

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ESTUDIO COMPARATIVO DE EXOESQUELETOS DE  
MIEMBROS SUPERIORES DE ACTUACIÓN PASIVA  
BASADOS EN TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN DE CARGA**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTOR:**

**JAVIER ANTONIO TANG JUY**

**ASESOR:**

**DANTE ÁNGEL ELÍAS GIORDANO**

**Lima, diciembre 2020**

## RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un estudio comparativo de los principales exoesqueletos industriales de miembros superiores con actuación pasiva desarrollados en la actualidad, los cuales tienen la finalidad de proveer una fuerza de asistencia para minimizar la fatiga del usuario al trabajar en posiciones poco ergonómicas por tiempos prolongados. Estos exoesqueletos se basan en principios o técnicas de compensación de carga, las cuales incorporan distintas configuraciones y mecanismos con actuadores pasivos, tales como resortes acoplados a sistemas de cables y poleas; resortes acoplados a mecanismos de levas con seguidor, entre otros; para finalmente generar una fuerza que equilibre la carga que se desea manipular.

En este sentido, primero se realizó una revisión bibliográfica de la tecnología en exoesqueletos, con énfasis en los principales exoesqueletos desarrollados actualmente para ser aplicados en el sector industrial. Se determinó que, para aplicaciones industriales, la alternativa más viable es optar por el desarrollo de exoesqueletos pasivos. Por consiguiente, una vez presentado el panorama actual de la tecnología en exoesqueletos industriales pasivos, se investigaron las principales técnicas de compensación de carga en las cuales se basan los mecanismos de actuación incorporados por estos dispositivos. Esto se realizó con la finalidad de analizar los principios físicos y/o mecánicos de funcionamiento de los mecanismos de actuación pasivos. Finalmente, se procedió a analizar 8 de los principales exoesqueletos industriales de miembros superiores de actuación pasiva, para luego compararlos y determinar las ventajas de las distintas técnicas de compensación de carga aplicadas en el desarrollo de sus mecanismos de actuación.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen.....	i
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1: EXOESQUELETOS .....	4
1.1. Definición de exoesqueleto .....	4
1.2. Clasificación de exoesqueletos .....	4
1.3. Principales exoesqueletos industriales y principios de funcionamiento .....	6
1.3.1. Exoesqueletos industriales activos.....	9
1.3.2. Exoesqueletos industriales pasivos .....	10
CAPÍTULO 2: TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN DE CARGA .....	12
2.1 Técnicas de compensación de carga basadas en resortes.....	13
2.1.1 Compensación basada en la conexión directa de resortes.....	13
2.1.2 Compensación basada en la conexión de resortes por medio de cables y poleas .....	16
2.1.3 Compensación basada en la conexión de resortes por sistemas mecánicos auxiliares .	20
2.2 Técnicas de compensación de carga basadas en contrapesos .....	31
2.3 Técnicas de compensación de carga basada en actuadores auxiliares .....	35
CAPÍTULO 3: COMPARACIÓN DE EXOESQUELETOS INDUSTRIALES CON ACTUACIÓN PASIVA DE MIEMBROS SUPERIORES.....	38
3.1 ShoulderX .....	39
3.2 Skelex 360-XFR.....	48
3.3 Airframe.....	51
3.4 Mate .....	54
3.5 Paexo.....	56
3.6 Hyundai H-VEX .....	59
3.7 Ekso-Vest.....	65
3.8 Robo-Mate Passive Arms.....	67
3.9 Tablas resumen .....	69
Conclusiones .....	72
Bibliografía .....	73

## INTRODUCCIÓN

En el año 2013, según estadísticas publicadas por el anuario del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE), se reportaron alrededor de 18 956 notificaciones de accidentes por trabajo, de los cuales cerca del 49,43% fueron catalogados como accidentes incapacitantes. Luego, en el anuario del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo del año 2018, la cifra aumentó a 20 282 reportes de accidentes laborales, siendo el 55,90% de tipo incapacitante. Es decir, pese al desarrollo económico y tecnológico en los últimos años, cada vez existen más problemas en relación a la salud ocupacional de los trabajadores y los accidentes de trabajo en el Perú. Del total de accidentes del año 2018, cerca de 1709 reportes se debieron a esfuerzos físicos. Si no se consideran los reportes que no especificaron la razón del accidente (9694 reportes), los accidentes por esfuerzo físico serían la tercera razón más común de accidentes laborales en el 2018, después de accidentes por caída de personas a nivel y accidentes por golpes por objetos. Es necesario señalar, que todos los reportes registrados por el MTPE corresponden al sector laboral formal en el Perú, el cual, según cifras del INEI<sup>1</sup>, solo alcanzó el 34,3% en el 2018. En otras palabras, las estadísticas antes mencionadas no representan ni la mitad de la población laboral en el Perú, por lo que es probable que las cifras sean aún más altas.

Además, las actividades económicas que más reportaron notificaciones de accidentes laborales fueron la industria manufacturera; actividades de transporte, almacenamiento y comunicaciones; y la industria de la construcción. Todas las actividades económicas mencionadas anteriormente implican labores demandantes de esfuerzo físico ya sea para los obreros, operarios o colaboradores en general. Una de las labores más comunes es la manipulación de cargas de manera manual y constante, como por ejemplo cargar ladrillos; levantar y transportar cajas con objetos pesados; entre otros. Hacer esto de manera habitual y en intervalos de trabajo muy seguidos, podría conllevar a lesiones en los hombros, brazos, manos y la región lumbar.

En la actualidad se han desarrollado diversas técnicas de compensación de carga con el fin de reducir el esfuerzo requerido para generar movimiento. De manera particular,

---

<sup>1</sup> INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática

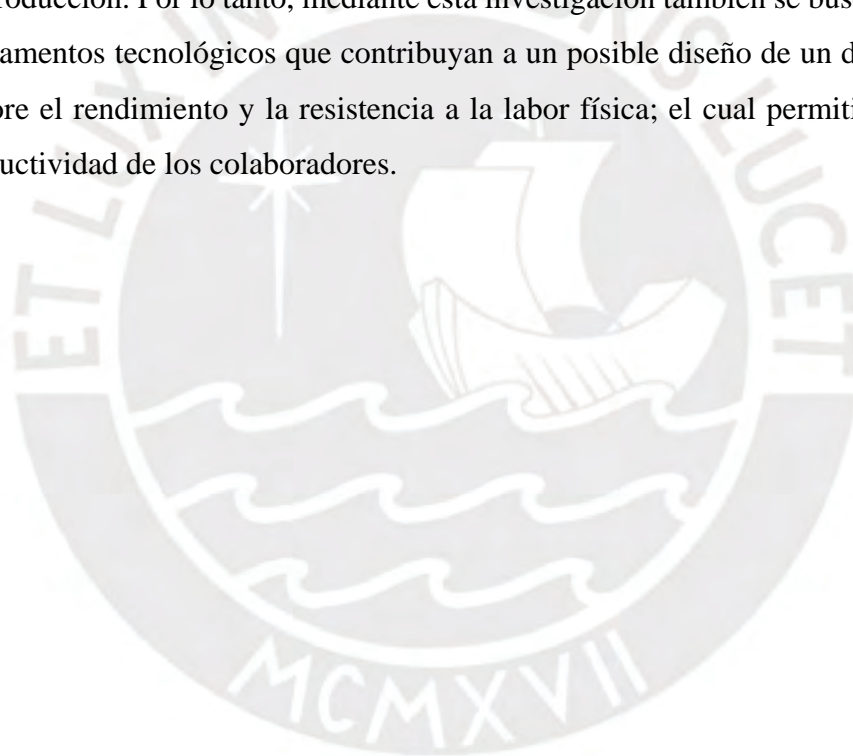
estas técnicas se centran en compensar la fuerza generada por la acción de la gravedad: el peso. Esto se conoce como compensación de la fuerza de gravedad o “*Gravity compensation*”; la cual se basa en distintas técnicas de asistencia pasiva por medio de mecanismos para lograr balancear las fuerzas generadas por el peso de los elementos de un conjunto motriz a lo largo de todo su rango de movimiento. De esta manera, se logra minimizar la energía requerida para generar movimiento o manipular una carga en específico. En ese sentido, estas técnicas de compensación se han venido desarrollando principalmente para ser aplicadas en el ámbito de la robótica, con el fin de reducir la carga en los actuadores de los sistemas mecatrónicos, consiguiéndose diseños con actuadores que generen menos torque, pero que sean más pequeños y livianos. Sin embargo, este mismo concepto, que busca minimizar el esfuerzo en los actuadores de un sistema mecatrónico (por ejemplo, en un brazo robótico), también se ha utilizado para ayudar al ser humano por medio de exoesqueletos de asistencia pasiva, los cuales incorporan estos mismos mecanismos para reducir el esfuerzo requerido en los músculos de una persona al realizar una actividad en específico

En los últimos años, grandes empresas de manufactura han implementado este tipo de dispositivos de asistencia para minimizar el estrés físico de los operarios en sus líneas de producción. Una de ellas es Ford, la cual viene probando por cerca de 4 años la tecnología de exoesqueletos industriales pasivos de miembros superiores para actividades de ensamblaje y trabajo “sobre cabeza”. En Europa y Asia también se han desarrollado notables investigaciones sobre el uso de estos dispositivos para mejorar la calidad de trabajo del operario. No obstante, en Perú aún no se tiene mucho conocimiento de esa tecnología y sus posibilidades en el sector laboral pese a su relativa simplicidad mecánica y bajo costo, más si se han realizado investigaciones sobre exoesqueletos para métodos de rehabilitación y estudio del movimiento humano.

