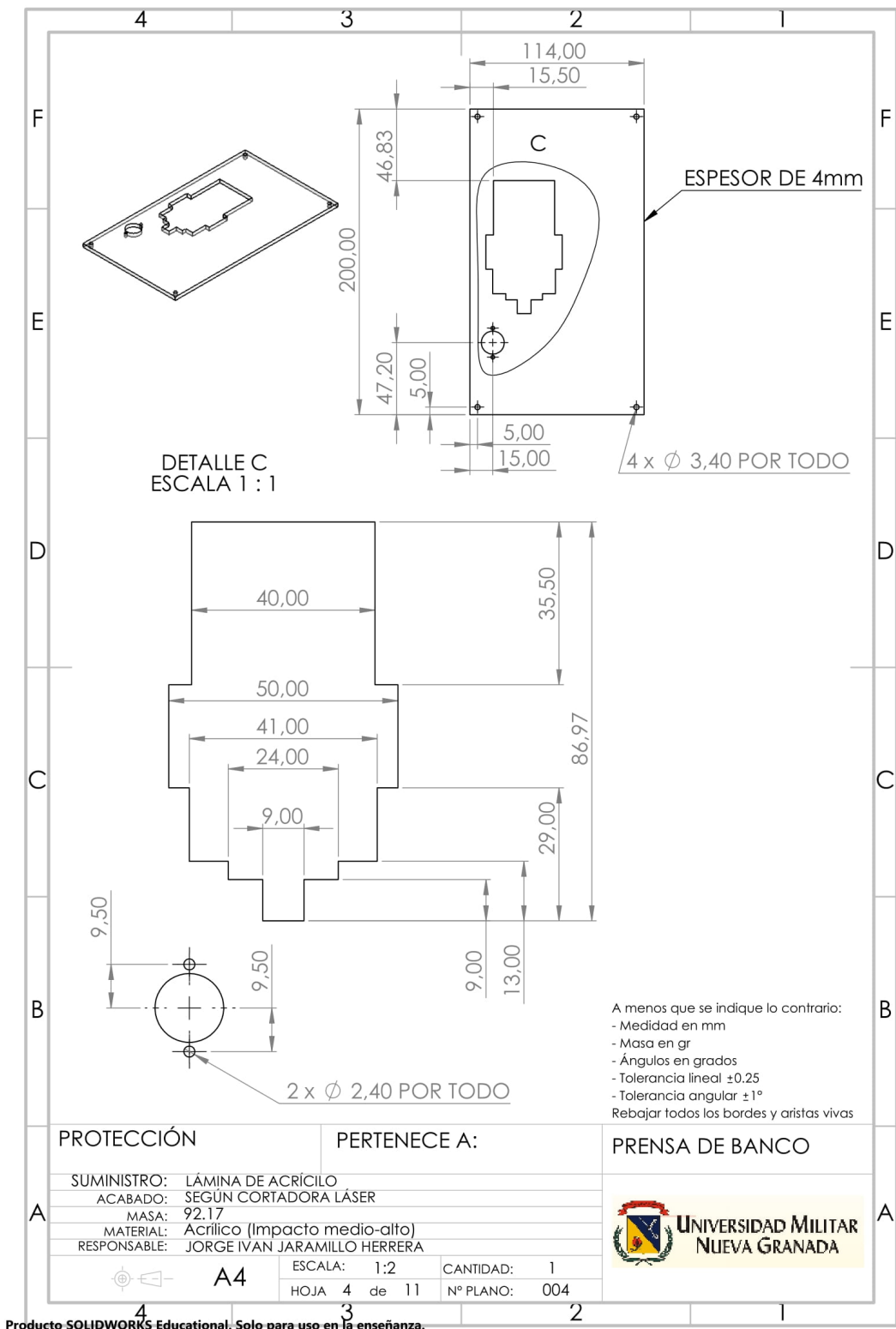


Figura B-4.: Plano 004, de la pieza "Protección". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

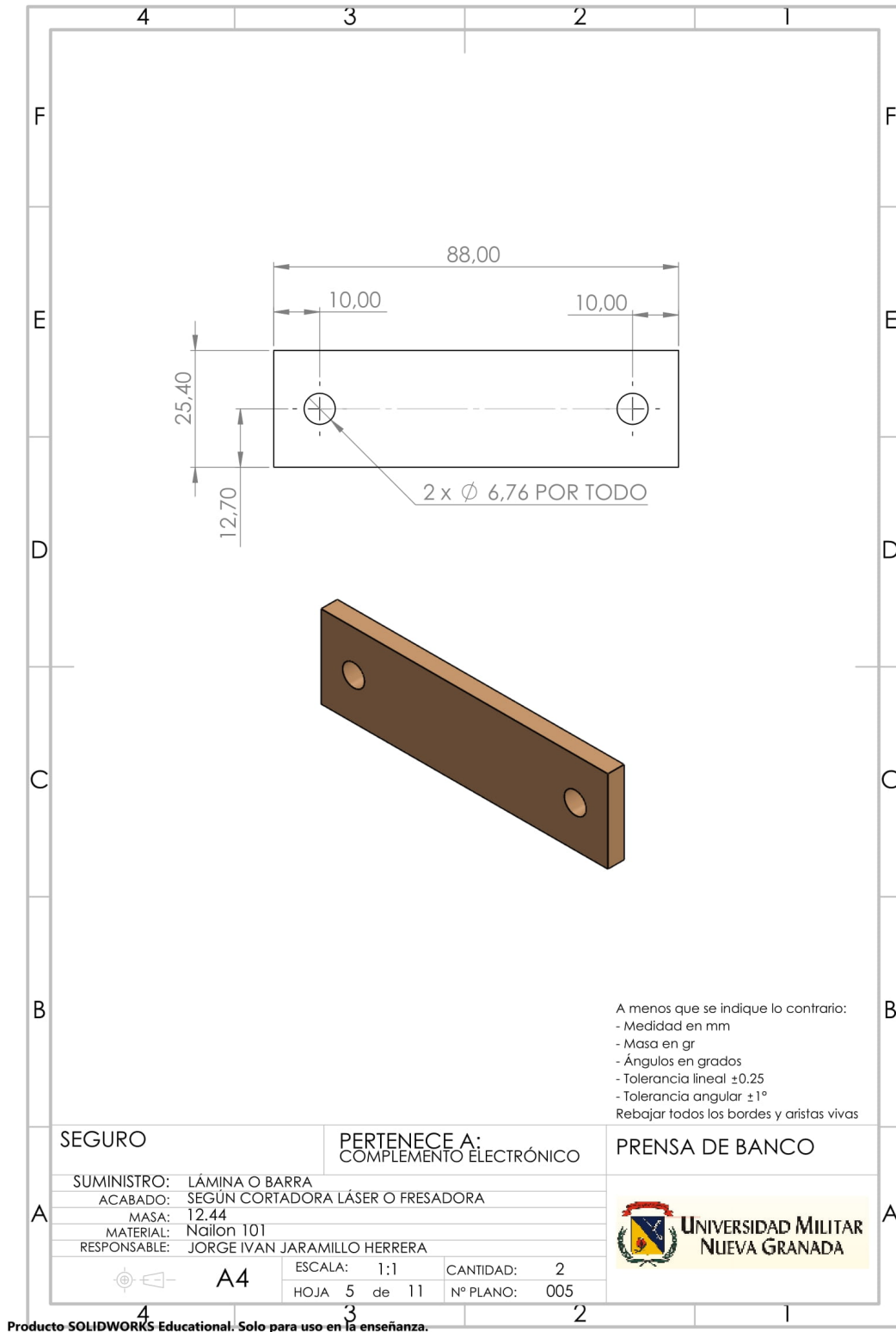


Figura B-5.: Plano 005, de la pieza "Seguro". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