Tomando en consideración los crecientes porcentajes de accidentes laborales en el Perú, y dado que muchos de ellos se deben a un sobre esfuerzo físico en el desarrollo de la actividad laboral, el presente trabajo de investigación tiene como propuesta la elaboración de un estudio comparativo de los principales exoesqueletos industriales de miembros superiores de actuación pasiva, en base a las técnicas de compensación de carga utilizadas para su desarrollo, así como también, sus principales características técnicas, tecnológicas y constructivas. Para lograr este propósito se elaborará el estado

del arte con énfasis en la tecnología actual en exoesqueletos industriales. Luego se explicarán las principales técnicas de compensación de carga existentes y sus aplicaciones. Finalmente se procederá a realizar el estudio comparativo de los principales exoesqueletos industriales pasivos de miembros superiores; en base a los principios de funcionamiento de los mecanismos de compensación de carga y las características técnicas brindadas por los fabricantes.

Cabe resaltar que, en las estadísticas antes mencionadas, cerca de la mitad de los reportes fueron por accidentes de tipo incapacitantes. Esto también se traduce en una pérdida económica en las empresas ya que, en muchos casos, las lesiones pueden durar semanas o incluso meses de para, lo cual repercute negativamente en los volúmenes de producción. Por lo tanto, mediante esta investigación también se busca exponer los fundamentos tecnológicos que contribuyan a un posible diseño de un dispositivo que mejore el rendimiento y la resistencia a la labor física; el cual permitiría mejorar la productividad de los colaboradores.



## **CAPÍTULO 1**

### **EXOESQUELETOS**

En este capítulo se presenta el panorama general de los exoesqueletos que existen en la actualidad, orientado a la aplicación de estos dispositivos en labores industriales. Primero se desarrolla el concepto general del término exoesqueleto, así como también los distintos criterios bajo los cuales se pueden clasificar. Luego, en base al estudio propuesto por A. Voilqué [Voilqué,2019], se presenta un compendio de los principales exoesqueletos que han sido desarrollados para el ámbito industrial en los últimos años. Finalmente, se explican las principales diferencias entre los exoesqueletos industriales de tipo activo y pasivo.

#### **1.1. Definición de exoesqueleto**

Desde los años 1830, la idea de asistir al cuerpo humano con un dispositivo mecánico ha motivado al desarrollo del concepto de lo que hoy se conoce como exoesqueleto. Un exoesqueleto es un dispositivo que interactúa directamente con el ser humano; incrementando las capacidades físicas del operario que lo porta.

#### **1.2. Clasificación de exoesqueletos**

Los exoesqueletos se pueden clasificar bajo distintos criterios. En base al panorama actual [Gopura,2016], se tiene la siguiente clasificación para caracterizar un exoesqueleto:

- A. **En función a la parte del cuerpo al cual es aplicado.** Por ejemplo, para el caso de exoesqueletos de tren superior, se podrían especificar: exoesqueleto para la mano, exoesqueleto para el antebrazo, o un exoesqueleto que incluya a ambas partes.
- B. **En función a los grados de libertad del exoesqueleto.** (1 grado de libertad, 2 grados de libertad, 3 grados de libertad, etc.)
- C. **En función al tipo de actuadores utilizados.** Los tres más utilizados son eléctricos, neumáticos e hidráulicos. Cabe resaltar que hay exoesqueletos de soporte que no tienen actuadores; estos se conocen como exoesqueletos pasivos. Los exoesqueletos con actuadores son de carácter activo.
- D. **En función a la forma de transmisión de potencia.** Por ejemplo, si se utilizan transmisiones mecánicas por engranajes (reductores), transmisiones por cables, mecanismos de conexión, entre otros.
- E. **En función al campo de aplicación.** Los exoesqueletos pueden ser usados en el campo de la rehabilitación física, asistencia industrial (incrementar rendimiento físico y resistencia), robots de asistencia e interfaces hápticos.

Se pueden distinguir dos tipos de exoesqueletos, en función a su portabilidad: los que son fijos a tierra y los que son portables en el cuerpo. Esta distinción es clave para reconocer los actuadores que son factibles en el proceso de selección. Los actuadores en exoesqueletos portables tienen como requisito ser pequeños y livianos, caso contrario, sería inviable el dispositivo. Existen más consideraciones en la selección de actuadores para exoesqueletos como son la posición anatómica donde son colocados. Por ejemplo, poner los actuadores/motores en las articulaciones demandaría mayores torques, dando como resultado un aumento de tamaño y peso, con la posibilidad de que el operario no pueda manejar el dispositivo por estos factores. El problema clave en la selección de actuadores en el proceso de diseño radica en la relación torque/peso. Es por ello que se buscan reducciones más compactas como transmisiones armónicas para lograr un buen torque sin comprometer demasiado el peso del mecanismo [Manna,2018]. Por otro lado, la ventaja de los actuadores en exoesqueletos pasivos radica en que son elementos simples con un peso relativamente pequeño. En la Figura



1.1 se muestra la clasificación de los principales actuadores utilizados en exoesqueletos.

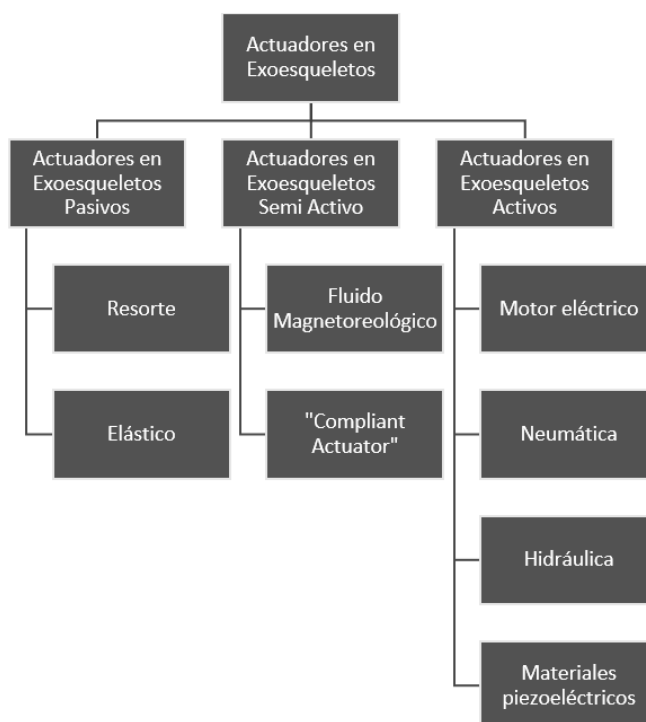


Fig. 1.1 Clasificación de actuadores para exoesqueletos

### 1.3. Principales exoesqueletos industriales y principios de funcionamiento

Actualmente, la tecnología de exoesqueletos industriales se desarrolla de manera equitativa entre Europa (37%), Asia (29%) y América (34%). En labores industriales, se busca orientar el exoesqueleto a una actividad específica, por ejemplo, dando soporte solo a una sección del cuerpo en una determinada dirección, según requiera la estación de trabajo donde está el operario. Las actividades industriales, en las cuales se podría requerir la asistencia de un exoesqueleto, pueden resumirse en tres categorías: trabajos en posiciones incómodas o forzadas; trabajos que requieran esfuerzo físico para manipular cargas; y trabajos que requieran esfuerzo físico para realizar ensamblajes [Voilqué,2019].

A continuación, se muestra una lista de los 62 principales exoesqueletos industriales desarrollados a la fecha (Tabla 1.1). Este estudio propuesto por A. Voilqué (2009)

refleja que, en la labor industrial, es necesario que el exoesqueleto pueda reproducir, de la manera más natural, la cinética del usuario, por tanto la mayoría de exoesqueletos activos desarrollados generan asistencia en una sola dirección debido a la complejidad del control y las limitaciones por peso. En ese sentido, para que los exoesqueletos no sean muy invasivos para el operario, la mayoría de los exoesqueletos industriales desarrollados comercialmente busca interactuar con el cuerpo del usuario en la menor cantidad de partes posibles.