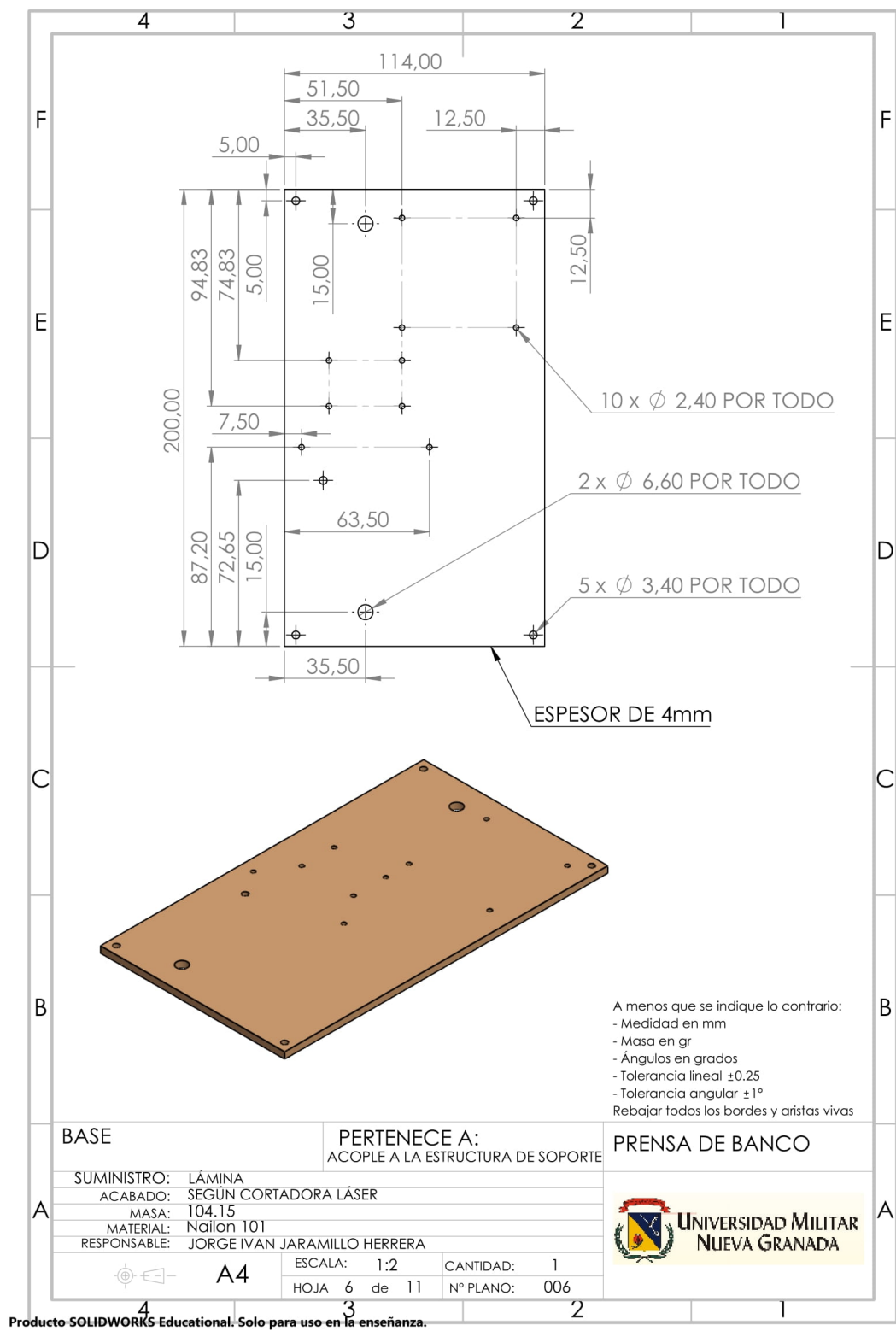


Figura B-6.: Plano 006, de la pieza "Base". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".



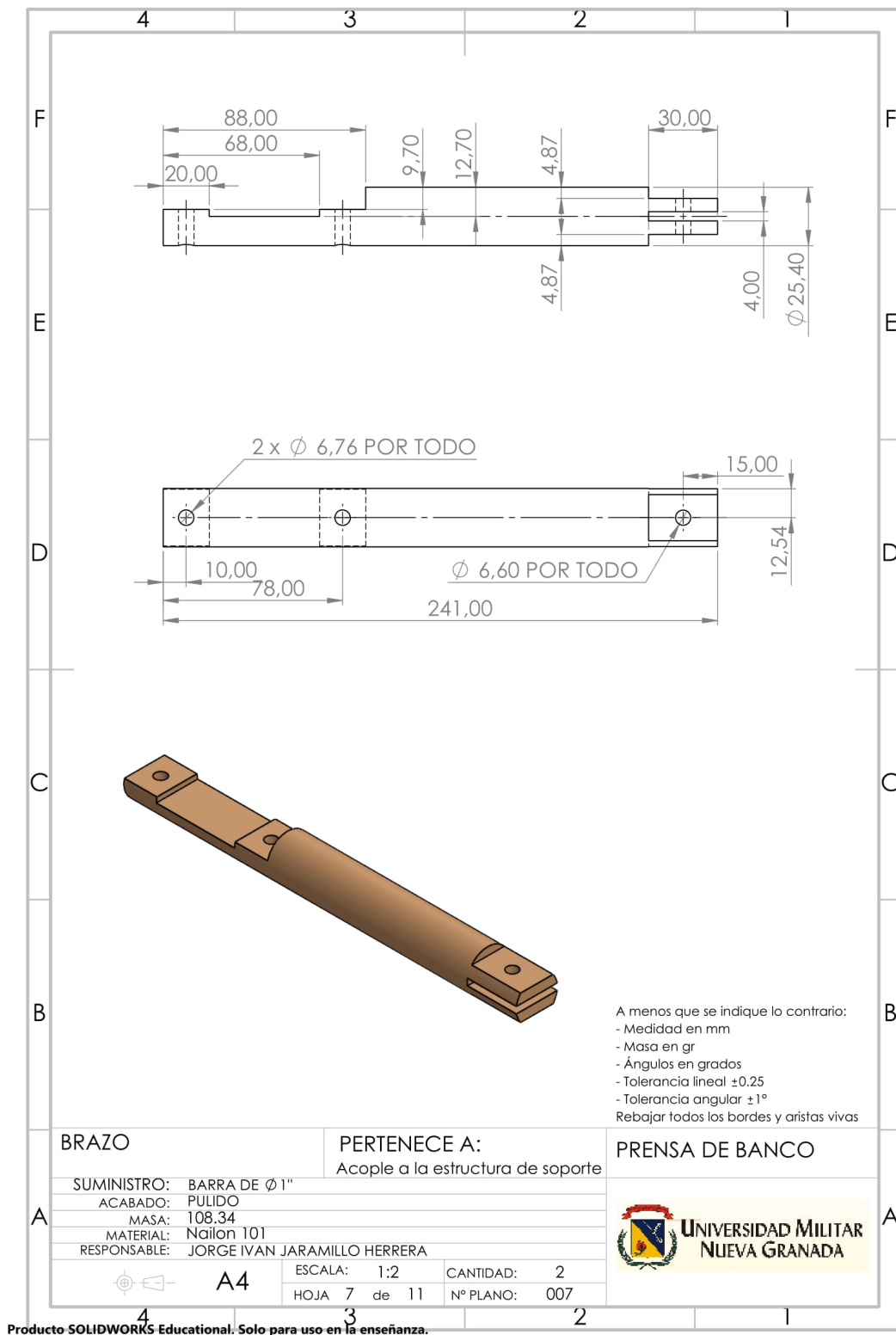


Figura B-7.: Plano 007, de la pieza "Brazo". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

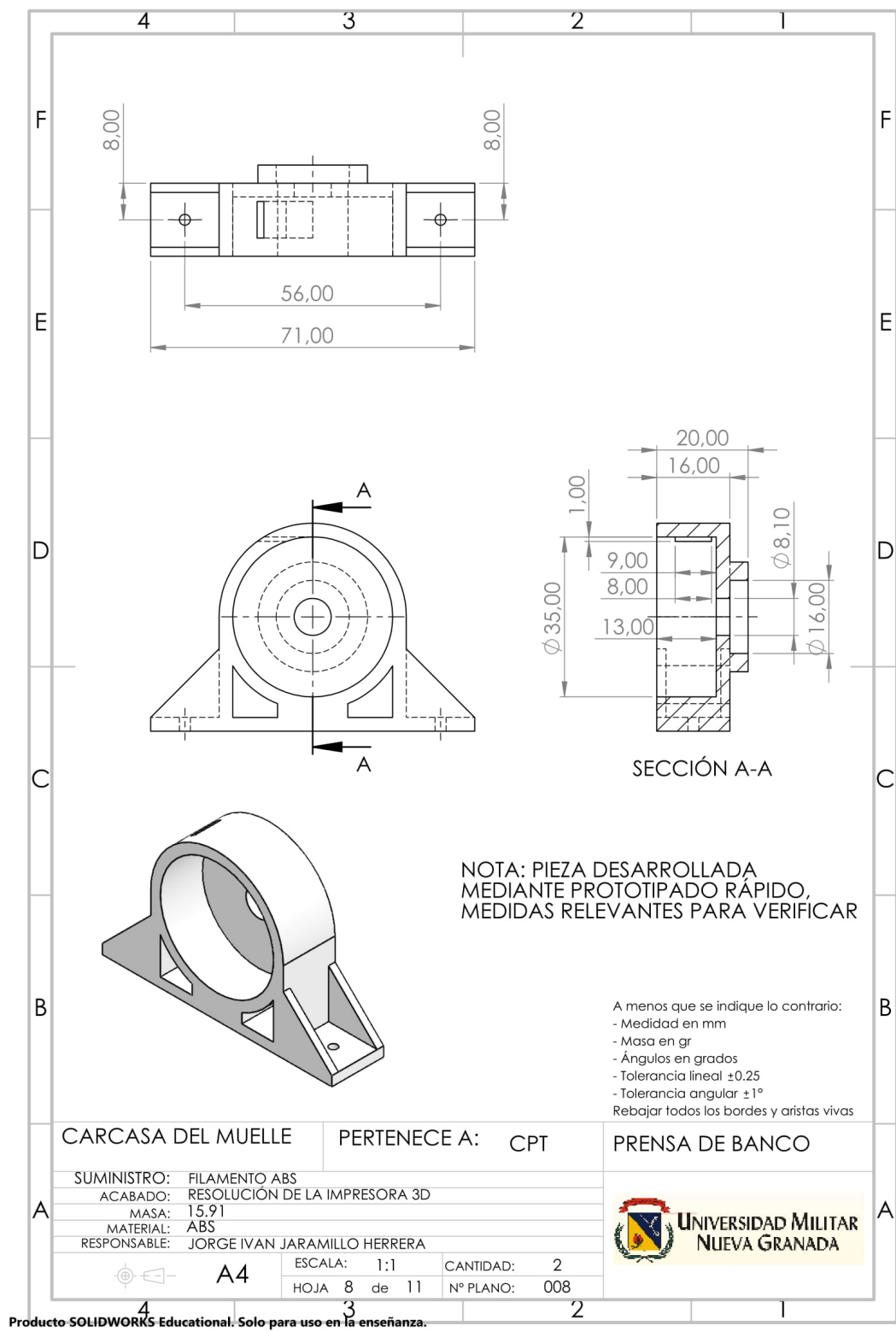


Figura B-8.: Plano 008, de la pieza "Carcasa del Muelle". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

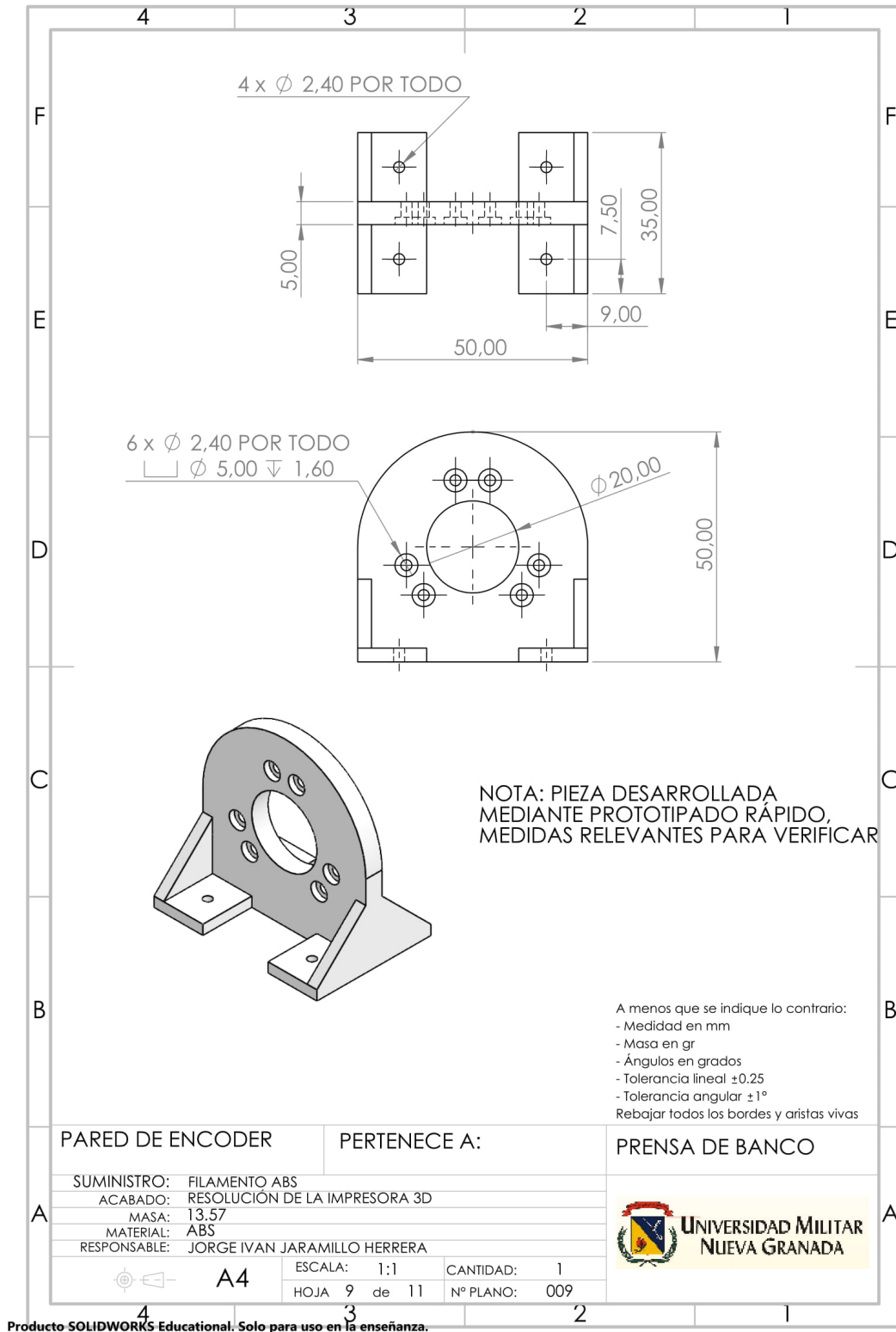


Figura B-9.: Plano 009, de la pieza "Pared de Encoder". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