Tabla 0.1. Exoesqueletos Industriales. S: Estatus (D: desarrollo, M: mercado), masa (kg) [Voilqué,2019]

Nº	Model name	Company	Source	S.	Mass	Hands	Arms	Shoul.	Trunk	Legs	Actuation	Energy
1	Active arms [27]	Robot-Mate	Europe	D	4.6		X	X			Active	Elec.
2	Active trunk [27]	Robot-Mate	Europe	D	11				X		Active	Elec.
3	Airframe [28] [29]	Levitare	America	M	2.7			X			Passive	Mecha.
4	Archeus [30]	Japan Polymer Tech	Asia	D	/					X	Passive	Mecha.
5	Armor-man 2 [30]	Tiltamax	America	M	8.5		X	X			Passive	Mecha.
6	Atlas [31] [32]	Jaquet	Europe	D	/				X		Active	Elec.
7	AWN-03 [33]	Panasonic	Asia	D	6				X		Active	Elec.
8	BackX AC [34] [35]	SuitX	America	M	4.5				X		Passive	Mecha.
9	BackX S [34] [35]	SuitX	America	M	3.3				X		Passive	Mecha.
10	Chairless Chair [36] [37]	Noonee	Europe	M	3.3					X	Passive	Mecha.
11	Cinemaker [38]	Exhaus	Europe	M	9.1		X	X			Passive	Mecha.
12	Corfor [39]	Corfor	Europe	M	0.2				X		Passive	Mecha.
13	CRAY X [40]	German Bionic	Europe	M	7.9				X		Active	Elec.
14	Ekso Vest [41] [42]	Ekso Bionic	America	M	4.3			X			Passive	Mecha.
15	Exo M [43]	SNCF, Ergosanté Tech	Europe	D	5		X	X			Passive	Mecha.
16	Exo-muscle [44] [45]	Innophys	Asia	M	/				X		Active	Pneum.
17	Exo-Push [46]	RB3D	Europe	D	8.4		X	X	X	X	Active	Elec.
18	Flex lift [47]	Kinetic Edge	America	M	/				X		Passive	Mecha.
19	FLx [48] [49]	StrongArm Tech	America	M	/				X		Passive	Mecha.
20	Fortis [50] [51]	Lockheed Martin	America	M	12		X	X	X	X	Passive	Mecha.
21	Guardian XO [52]	Sarcos	America	D	/		X	X	X	X	Active	Elec.
22	HAL Care Support [53]	Cyberdyne	Asia	M	3.1				X		Active	Elec.
23	HAL Labor Support [53]	Cyberdyne	Asia	M	3				X		Active	Elec.
24	Hanger [38]	Exhaus	Europe	M	5.7		X	X			Passive	Mecha.
25	Hercule V3 [46]	RB3D	Europe	M	/		X	X	X	X	Active	Elec.
26	EXO-Jacket 2.0 [54]	Fraunhofer-Institut	Europe	D	10		X	X			Active	Elec.
27	Hexar-CR50 [55]	Hexar systems	Asia	/	26				X	X	Active	Elec.
28	Hexar-CR10H [55]	Hexar systems	Asia	/	/					X	Active	Elec.
29	Hexar-HL35[55]	Hexar systems	Asia	/	26		X				Active	Elec.
30	Hexar-WA20[55]	Hexar systems	Asia	/	5.5					X	Active	Elec.
31	HULC [56]	Lockheed Martin	America	D	24		X	X	X	X	Active	Hydrau.
32	H-Wex [57]	Hyundai	Asia	D	/				X		Active	Elec.
33	Keeogo [58]	B-Temia	America	M	/					X	Active	Elec.
34	Laevo v2.5 [59] [60]	Laevo	Europe	M	2.2				X		Passive	Mecha.
35	LegX [34]	SuitX	America	M	6.2					X	Passive	Mecha.
36	Lowe [61]	Virginia Tech	America	D	/				X		Passive	Mecha.
37	Marine Mojo [62]	Mojo	America	M	1					X	Passive	Mecha.
38	Mate [63]	Comau	Europe	D	3		X	X			Passive	Mecha.
39	Model A [64]	ATOUN	Asia	D	6.7				X		Active	Elec.
40	Model AS [64]	ATOUN	Asia	D	/		X	X	X		Active	Elec.
41	Model Y [64]	ATOUN	Asia	D	4.4				X		Active	Elec.
42	ONIX [9]	Lockheed Martin	America	M	/					X	Active	Elec.
43	Paexo [65]	Ottobock Industrials	Europe	D	1.8			X			Passive	Mecha.
44	Passive Arms [27]	Robo-Mate	Europe	D	7.2		X	X			Passive	Mecha.
45	Picker [38]	EXHAUSS	Europe	M	4.6		X	X			Passive	Mecha.
46	PLN-01 [33]	Panasonic	Asia	D	/					X	Active	Elec.
47	Power Assist Glove [66]	Gloria Mundi Care	Europe	M	0.6	X					Active	Pneum.
48	Power Loader Light [33]	Panasonic	Asia	D	/		X	X	X	X	Active	Elec.
49	Roam [67]	Roam robotics	America	D	/		X				Active	Pneum.
50	IronHAND [68] [69]	Bioservo	Europe	D	2.9	X					Active	Elec.
51	ShoulderX [34] [70]	SuitX	America	M	5.3			X			Passive	Mecha.
52	Skel'Ex [71] [72]	Skel'Ex	Europe	M	3.4			X			Passive	Mecha.
53	Soft Exosuit [73]	WYSS Soft Exosuit	America	D	/					X	Active	Elec.
54	Spexor [74]	Spexor consortium	Europe	D	/				X		Passive	Mecha.
55	SuperFlex [75] [76]	SRI International	America	D	3.6					X	Active	Elec.
56	Transporter [38]	EXHAUSS	Europe	M	5.7		X	X			Passive	Mecha.
57	V22 [48] [77]	StrongArm Tech	America	M	0.9		X	X			Passive	Mecha.
58	Walking Assist [57] [78]	Honda	Asia	D	2.7					X	Active	Elec.
59	Wieldy [79] [80]	Beijing Wieldy CES	Asia	M	20		X	X			Passive	Mecha.
60	Worker [38]	EXHAUSS	Europe	M	8.9		X	X			Passive	Mecha.
61	XOS2 [81]	Raytheon	America	D	95		X	X	X	X	Active	Hydrau.
62	ZUT [64]	ATOUN	Asia	D	/			X			Passive	Mecha.

En la Tabla 1.1 se observa que los exoesqueletos pasivos son ampliamente usados en el sector industrial, siendo el 48% de la lista propuesta, debido a la simplicidad de su mecanismo de actuación, así como su confiabilidad y bajo costo de componentes. Así mismo, los exoesqueletos pasivos son los de menor peso. Estos factores hacen que se prefiera su uso frente a los exoesqueletos activos. El 52% de los exoesqueletos corresponde a los exoesqueletos activos, siendo la actuación por motores eléctricos la predominante frente a la actuación neumática e hidráulica. No obstante, del grupo de los exoesqueletos activos, 19 de ellos aún están en desarrollo. Esto representan un 60% de los exoesqueletos de actuación activa. Actualmente, se prefieren exoesqueletos pasivos en el sector industrial debido a que su actuación mecánica es confiable; fácil de mantener; son más ligeros; y son de fácil uso para el operario. En ese sentido, no incorporan actuadores o sensores costosos, de manera que representan una opción más atractiva para que las compañías realicen pruebas piloto en campo con sus operarios y de esta manera, puedan evaluar los beneficios en la productividad de sus colaboradores [Voilqué,2019].

Es importante transferir la fuerza de los miembros del operario que requieren asistencia hacia los grupos musculares más fuertes del operario. Por ejemplo, transferir la carga de los hombros y redistribuirla en los músculos de la espalda del operario. Lo ideal sería transmitir la fuerza hasta el suelo para no sobrecargar los músculos del operario. Sin embargo, implementar un exoesqueleto de cuerpo completo conlleva a incrementar significativamente la complejidad del exoesqueleto de asistencia, así como también su masa. Por lo tanto, es importante encontrar un punto de equilibrio para lograr una asistencia efectiva.

En el siguiente acápite, se propone analizar a los exoesqueletos industriales según su tipo de actuación (activa o pasiva), pues bajo este criterio de clasificación, se observan las mayores diferencias en cuanto a peso, prestaciones mecánicas o grado de asistencia del dispositivo. No obstante, los exoesqueletos industriales pueden ser clasificados mediante otros criterios, como la zona del cuerpo a la cual brindan asistencia; la aplicación industrial para la cual han sido diseñados; la naturaleza de la carga que se busca compensar (compensación del peso de las extremidades, compensación de las extremidades con una carga adicional); entre otros. Por ejemplo, el estudio propuesto

por A. Voilqué, hace énfasis en la clasificación según la necesidad o aplicación del exoesqueleto, y separa a los exoesqueletos industriales en 3 categorías: exoesqueletos para compensar el peso de las extremidades en actividades poco ergonómicas; exoesqueletos para la manipulación de cargas pesadas; y exoesqueletos para tareas de ensamblaje que requieren precisión, pero a la vez manipular cargas relativamente grandes.