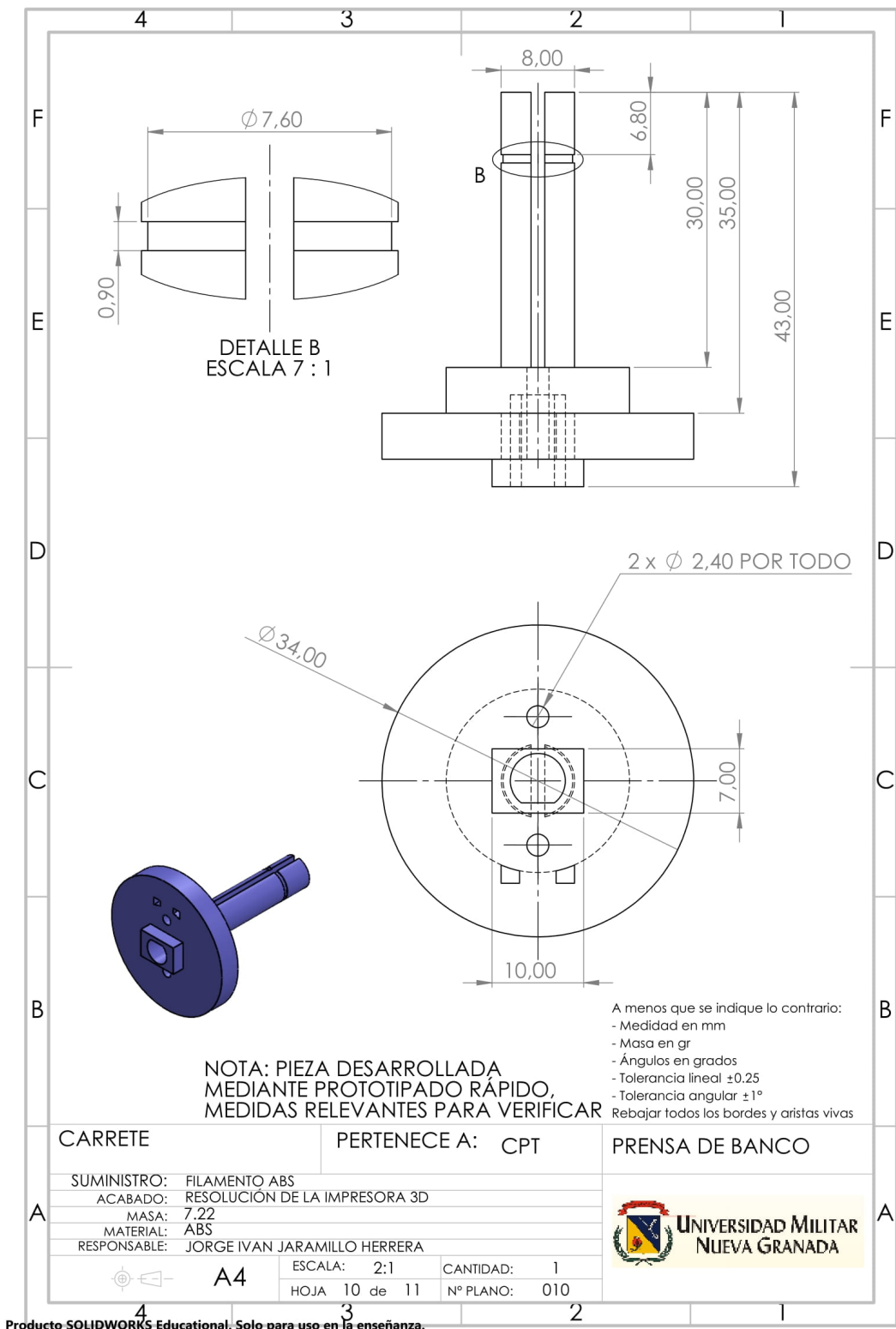


Figura B-10.: Plano 010, de la pieza "Carrete". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

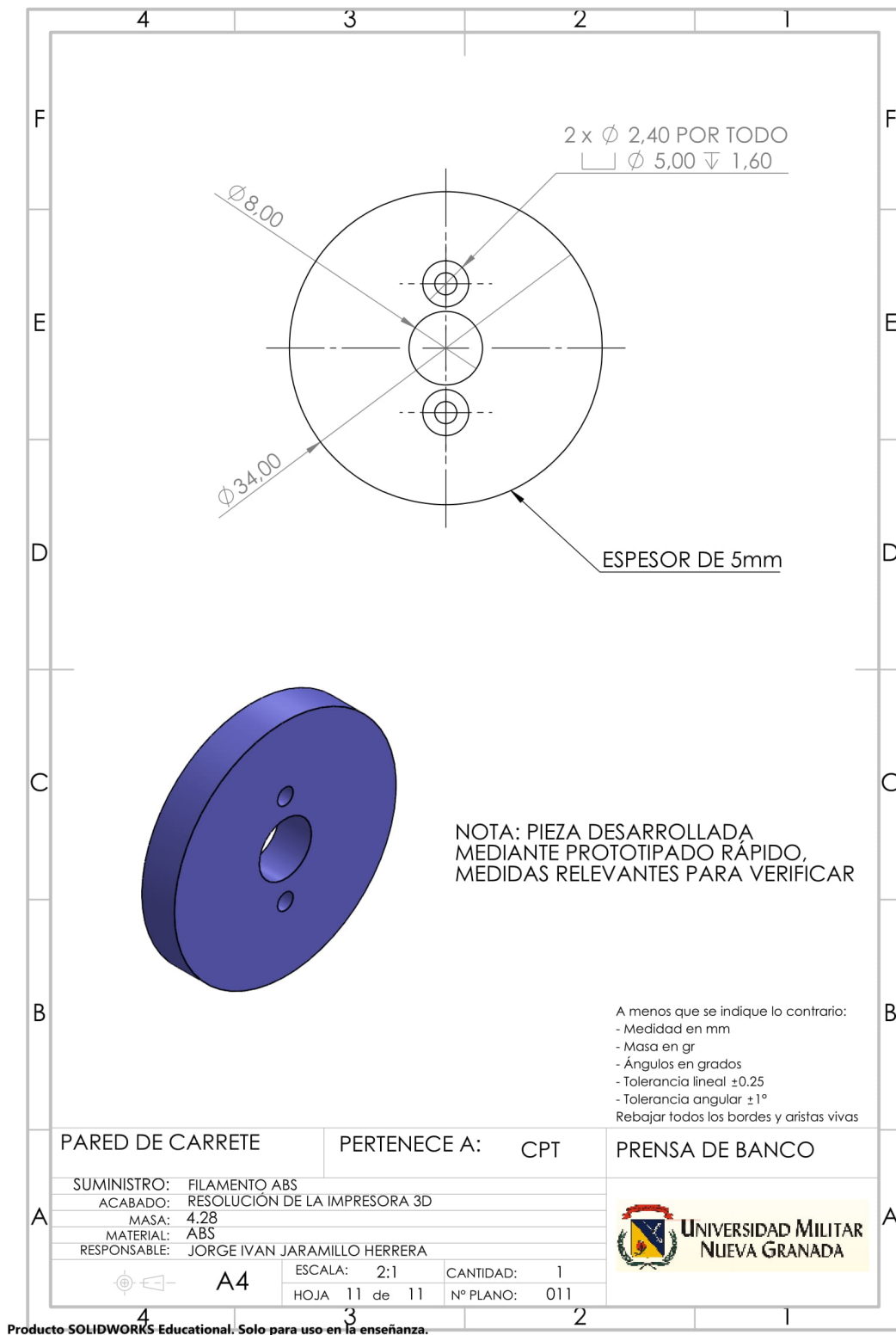


Figura B-11.: Plano 011, de la pieza "Pared de Carrete". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