### **1.3.1. Exoesqueletos industriales activos**

Los exoesqueletos activos proveen mayores torques a costa de ser más voluminosos y pesados. Dentro del grupo estudiado por A. Voilqué, el 84% de exoesqueletos activos tiene como sistema de actuación motores eléctricos. Sin embargo, debido al alto costo de los componentes (motores, transmisiones armónicas, controladores, encoders, etc.), muchos de ellos se utilizan en investigación ya que no sería una alternativa práctica para la industria. Asimismo, las mayores limitaciones de los exoesqueletos activos están relacionadas al control de estos dispositivos, ya que aún no alcanzan la fluidez requerida para acompañar los movimientos naturales de una persona, los cuales son totalmente aleatorios (pues presentan aceleraciones y desaceleraciones), comprenden un amplio rango de movimiento, y están asociados a complejos articulares del cuerpo humano con numerosos grados de libertad. Estos factores, sumados a micro y macro desalineamientos, entre el dispositivo y el cuerpo del operario, dificultan la labor de proveer una buena retroalimentación a la hora de controlar los dispositivos. No obstante, se han desarrollado exoesqueletos como el EXO-Jacket, el cual es una propuesta interesante de exoesqueleto de miembros superiores que podría aplicarse a nivel industrial. A continuación, se describirá su principio de funcionamiento a manera de ejemplo.

El exoesqueleto EXO-Jacket, desarrollado por el Instituto de Fraunhofer, provee asistencia activa en 3 de los 12 grados de libertad del brazo. En la Figura 1.2 se muestra el diagrama esquemático del exoesqueleto y los principales puntos articulación del mismo. Este exoesqueleto pesa alrededor de 10 kg. Los actuadores del hombro y el codo generan torques de 40 Nm y 25 Nm respectivamente. Sin embargo, pueden llegar a duplicar estos valores por tiempos limitados. Estos torques nominales se logran a

velocidades de  $107^\circ/\text{s}$  y  $155^\circ/\text{s}$  respectivamente. Por otro lado, en la Figura 1.3 se muestra a cada módulo de actuación el cual se compone de un motor DC de alta densidad de potencia, una transmisión armónica como reductor de velocidad y bridas de salida para la conexión al exoesqueleto [Ebrahimi,2017] .

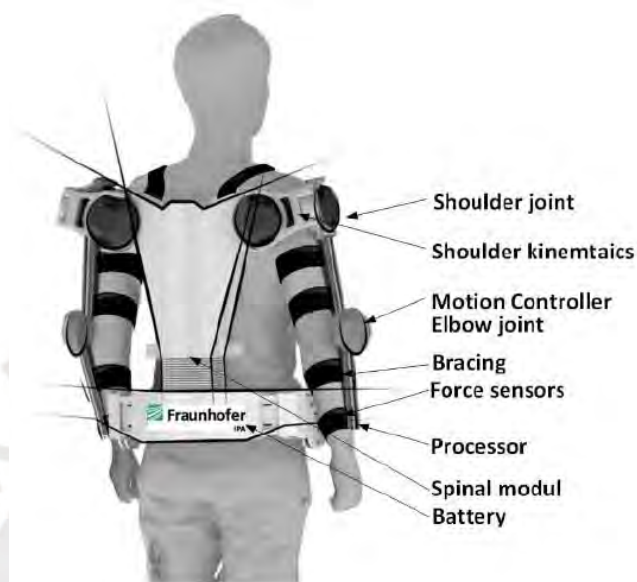


Fig. 1.2 Diagrama esquemático de EXO-Jacket [Ebrahimi,2017]



Fig. 1.3 Transmisión electromecánica de cada articulación [Ebrahimi,2017]

### 1.3.2. Exoesqueletos industriales pasivos

Los principales exoesqueletos pasivos utilizan mecanismos de compensación de carga basados en distintas configuraciones de sistemas de resortes, levas, poleas y cables. Estos mecanismos se diseñan con el fin de proveer fuerzas o torques de asistencia en

actividades de soporte, de manera que el operario pueda mantener una carga o posición forzada por un tiempo más prolongado. Por lo tanto, es necesario entender las principales técnicas de compensación de carga para luego estudiar su aplicación en los exoesqueletos industriales pasivos. En este sentido, en el Capítulo 2, se explicarán las principales técnicas de compensación de carga. Asimismo, en el Capítulo 3 del presente documento se desarrollará a mayor detalle los principios de funcionamiento de los exoesqueletos industriales pasivos y se realizará un estudio comparativo de los mismos.



## **CAPÍTULO 2**

### **TÉCNICAS PASIVAS DE COMPENSACIÓN DE CARGA**

Las técnicas de compensación de carga tienen la finalidad de reducir el esfuerzo requerido para generar movimiento. En un principio estas técnicas de compensación fueron desarrolladas principalmente para ser aplicadas en el ámbito de la robótica, con el fin de reducir la carga estática del peso en los actuadores de los sistemas mecatrónicos, consiguiéndose diseños con actuadores que generen menos torque, pero que sean más pequeños y livianos. Sin embargo, este mismo concepto, que busca minimizar el esfuerzo en los actuadores de un sistema mecatrónico (por ejemplo, en un brazo robótico), también se ha utilizado para ayudar al ser humano por medio de exoesqueletos de asistencia pasiva, los cuales incorporan estos mismos mecanismos para reducir el esfuerzo requerido en los músculos de una persona al realizar una actividad en específico compensando el peso de sus extremidades, de manera similar al caso de los robots.

Las fuerzas de compensación pueden provenir de distintas fuentes y bajo distintas configuraciones. En este sentido, basados en el enfoque de V. Arakelian (2016), en este capítulo se presentarán de manera sistemática las principales técnicas pasivas de compensación de carga [Arakelian,2016]. Primero se expondrán las técnicas de compensación de carga basadas en resortes, las cuales tienen mayor relevancia para el desarrollo de exoesqueletos pasivos. Luego se explicarán las técnicas de compensación basadas en contrapesos; y, finalmente, se hablará brevemente de las técnicas de compensación basadas en actuadores auxiliares.

## **2.1 Técnicas de compensación de carga basadas en resortes**

Gran parte de las técnicas de compensación de carga están basadas en mecanismos que utilizan resortes como elementos para generar la fuerza de compensación. Los resortes, debido a su capacidad de almacenar trabajo, se utilizan a manera de acumuladores de energía mecánica y, por medio de distintas configuraciones, es posible dosificar dicha energía acumulada de forma parcial según el requerimiento del sistema de compensación. En esta sección se muestran resortes clásicos a tracción o compresión, sin embargo, se entiende que se puede utilizar todo tipo de elemento elástico con un comportamiento análogo tal como elastómeros, resortes de gas, resortes de torsión, entre otros. A continuación, se explicarán las principales configuraciones de las técnicas de compensación basadas en resortes.

### **2.1.1 Compensación basada en la conexión directa de resortes**

Se define la compensación por medio de la conexión directa de resortes como aquella en la cual el resorte va conectado al elemento principal en el cual actúa la carga a compensar, es decir, aquel elemento del sistema mecánico que se requiere balancear. Esta es la configuración más sencilla de compensación de carga y es utilizada en diversos mecanismos. Sin embargo, presenta el inconveniente de que no logra una compensación completa de la carga (a lo largo de todo el rango de movimiento del mecanismo) si no se utiliza un resorte de longitud cero.

Por tanto, es necesario entender el concepto de un “resorte de longitud cero”. Según V. Arakelian (2016), un “resorte de longitud cero” es un término para definir a un resorte diseñado con la característica especial de que, si este tuviera una longitud igual a cero, la fuerza restitutiva ejercida por el resorte sería igual a cero. En ese sentido, en un gráfico de fuerza vs deformación (o longitud del resorte), la línea del gráfico pasaría por el origen, tal como se puede observar en la Figura 2.1. Naturalmente, no es posible reducir la longitud del resorte a cero debido a que, en la realidad, las espiras de un resorte llegan a un punto en el cual estas chocan y ya no se puede reducir más la longitud del resorte. De manera práctica, un resorte de longitud cero es un resorte manufacturado con una precarga o pretensión, de forma que si este se pudiese contraer



hasta una longitud teórica de cero, la fuerza ejercida por el mismo sería nula [Arakelian,2016].

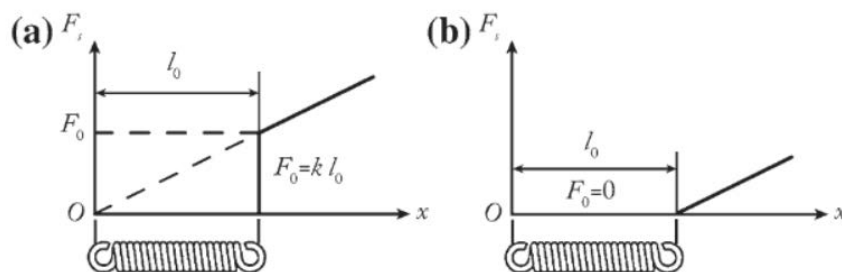


Fig. 2.1 Características de un resorte de longitud cero (a) vs un resorte convencional sin pre carga (b) [Arakelian,2016]

A continuación, en la Figura 2.2, se muestra la configuración básica de compensación por medio de la conexión directa de un resorte. A través de este ejemplo, es posible ilustrar que, para lograr una compensación completa por medio de esta técnica, es necesario utilizar un resorte con una precarga o resorte de longitud cero. Sea el elemento OAS un cuerpo rígido con centro de masa en el punto S (punto donde se concentra la fuerza del peso a compensar) pivotado en el punto O, se propone compensar el peso generado por la masa “m” del elemento OAS mediante la conexión directa de un resorte entre los puntos A y B.

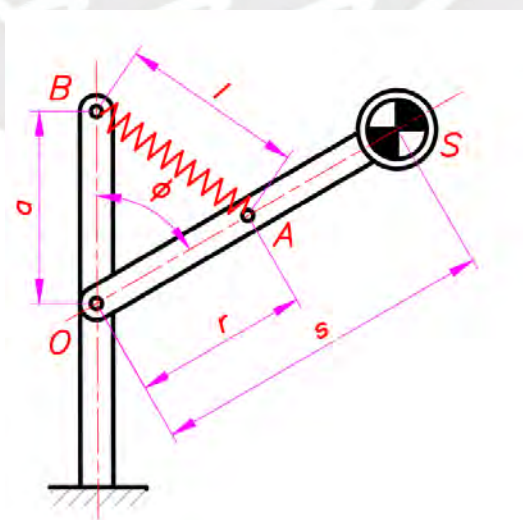


Fig. 2.2 Configuración básica de compensación de carga mediante la conexión directa de un resorte

Asimismo, según la ley de Hooke, podemos definir la fuerza del resorte  $F_s$  según la Ecuación 2.1, donde  $F_0$  es la fuerza de precarga del resorte ( fuerza inicial que mantiene juntas las espiras del resorte),  $k$  es la constante de rigidez del resorte,  $l$  es la longitud del resorte deformado y  $l_0$  es la longitud inicial del resorte:

$$F_s = F_0 + k \cdot (l - l_0) \quad (2.1)$$

Si se realiza el equilibrio de momentos en la articulación (punto O), se obtiene la Ecuación 2.2, donde  $g$  es la aceleración de la gravedad:

$$m \cdot g \cdot \sin \phi \cdot s = F_s \cdot \frac{a}{l} \cdot \sin \phi \cdot r \quad (2.2)$$

Si se tiene un resorte con una precarga  $F_0 = k \cdot l_0$ , se obtendrá una fuerza de actuación del resorte igual a la Ecuación 2.3. Reemplazando la Ecuación 2.3 en la Ecuación 2.2, se observa que el torque de compensación, Ecuación 2.4, solo dependerá de los parámetros geométricos  $a$  y  $r$  del mecanismo, los cuales son constantes. De esta manera se logra la compensación completa de la carga, debido a que el torque de compensación generado será independiente de la longitud variable del resorte  $l$ .

$$F_s = k \cdot l \quad (2.3)$$

$$\text{Torque} = k \cdot a \cdot r \cdot \sin \phi \quad (2.4)$$

Sin embargo, para lograr la compensación completa de la carga ha sido necesario utilizar un resorte precargado. Con un resorte sin precarga solo se conseguiría una compensación de carga parcial. En ese sentido, para lograr la compensación completa utilizando un resorte convencional (sin precarga) es necesario añadir más elementos al mecanismo de compensación tal como se explicará en la siguiente sección del documento.

### 2.1.2 Compensación basada en la conexión de resortes por medio de cables y poleas

Esta técnica de compensación basada en resortes propone añadir elementos adicionales tales como cables y poleas para la transmisión de la fuerza de compensación, con el fin de lograr una compensación completa de la carga sin tener que utilizar necesariamente un resorte de longitud cero. En la Figura 2.3 se propone una configuración simple de un mecanismo de compensación por medio de un cable y una polea. Se observa que el resorte está conectado a un cable y pasa por la polea en el punto A. El punto O sigue siendo el punto de pivote del elemento OAS con centro de masa en S, punto donde actúa la fuerza del peso que se busca compensar.

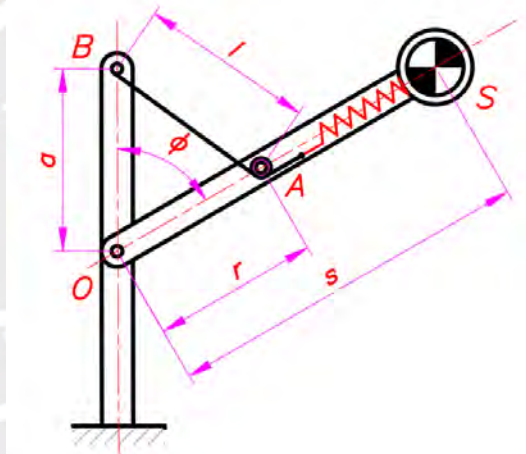


Fig. 2.3 Configuración básica de compensación mediante la conexión de un resorte por medio de cables y poleas

Este ejemplo sirve para ilustrar la ventaja de utilizar un mecanismo adicionando cables y poleas. En la Ecuación 2.5 se muestra la expresión que define el torque de compensación para esta nueva configuración, obtenida del equilibrio de momentos a partir del punto O. Esta expresión es similar a la mostrada en la Ecuación 2.2, solo que para este caso, gracias a la adición del cable y la polea, se puede definir la longitud entre los puntos A y B como  $l_{AB} = l - l_0$ .

$$m \cdot g \cdot \sin \phi \cdot s = F_s \cdot \frac{a}{l - l_0} \cdot \sin \phi \cdot r \quad (2.5)$$

En este caso, si se considera un resorte sin precarga ( $F_0=0$ ), se obtendrá que la fuerza de actuación del resorte es  $F_s = k \cdot (l - l_0)$ . Si se reemplaza este valor de  $F_s$  en la Ecuación 2.5, se obtendrá que el torque será independiente de las longitudes o distancias variables del mecanismo, generando una expresión similar a la Ecuación 2.4. En otras palabras, se logra una compensación completa utilizando un resorte convencional sin precarga.

Asimismo, la posibilidad de transmitir la fuerza de actuación del resorte en distintas direcciones, por medio de conexiones de cables y poleas, ha permitido el desarrollo de varios conceptos de solución de mecanismos de compensación de carga, ya sea para ser implementados en sistemas robóticos como también en dispositivos de actuación para exoesqueletos pasivos. Por otro lado, esta misma técnica se puede extender a la utilización de poleas no circulares con un perfil determinado, similares a una leva, como se explicará más adelante. A continuación, en la Figura 2.4, se muestran algunos ejemplos de mecanismos basados en cables y poleas.

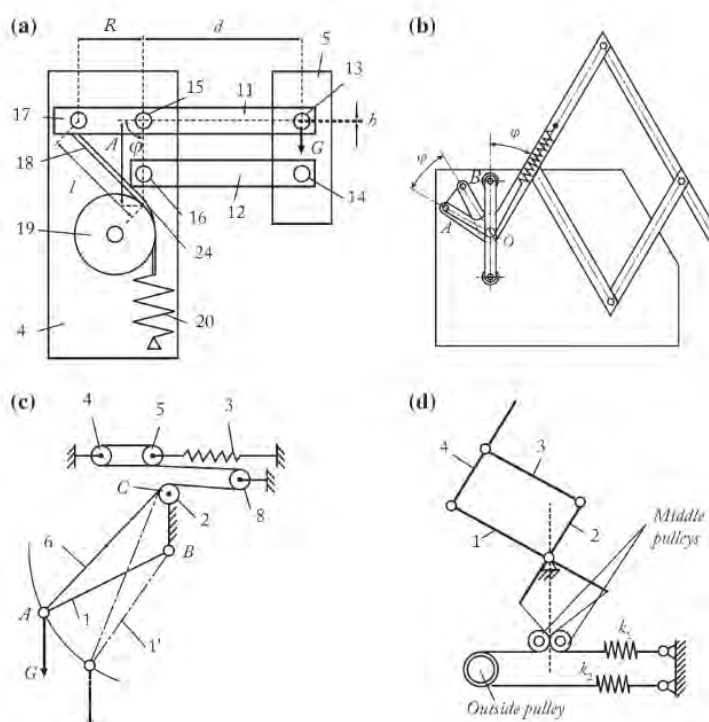


Fig. 2.4 Mecanismos con sistemas de cables, poleas y resortes [Arakelian,2016]

Por otro lado, es posible utilizar poleas con perfiles no circulares o poleas excéntricas para ajustar la curva del torque de compensación del mecanismo a un perfil de torque en específico según la aplicación deseada. De esta manera, se puede regular la máxima amplitud del torque de asistencia, así como el ángulo para el cual se alcanza dicho torque de una manera más precisa. En la Figura 2.5 se muestra el principio básico de compensación por medio de una polea no circular para el diseño de un mecanismo de compensación pasivo por medio de un arreglo de polea no circular y un resorte para asistir a un brazo robótico en dos de sus grados de libertad [Endo, 2010]. Se observa que un extremo del resorte se conecta a una correa, la cual actúa como cable que pasa por la polea no circular. Dicha polea gira solidariamente con el brazo de longitud “ $l$ ” y masa “ $m$ ” cuyo peso se desea compensar. El torque de compensación generado dependerá del radio variable de la polea  $r(\theta)$ , como se muestra en la Ecuación 2.6 [Endo,2010].