## C. Anexo: Planos del complemento electrónico (acelerómetro)

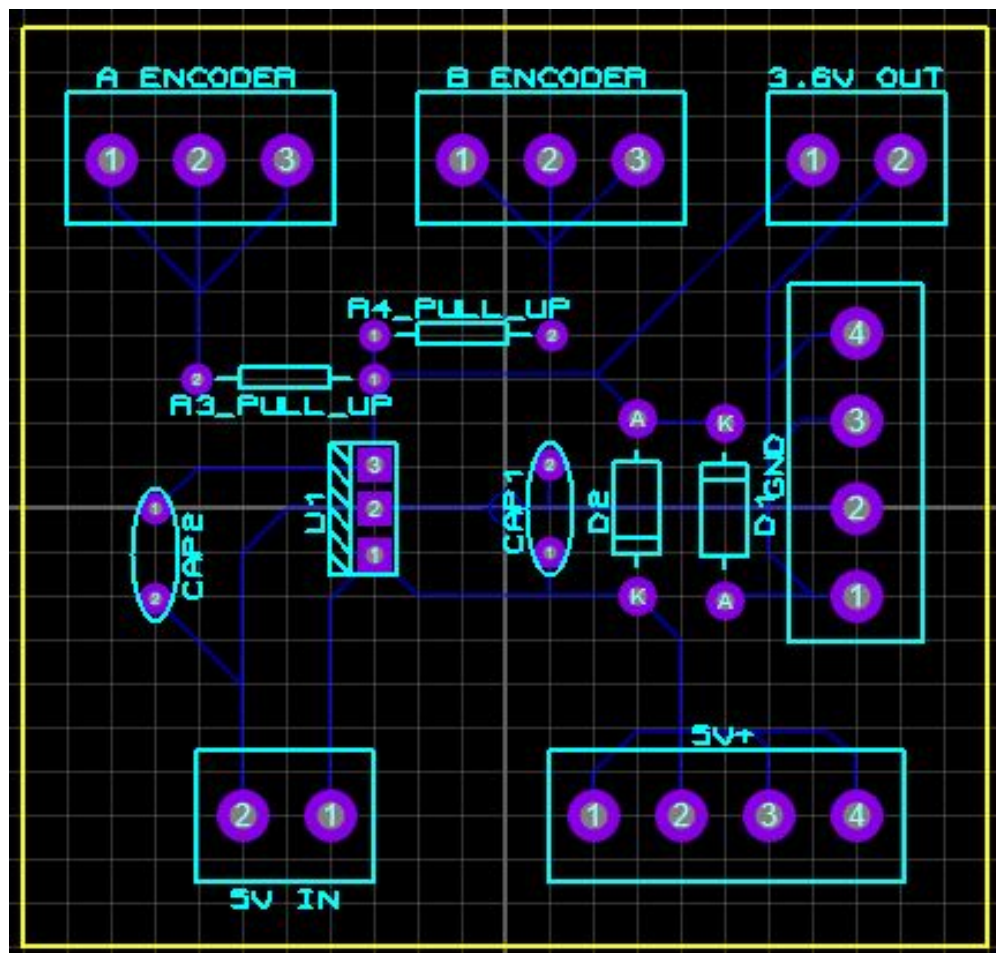
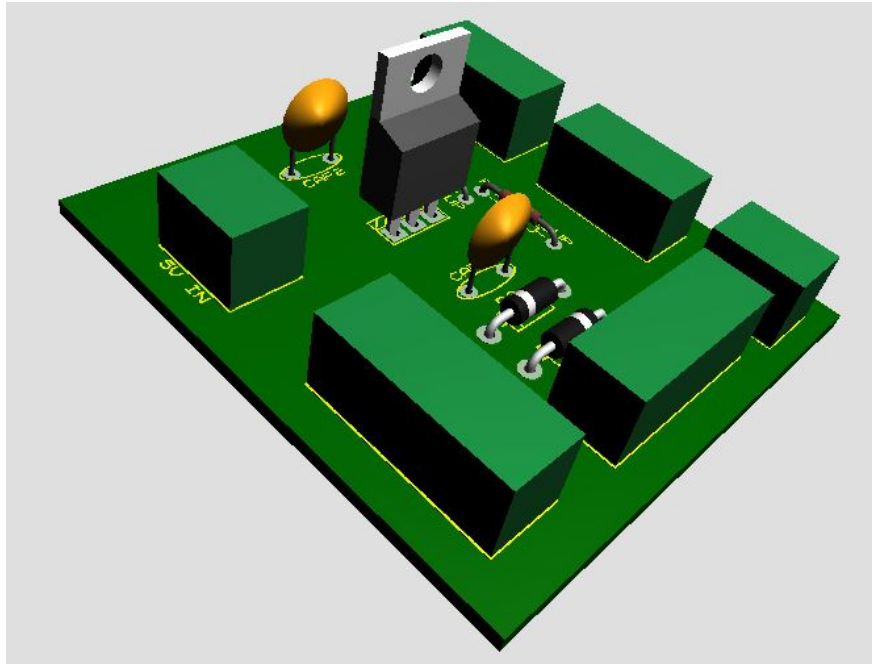


Figura C-1.: Esquema PCB del circuito impreso diseñado. Esquema elaborado por el autor.



**Figura C-2.:** Modelo3D del circuito impreso diseñado. Esquema elaborado por el autor.

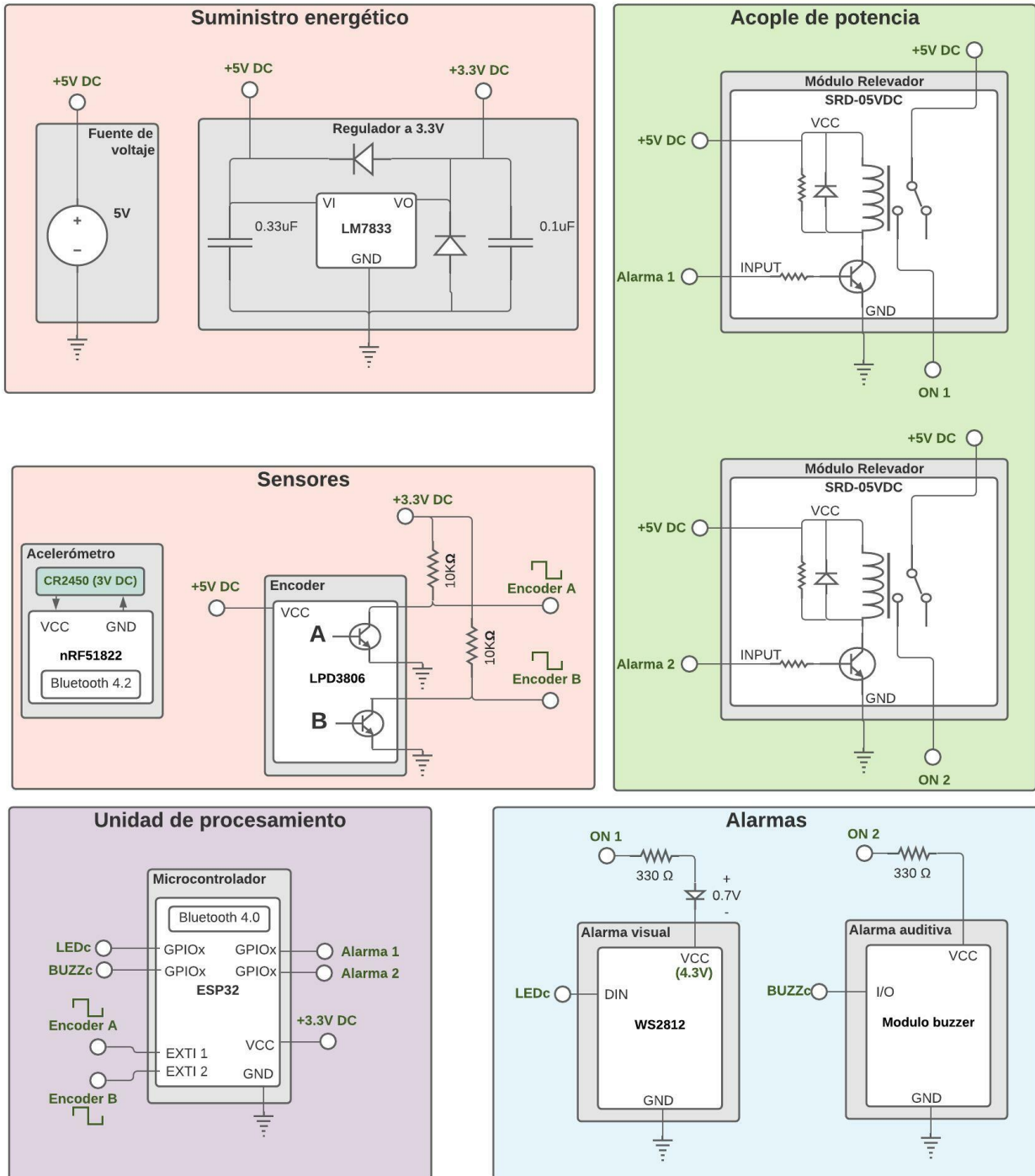


Figura C-3.: Diagrama electrónico del complemento electrónico. Esquema elaborado por el autor.