$$\text{Torque} = m \cdot g \cdot l \cdot \sin \theta = F_s \cdot r(\theta) \quad (2.6)$$

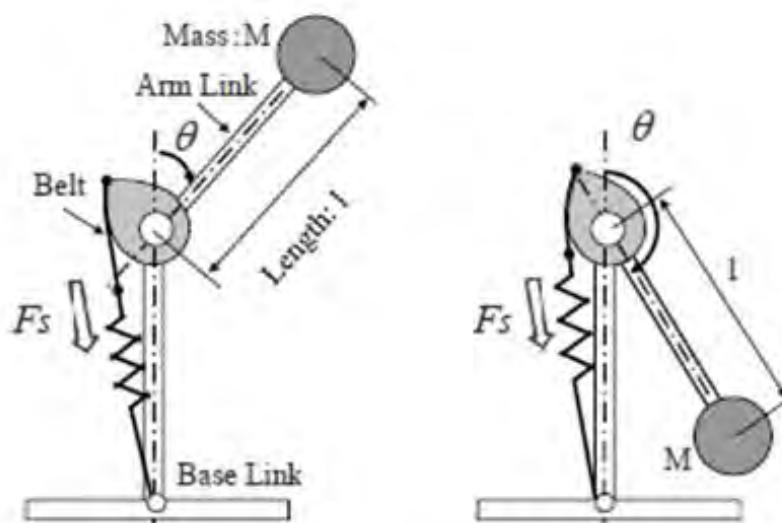


Fig. 2.5 Mecanismo utilizando un sistema Resorte, Cable/Correa y Polea no circular [Endo,2010]

Cabe resaltar que dicho mecanismo no solo tiene aplicación en mecanismos de compensación de peso, sino que se puede utilizar para otros diseños en los que se busque entregar la energía almacenada en un elemento elástico de una manera determinada. Por ejemplo, este mecanismo se utiliza en las poleas de los arcos

compuestos modernos, similar al mostrado en la Figura 2.6, para aliviar la carga del usuario cuando este jala la cuerda del arco hasta el final de la carrera, de manera que le permite apuntar de una manera más cómoda.



Fig. 2.6 Comparación entre arco convencional y arco compuesto (arco con poleas)<sup>2</sup>

En la Figura 2.7 se observa el perfil físico de las poleas no circulares que poseen la mayoría de arcos compuestos modernos, así como también el perfil de la curva de fuerza requerida para tensar el arco a lo largo de toda su carrera. La línea discontinua en la Figura 2.7 hace referencia a la curva de fuerza vs distancia de un arco convencional. Se observa que, en la posición donde el usuario mantiene la posición para disparar, el operario debe ejercer la mayor fuerza debido al comportamiento aproximadamente lineal del perfil elástico. Sin embargo, para las dos curvas superiores correspondientes a arcos con poleas no circulares, si bien poseen una mayor pendiente que el arco convencional, en la posición final de la carrera en la cual se debe mantener la tensión del arco para apuntar, la fuerza decrece significativamente. También se observa que es posible almacenar más energía mecánica potencial (área bajo la curva) utilizando la configuración del arco compuesto. El propósito de este ejemplo es mostrar las diversas aplicaciones y ventajas de los mecanismos de compensación de carga basados en sistemas de cables y poleas no circulares. Asimismo, sirve a manera de analogía para el lector, puesto que mecanismos similares se han desarrollado para generar fuerzas de compensación de carga en exoesqueletos pasivos, tema que será abordado en el siguiente capítulo.

<sup>2</sup> Figura tomada de <http://www.goodgamehunting.com/recurve-vs-compound-bow/>

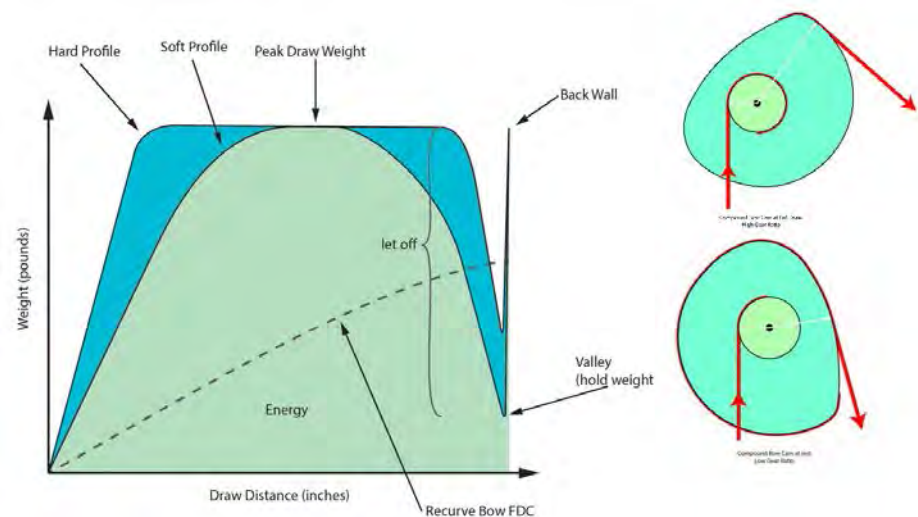


Fig. 2.7 Curvas de fuerza de tensión vs distancia de carrera para distintas configuraciones de arcos. Se muestra el perfil convencional de las poleas de un arco compuesto<sup>3</sup>

Teóricamente es posible lograr una compensación completa utilizando este tipo de mecanismos. No obstante, en la práctica existen diversas fuentes de error que reducirán la eficiencia del mecanismo de compensación. La primera fuente de error está asociada a que los resortes reales no tienen un comportamiento totalmente lineal. La segunda fuente de error proviene del radio finito de la polea. La tercera fuente de error se debe básicamente a las tolerancias y errores en los procesos de manufactura de los elementos de los mecanismos. En este sentido, los valores de rigidez calculados para los resortes deberán ser ajustados [Ebert-Uphoff,2002].

### 2.1.3 Compensación basada en la conexión de resortes por sistemas mecánicos auxiliares

Las técnicas modernas de compensación basadas en resortes utilizan en su mayoría elementos mecánicos auxiliares para balancear una carga en específico de una manera más eficiente. Añadir sistemas mecánicos auxiliares a un sistema de compensación basado en resortes es análogo a incorporar sistemas de cables y poleas como se mostró en las técnicas expuestas en la sección anterior. Por medio de estas técnicas se puede utilizar tanto resortes de longitud cero (pre cargados) como resortes convencionales

<sup>3</sup> Figura tomada de <https://www.outsideonline.com/2172756/how-compound-bows-work>

sin precarga, dependiendo de la configuración utilizada. En este sentido, podemos subdividir los mecanismos auxiliares para estas técnicas de compensación en tres subgrupos: elementos rígidos auxiliares, sistemas de levas, y sistemas de engranajes [Arakelian,2016].

### 2.1.3.1 Compensación basada en la conexión de resortes por medio de elementos rígidos auxiliares

Estas técnicas de compensación añaden elementos mecánicos como bielas, vástagos, correderas, entre otros; con el fin de transferir y distribuir la fuerza del acumulador de energía (resorte) de una manera determinada, a diferencia de las técnicas más sencillas en las cuales el elemento elástico se conecta directamente al cuerpo que soporta la carga a compensar. La ventaja que presentan frente a las técnicas de compensación basadas en cables, poleas y resortes, es que estos sistemas se caracterizan por tener una mayor rigidez. En este sentido, tendrán una mayor eficiencia de compensación, considerando la correcta manufactura de los elementos auxiliares de unión para reducir las pérdidas por fricción. En la Figura 2.8 se observa un mecanismo de compensación sencillo, el cual utiliza un resorte a compresión, un vástago y una corredera que pivotea en el punto B. Mediante esta configuración es posible lograr una compensación completa de una supuesta carga actuante en el elemento 1 utilizando un resorte convencional sin precarga. No obstante, el sistema será mucho más rígido comparado al sistema análogo que utiliza cables y poleas como elementos de conexión explicado en la sección anterior.