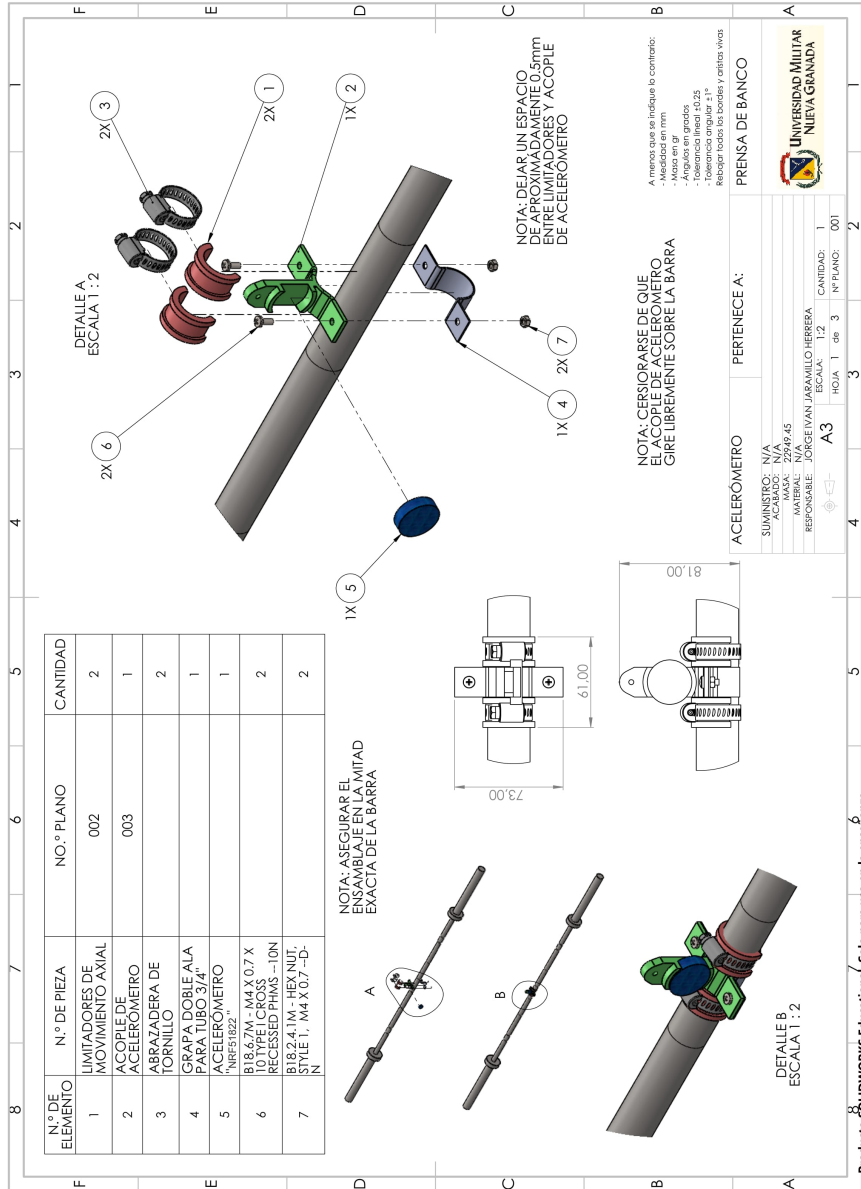


Figura C-4.: Plano 001, del conjunto "Pared de Carrete". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de ensamble y dibujo de "Solidworks".



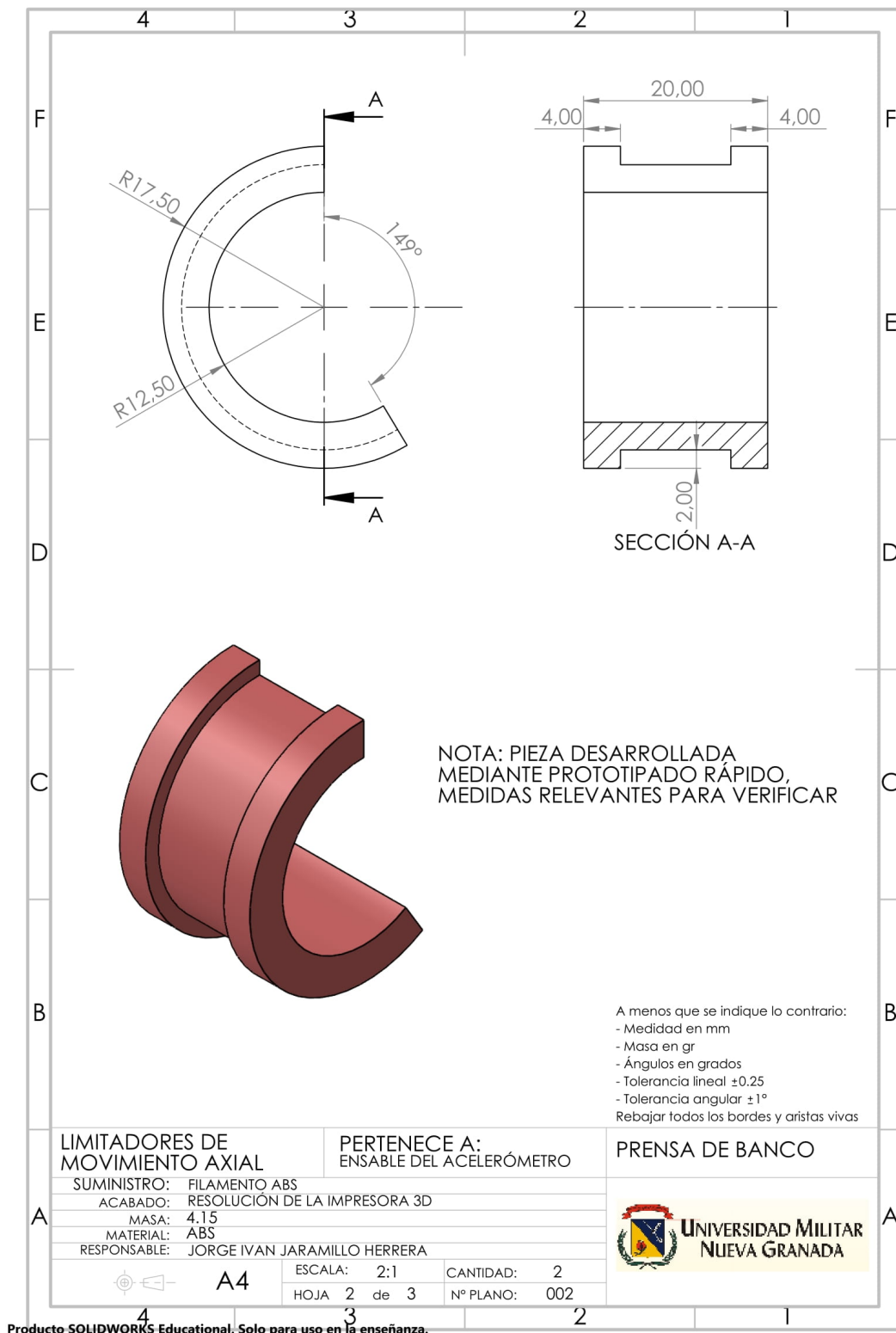


Figura C-5.: Plano 002, de la pieza "Limitadores de movimiento axial". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

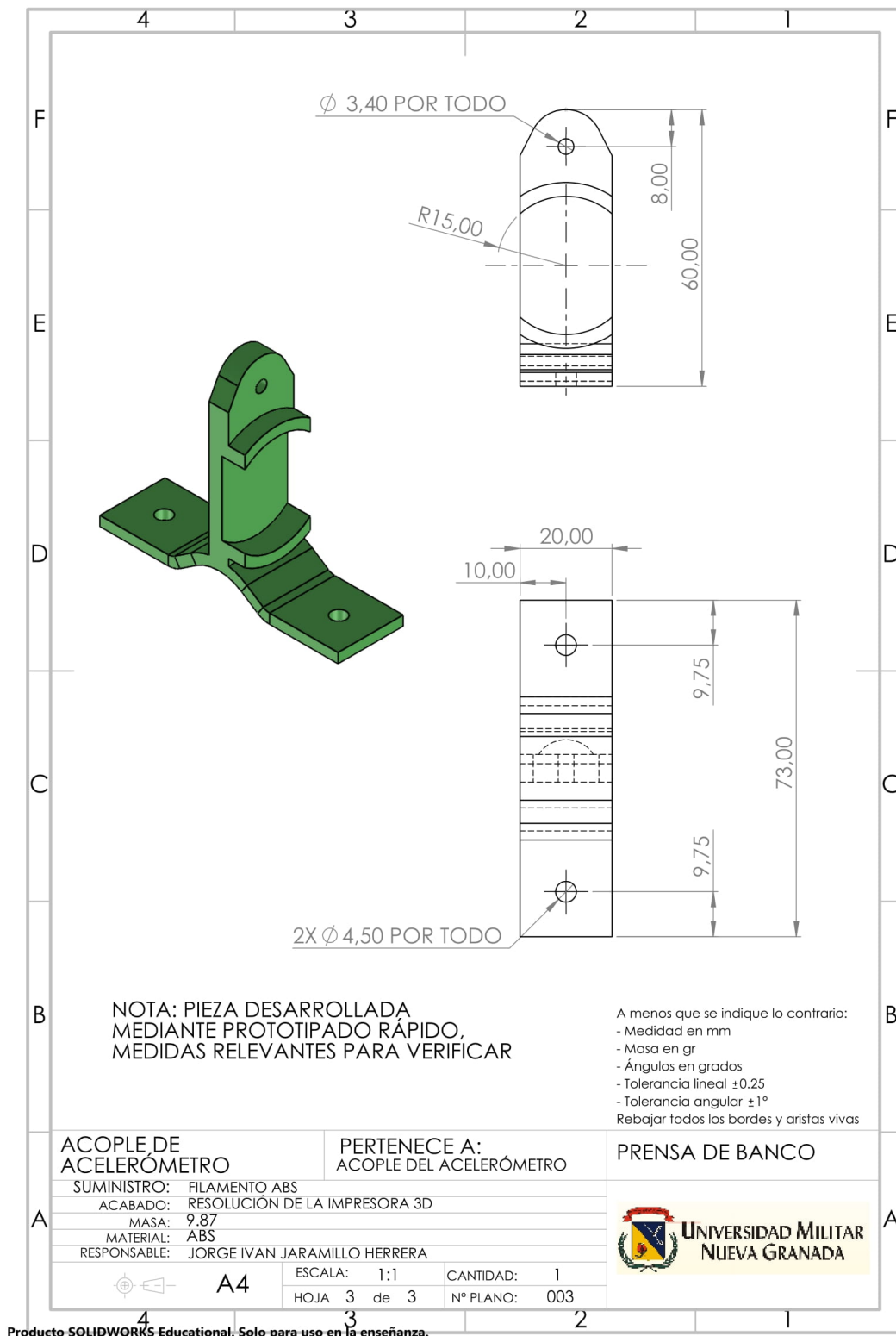


Figura C-6.: Plano 003, de la pieza "Acople de Accelerómetro". Modelo CAD y plano elaborado por el autor mediante la herramienta de pieza y dibujo de "Solidworks".

# Bibliografía

- [1] ARANDJELOVIĆ, Ognjen: A mathematical model of neuromuscular adaptation to resistance training and its application in a computer simulation of accommodating loads. En: *European Journal of Applied Physiology* 110 (2010), Nr. 3, p. 523–538. – ISSN 14396319
- [2] ARCELORMITTAL: Productos para la industria. En: *Catalogo de productos* (2021)
- [3] ARUS, PH.D., Emeric ; ARUS, Emeric: *The Fundamentals of Biomechanics*. 2018. – 109–177 p.. – ISBN 9780387493114
- [4] AVILA CHAURAND, Rosalio ; PRADO LEON, Lilia R. ; GONZALEZ MUNOZ, Elvia L.: Dimensiones antropométricas de población latinoamericana. (2015), Nr. May 2015, p. 283. ISBN 9789702711933
- [5] BARTLETT, Roger: *Introduction to Sports Biomechanics*. Vol. 50 Suppl 1. Routledge, 2007. – ISBN 0203462025
- [6] BEER, Ferdinand ; JOHNSTON, Russell ; MAZUREK, David ; EISENBERG, Elliot: *Mecanica Vectorial para Ingenieros Estatica - Beer 9th*. 9 (2010), p. 1–654. ISBN 13: 978-607-15-0277-3
- [7] BERNING, Joseph ; COKER, Cheryl ; BRIGGS, Dough: The biomechanical and perceptual influence of chain resistance on the performance of the Olympic clean. En: *The Journal of Strength and Conditioning Research* 22 (2008), Nr. 2, p. 390–395
- [8] BRAWNER, Matt. *Self Spotting Bench Press*. 2012
- [9] BRAWNER, William M. *Self spotting safety bench press*. 2004
- [10] CHAPMAN, A ; CALDWELL, G: The use of muscle strength in inertial loading. En: *Biomechanics IX-A. Champaign, Ill: Human Kinetics Publ. pp* (1985), p. 44–49
- [11] COLMENA. *Perfil Estructural Tubular*. 2021
- [12] COLOSKY, Paul E. ; RUTTLEY, Tara. *Gravity-independent constant force resistive exercise unit*. 2004
- [13] COREMARKMETALS. *Galvanized steel round bar*. 2021

- [14] CORPACERO. *Catálogo de Aceros Corpacero*. 2020
- [15] CORTES, Valeria: La ola del sector “fitness” sigue creciendo en el país. (2018)
- [16] COTTERMAN, Michael ; DARBY, Lynn ; SKELLY, William: Comparison of muscle force production using the smith machine and free weights for bench press and squat exercises. En: *Journal of Strength and Conditioning Research* 19 (2005), feb, Nr. 1, p. 169–176. ISBN 1064-8011
- [17] CRESSWELL, T R. ; SMITH, R B. *Bilateral anterior shoulder dislocations in bench pressing: an unusual cause*. 1998
- [18] CUBILLOS, Natalia. *La impresionante cifra que mueven los gimnasios en Colombia*. 2018
- [19] DESCONOCIDO: Concepto con neumática. 2020. – Informe de Investigación
- [20] DIETER, George E. ; SCHMIDT, Linda C.: *Engineering Design*. 5. NewYork : McGrawHill, 2013. – 191–244 p.. – ISBN 9780073398143
- [21] DUCASSE: SISTEMAS CORREDIZOS Y ACCESORIOS. (2020)
- [22] DUFFEY, Michael ; CHALLIS, John: Fatigue effects on bar kinematics during the bench press. En: *Journal of Strength and Conditioning Research* 21 (2007), Nr. 2, p. 556–560
- [23] ELLIOTT, B C. ; WILSON, G J. ; KERR, G K. *A biomechanical analysis of the sticking region in the bench press*. 1989
- [24] ENGINEERING<sub>ToolBox</sub>. *Factors of Safety*. 2010
- [25] FERRIS, John ; DONOVAN, John. *Safety Apparatus for bench press*. 1994
- [26] GARCÍA-LÓPEZ, David ; HERRERO, J. A. ; ABADÍA, O. ; GARCÍA-ISLA, F. J. ; UALÍ, I. ; IZQUIERDO, M.: The role of resting duration in the kinematic pattern of two consecutive bench press sets to failure in elite sprint kayakers. En: *International Journal of Sports Medicine* 29 (2008), Nr. 9, p. 764–769. – ISSN 01724622
- [27] GRAVES, James ; POLLOCK, Michael ; JONES, Arthur ; COLVIN, Andrea ; LEGGETT, Scott: Specificity of limited range of motion variable resistance training. En: *Medicine and science in sports and exercise* 21 (1989), Nr. 1, p. 84–89
- [28] GREEN, Carly M. ; COMFORT, Paul: The effect of grip width on bench press performance and risk of injury. En: *Strength and Conditioning Journal* 29 (2007), Nr. 5, p. 10–14. – ISSN 15241602

- [29] HACKENSCHMIDT, G: *The way to live*. Strength and Health Publishing Co., 1908. – 64 p.
- [30] HAMILL, B P. *Relative Safety of Weightlifting and Weight Training*. 1994
- [31] HOECHT, Dietrich ; ROSS, Michael ; BOHM, Fred. *Constant resistance exercising apparatus and system*. 2005
- [32] HORSWILL, Ian. *A young man dies after a 143kg barbell slips and crushes him in a gymnasium*. 2016
- [33] IZQUIERDO, Mikel ; GONZÁLEZ-BADILLO, J. J. ; HÄKKINEN, K. ; IBÁÑEZ, J. ; KRAEMER, W. J. ; ALTADILL, A. ; ESLAVA, J. ; GOROSTIAGA, E. M.: Effect of loading on unintentional lifting velocity declines during single sets of repetitions to failure during upper and lower extremity muscle actions. En: *International Journal of Sports Medicine* 27 (2006), Nr. 9, p. 718–724. – ISSN 01724622
- [34] JACKSON, Allen ; JACKSON, Timothy ; HNATEK, Jan ; WEST, Jane: Strength development: Using functional isometrics in an isotonic strength training program. En: *Research Quarterly for Exercise and Sport* 56 (1985), Nr. 3, p. 234–237. – ISSN 21683824
- [35] JAMES, Slade. *BARBELL SUPPORT APPARATUS FOR WEIGHT LIFTING EXERCISING*. 1987
- [36] JAMES, Sutherland. *Barbell storage and exercise rack*. 1980
- [37] JONES, Chester S. ; CHRISTENSEN, Carin ; YOUNG, Michael: Weight Training Injury Trends A 20-Year Survey. En: *The Physician and Sportsmedicine* (2000), p. 61–72
- [38] DE JUÁREZ, Celeste R. *Joven muere aplastado por la barra de pesas que levantaba*. 2016
- [39] JUSTIN, Kompf ; OGNJEN, Arandjelovic: The Sticking Point in the Bench Press, the Squat, and the Deadlift: Similarities and Differences, and Their Significance for Research and Practice. En: *Sports Med* 47 (2017), p. 631–640
- [40] KARL, Zimmer. *Weight lifting machine for safe free-bar benchpress exercising*. 1988
- [41] KITAI, T. A. ; SALE, D. G.: Specificity of joint angle in isometric training. En: *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 58 (1989), Nr. 7, p. 744–748. – ISSN 03015548
- [42] KLOPPENBURG, Don: *OFF-SEASON FOOTBALL WEIGHT TRAINING PROGRAMS IN CALIFORNIA HIGH SCHOOLS*, Fresno State College, Tesis de Grado, 1962