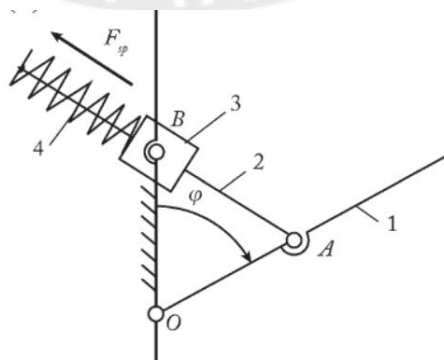


Fig. 2.8 Mecanismo basado en elementos rígidos auxiliares [Arakelian,2016]



En la Figura 2.9 se muestran secciones de mecanismos a un mayor nivel detalle basados en el concepto explicado anteriormente. En la Figura 2.9 (a) se muestra la actuación combinada de dos resortes utilizando vástagos con guías ortogonales entre sí. Para esta aplicación en específico se utilizan dos resortes con igual constante de rigidez, los cuales proveerán una fuerza de compensación variable de naturaleza sinusoidal. De igual manera, la Figura 2.9 (b) corresponde a un mecanismo que incorpora un vástago, el cual, para generar la fuerza de compensación, comprime un resorte, que a su vez se une al miembro donde actúa la fuerza a compensar por medio de un punto articulado [Arakelian,2016].

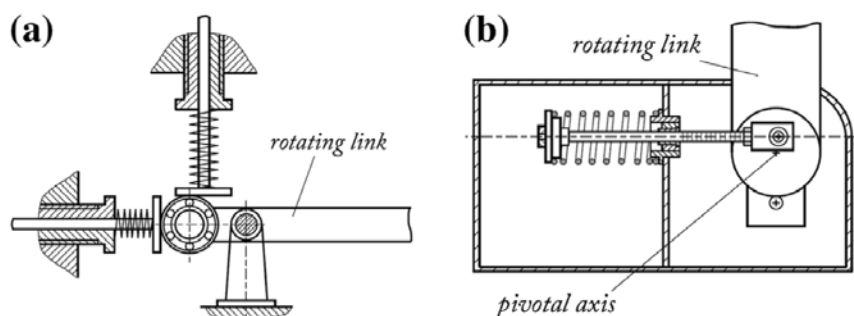


Fig. 2.9 Ejemplos de mecanismos de compensación utilizando vástagos y resortes a compresión [Arakelian,2016]

Asimismo, por medio de la adición de elementos rígidos auxiliares, se pueden configurar mecanismos de compensación de carga en los cuales el elemento a balancear tiene un movimiento de traslación vertical. En la Figura 2.10 se muestran algunos ejemplos de mecanismos de compensación, en donde se tiene a la carga  $P$  actuando sobre elementos restringidos a trasladarse verticalmente. Realizando el equilibrio de fuerzas estático se comprueba que estos mecanismos logran una compensación completa de la carga.

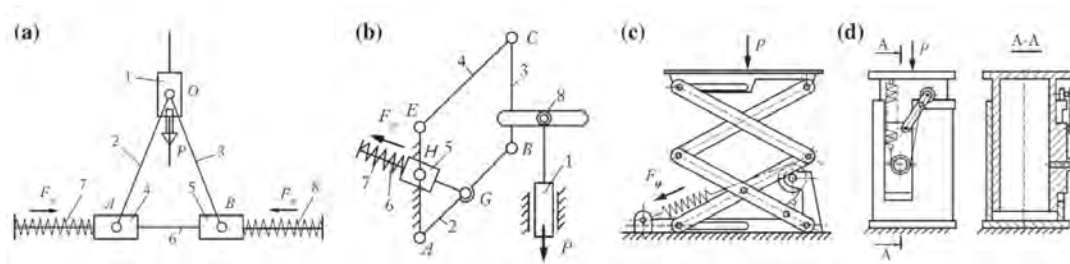


Fig. 2.10 Mecanismo basado en elementos rígidos auxiliares [Arakelian,2016]

La desventaja de utilizar esta técnica de compensación de carga para elementos de traslación vertical es que se tienen desplazamientos verticales relativamente pequeños. Para solucionar este problema, se pueden incorporar mecanismos de transmisión suplementarios para amplificar el movimiento, tales como pantógrafos, polipastos o conjuntos de engranajes. Finalmente, se han utilizado este tipo de mecanismos en órtesis y exoesqueletos pasivos con el fin de soportar total o parcialmente el peso de alguna extremidad del usuario. Por ejemplo, en la Figura 2.11, se muestra una propuesta de órtesis terapéutica de miembros inferiores, diseñada para asistir en procesos de rehabilitación; en los cuales, el mismo peso de la pierna del paciente puede generar problemas a la hora de caminar o realizar los ejercicios de rehabilitación. Debido a que los músculos del paciente aún están débiles, el peso de la extremidad inferior es una carga considerable, y un mecanismo de compensación de peso facilitará de gran manera el proceso de rehabilitación. Para el diseño conceptual mostrado en la Figura 2.11, en primer lugar, fue necesario ubicar geoméricamente el centro de masa de la pierna utilizando un mecanismo de tipo paralelogramo, para luego ubicar los resortes en las posiciones adecuadas del mecanismo de tipo pantógrafo y, consiguientemente, lograr una compensación completa del efecto del peso en todo el rango de movimiento requerido para el proceso de rehabilitación.

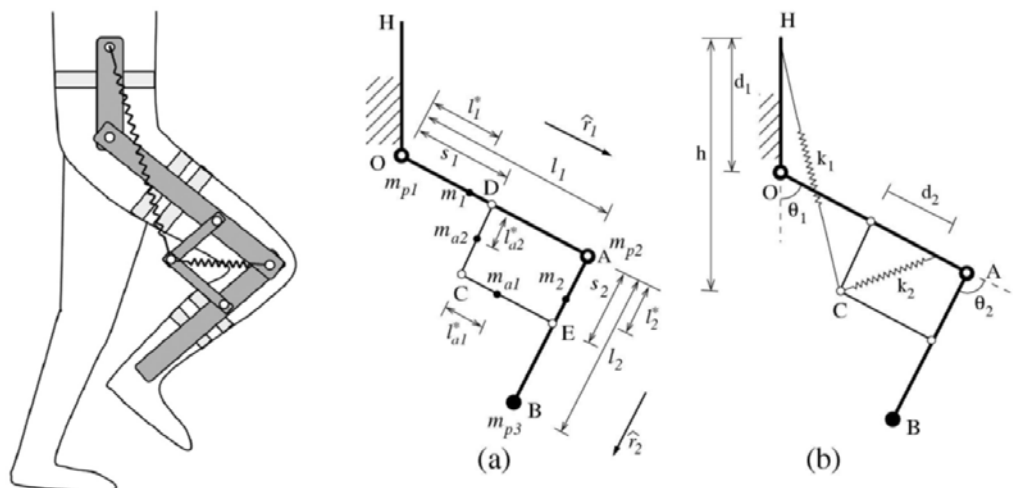


Fig. 2.11 Diseño conceptual de órtesis para compensar el peso de la pierna en proceso de rehabilitación [Banala,2004]

Asimismo, es importante señalar que la fricción entre los elementos mecánicos jugará un papel importante al momento de diseñar el sistema de compensación. Según estudios, las fuerzas y torques generados por la fricción pueden ser compensados de manera activa por medio de un motor de baja potencia ubicado en las articulaciones. De esta manera, se tiene un sistema híbrido que combina la compensación pasiva por medio de resortes y elementos de conexión auxiliares para la carga asociada al peso de la pierna, y la compensación de carga activa utilizando pequeños actuadores para contrarrestar las fuerzas de fricción. Por otro lado, por medio de simulaciones numéricas, se ha demostrado que el error generado por ignorar el peso de los resortes y los efectos de la fricción puede llegar a ser de hasta 20% [Arakelian,2016].

### 2.1.3.2 Compensación basada en sistemas de levas y resortes

Esta técnica, basada en sistemas de levas y resortes, permite optimizar el mecanismo de compensación de carga debido a que se pueden encontrar los perfiles de las levas adecuados para balancear una carga de manera continua. Como se mencionó en la Sección 2.1.2, es posible incorporar poleas no circulares en forma de levas para compensar una carga. No obstante, también se pueden incorporar sistemas de levas en otras configuraciones como se puede observar en la Figura 2.12. Por ejemplo, se puede utilizar un mecanismo leva seguidor en el cual la leva puede estar fija al bastidor o al

elemento de compensación; así como puede tener movimiento rotatorio o traslacional [Simionescu,2000]

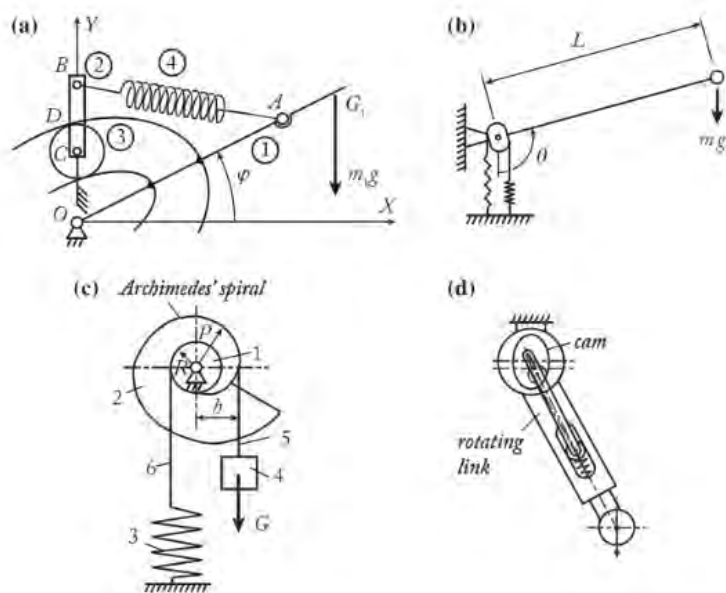


Fig. 2.12 Ejemplos de mecanismos de compensación con sistemas de levas y resortes [Arakelian,2016]