- [43] KNAPIK, J. J. ; MAWDSLEY, R. H. ; RAMOS, M. U.: Angular specificity and test mode specificity of isometric and isokinetic strength training. En: *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 5 (1983), Nr. 2, p. 58–65. – ISSN 01906011
- [44] KOMI, P V.: Training of muscle strength and power interaction of neuromotoric, hypertrophic, and mechanical factors. En: *International journal of sports medicine* 7 (1986), Nr. S 1, p. S10—S15
- [45] KOMPFF, Justin ; ARANDJELOVIC, Ognjen: Understanding and Overcoming the Sticking Point in Resistance Exercise. En: *Sports Med* 46 (2016), p. 751–762
- [46] KRÓL, Henryk ; GOLAS, Artur ; SOBOTA, Grzegorz: Complex analysis of movement in evaluation of flat bench press performance. En: *Acta of Bioengineering and Biomechanics* 12 (2010), Nr. 2, p. 93–98. – ISSN 1509409X
- [47] KUMAR, Anup: Factor of Safety : Definition , Equation , Examples , Calculator ( With PDF ). En: *What is pipping* , p. 1–4
- [48] LANDER, J E. ; BATES, B T. ; SAWHILL, J A. ; HAMILL, J: A comparison between free-weight and isokinetic bench pressing. En: *Medicine and science in sports and exercise* 17 (1985), Nr. 3, p. 344–353. – ISSN 0195–9131
- [49] MADSEN, N ; MCCLAUGHLIN, T: Kinematic factors influencing performance and injury risk in the bench press exercise. En: *Med. Sci. Sports Exerc* (1984), p. 376–381
- [50] MASSEY, Dwayne ; VINCENT, John ; MANEVAL, Mark ; MOORE, Melissa ; JOHNSON, JT: An analysis of full range of motion vs. partial range of motion training in the development of strength in untrained men. En: *Journal of Strength and Conditioning Research* 18 (2004), Nr. 3, p. 518–521
- [51] MATRIX. *Magnum Breaker Olympic Flat Bench*
- [52] MAXXBENCH: SAFETY ASSEMBLY INSTRUCTIONS MAINTANENCE WARRANTY INSTRUCTIONS AND OWNER ' S MANUAL. , p. 1–26
- [53] MCCLAUGHLIN, Thomas M. ; DILLMAN, Charles J. ; LARDNER, Thomas J.: Biomechanical analysis with cubic spline functions. En: *Research Quarterly of the American Alliance for Health, Physical Education and Recreation* 48 (1977), Nr. 3, p. 569–582. – ISSN 10671315
- [54] MORITANI, T ; DEVRIES, H A.: Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. En: *American journal of physical medicine* 58 (1979), Nr. 3, p. 115–130. – ISSN 0002–9491



- [55] MSCURDY, Kevin ; LANGFORD, George ; ERNEST, James ; JENKERSON, David ; DOSCHER, Michael: Comparison of chain and plate-loaded bench press training on strength, joint pain, and muscle soreness in division II baseball players. En: *The Journal of Strength and Conditioning Research* 23 (2009), Nr. 1, p. 187–195
- [56] MUNDO, El. *La OMS alerta de que el sedentarismo pone en peligro a una cuarta parte de la población adulta a nivel mundial*. 2018
- [57] MYER, Gregory ; QUATMAN, Carmen ; KHOURY, Jane ; WALL, Eric ; HEWETT, Timothy: Youth Versus Adult “Weightlifting” Injuries Presenting to United States Emergency Rooms: Accidental Versus Nonaccidental Injury Mechanisms. En: *Journal of Strength and Conditioning Research* 23 (2009), oct, Nr. 7, p. 2054–2060. ISBN 1064–8011
- [58] NASH, Jesse. *self spotting bench press*. 2012
- [59] NEISS: NEISS Data Highlights - 2019. 2021. – Informe de Investigación. – 1 p.
- [60] NESS, R G. ; PATTON, Robert W.: The effect of beliefs on maximum weight-lifting performance. En: *Cognitive Therapy and Research* 3 (1979), p. 205–211
- [61] ORGANIZATION, World H. *Obesity and overweight*. 2018
- [62] PANELCO: Lámina Mecánica. En: *Catalogo de productos* (2015)
- [63] PEREZ-RIOS, Rafael ; BELTRAN, Yerson J. ; ESQUER, Javier ; ZEPEDA, David S. ; MUNGUÍA, Nora E. ; VELAZQUEZ, Luis E.: Masculinities of Gym Users in the Context of Sustainable Development. En: *Psychology* 9 (2018), Nr. 2, p. 310–321. ISBN 2152–7180
- [64] RATAMESS, Nicholas ; ALVAR, Brent ; EVETECH, Tammy: Progression models in resistance training for healthy adults. En: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 41 (2009), Nr. 3, p. 687–708. – ISSN 01959131
- [65] RHEA, Matthew R. ; ALVAR, Brent A. ; BURKETT, Lee N. ; BALL, Stephen D.: A meta-analysis to determine the dose response for strength development. En: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 35 (2003), Nr. 3, p. 456–464. – ISSN 01959131
- [66] RIDGELY, Charles T.: Creating a Repetition Maximums Calculator. En: *Cell* (2004), Nr. October
- [67] ROLANDO, Lozano. *Colombia tiene cerca del 1 por ciento de gimnasios del mundo*. 2015
- [68] SÁNCHEZ-SALINAS, Silvia ; NÚÑEZ-TORRES, Celia ; LÓPEZ-MARTÍNEZ, Javier ; GARCÍA-VALLEJO, Daniel ; MUYOR, José M.: Design and analysis of a constant-force bench press. En: *Mechanism and Machine Theory* 142 (2019). – ISSN 0094114X

- [69] SANG, Bae. *Bench Press*. 2006
- [70] SCHWEEN. *Schween Machine*
- [71] SHAPIRO, Robert: Direct linear transformation method for three-dimensional cinematography. En: *Research Quarterly of the American Alliance for Health, Physical Education and Recreation* 49 (1978), Nr. 2, p. 197–205. – ISSN 10671315
- [72] SHERMWORKS. *Shermworks inc.* 2005
- [73] SLAWINSKI, Michael ; OLSSON, Mikael. *Barbell and dumbbell safety spotting apparatus*. 2003
- [74] STEWART, William. *Exercise device and method of use*. 2017
- [75] TERNIUM. *Catálogo TUBERÍA Y PERFILES Ternium Colombia*. 2019
- [76] THEPAUT-MATHIEU, C. ; VAN HOECKE, J. ; MATON, B.: Myoelectrical and mechanical changes linked to length specificity during isometric training. En: *Journal of Applied Physiology* 64 (1988), Nr. 4, p. 1500–1505. – ISSN 01617567
- [77] UNITT, Dennis. *International Powerlifting Federation History*. 2018
- [78] VAN DEN TILLAAR, Roland ; ETTEMA, Gertjan: A comparison of successful and unsuccessful attempts in maximal bench pressing. En: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 41 (2009), Nr. 11, p. 2056–2063. – ISSN 01959131
- [79] VAN DEN TILLAAR, Roland ; ETTEMA, Gertjan: A comparison of muscle activity in concentric and counter movement maximum bench press. En: *Journal of Human Kinetics* 38 (2013), Nr. 1, p. 63–71. – ISSN 18997562
- [80] WILDERFITNESS. *Self Spotting Bench FW-005*
- [81] WILLIAM, Barrett. *Powerlift competition safety device*. 1989
- [82] WILLIAM, Stevens. *Barbell assist device*. 1989
- [83] WILSON, Gregory J. ; ELLIOTT, Bruce C. ; KERR, Graham K.: Bar Path and Force Profile Characteristics for Maximal and Submaximal Loads in the Bench Press. En: *International Journal of Sport Biomechanics* 5 (1989), Nr. 4, p. 390–402. – ISSN 0740–2082
- [84] WOOD, Graeme A. ; MARSHALL, Robert N.: The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. En: *Journal of Biomechanics* 19 (1986), Nr. 9. – ISSN 00219290