En el estudio presentado por V. Arakelian, se señala que es posible compensar la fuerza de una carga vertical utilizando un resorte y una polea no circular con un perfil según el espiral de Arquímedes, como se observa en la Figura 2.12 (c). Sin embargo, posteriormente, en un estudio realizado por K. Kobayashi (2001), por medio de un análisis de conservación de energía y ecuaciones de equilibrio, se obtuvo el perfil adecuado para lograr una óptima compensación de la carga vertical; demostrando que la curva del perfil ideal no corresponde a ninguna curva matemática notable, a diferencia de lo que se tenía pensado. En este análisis, se consideró una polea circular para la cuerda que une a la carga vertical y una polea con perfil en espiral para el lado del resorte como se muestra en la Figura 2.13. El perfil en espiral obtenido en este estudio puede ser descrito por las Ecuaciones 2.7 y 2.8 para los ejes de coordenadas mostrados en la Figura 2.13. La Ecuación 2.7 describe al eje horizontal “ $r$ ”, en función de la carga “ $W$ ”, la constante de rigidez del resorte “ $k$ ”, la deformación inicial del resorte “ $x_0$ ”, el ángulo de rotación de la curva “ $\theta$ ” y el radio de la polea circular para la cuerda el peso “ $r_0$ ”. Asimismo, la Ecuación 2.8 muestra la ecuación paramétrica para el eje vertical “ $\delta$ ” [Kobayashi,2001].

$$r(\theta) = \frac{W \cdot r_0}{k} \cdot \left( \frac{2 \cdot W \cdot r_0}{k} \cdot \theta + x_0^2 \right)^{-1/2} \quad (2.7)$$

$$\delta(\theta) = \left( \frac{W \cdot r_0}{k} \right)^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot W \cdot r_0}{k} \cdot \theta + x_0^2 \right)^{-3/2} \quad (2.8)$$

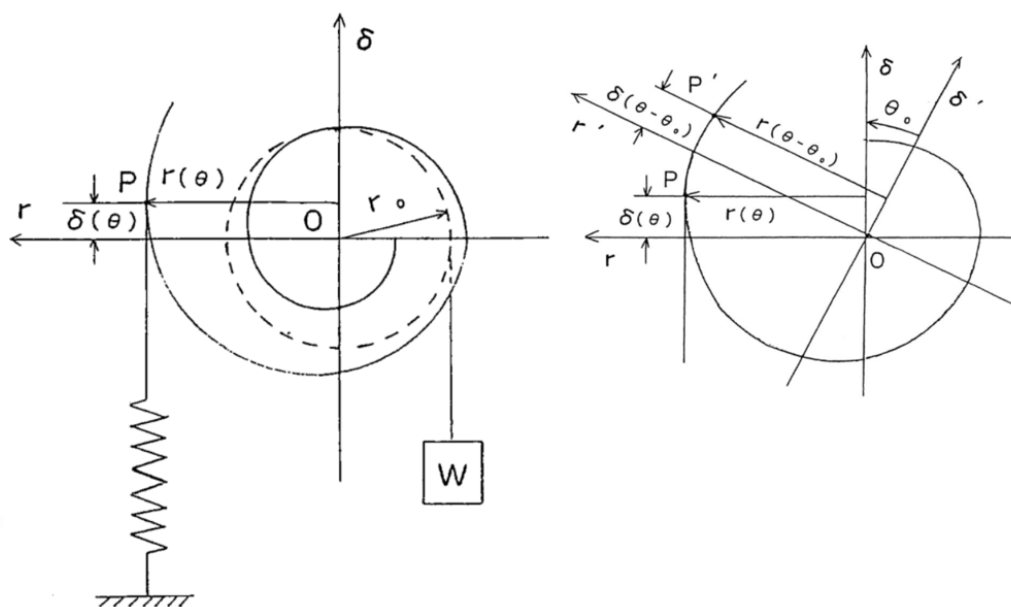


Fig. 2.13 Esquema de sistema de compensación utilizando una polea del tipo leva con perfil en espiral [Kobayashi,2001]

Por otro lado, en la Figura 2.12 (d) se muestra un mecanismo configurado por una leva con perfil interior y un rodillo-seguidor unido por medio de una conexión al resorte. En un estudio realizado por K. Koser (2009), se deriva el perfil interior de la leva a partir de un análisis energético del mecanismo mostrado en la Figura 2.14. En primera instancia se propone utilizar un seguidor con punta (*knife edge follower*). No obstante, debido a que este tipo de seguidor representa un alto concentrador de esfuerzos en el punto de contacto, se propuso reformular el análisis utilizando un seguidor con rodillo. Además, se definieron las ecuaciones paramétricas para el diseño del perfil interior de la leva. Finalmente, se muestra la relación del torque de compensación en la Ecuaciones 2.9 y 2.10, donde “ $q$ ” es el ángulo de rotación de la leva; “ $m$ ” es el peso de la carga a compensar; “ $g$ ” es la aceleración de la gravedad; “ $k$ ” es la constante de

rigidez del resorte; “ $s_0$ ” es la deformación inicial del resorte; y “ $s$ ” es la deformación del resorte la cual variará dependiendo del ángulo de rotación de la leva [Koser,2009].

$$\text{Torque} = m \cdot g \cdot l \cdot \sin(q) = k \cdot s(q) \cdot s'(q) \quad (2.9)$$

$$s(q) = \sqrt{s_0^2 + \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot l}{k} \cdot (1 - \cos(q))} \quad (2.10)$$

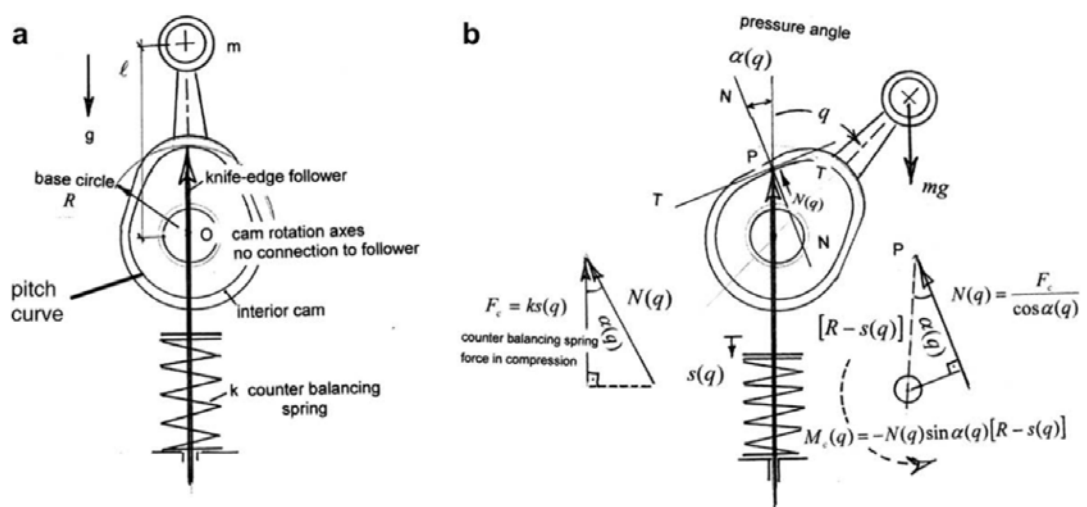


Fig. 2.14 Análisis de fuerzas en el mecanismo de compensación leva-seguidor [Koser,2009]

### 2.1.3.3 Compensación basada en sistemas de engranajes y resortes

Las técnicas de compensación de carga utilizando trenes de engranajes han sido desarrolladas principalmente para sistemas de brazos robóticos articulados, aunque también han sido aplicados en sistemas de tipo pórtico y plataformas. Al igual que la técnica de compensación de carga por medio de elementos rígidos auxiliares, esta técnica tiene la ventaja de darle un alto grado de rigidez al mecanismo de compensación. Otra ventaja de la incorporación de sistemas de engranajes es que se tiene la posibilidad de cambiar la dirección en la cual se transmite la fuerza de compensación mediante un mecanismo relativamente compacto. En la Figura 2.15 se muestran algunos ejemplos de mecanismos de compensación basados en sistemas de

engranajes y resortes. No obstante, es importante señalar que el peso de las transmisiones por engranajes puede afectar negativamente al sistema a compensar, haciéndolo más complejo y pesado. Por lo tanto, es importante determinar, según la naturaleza de la carga, si es viable utilizar esta técnica de compensación.

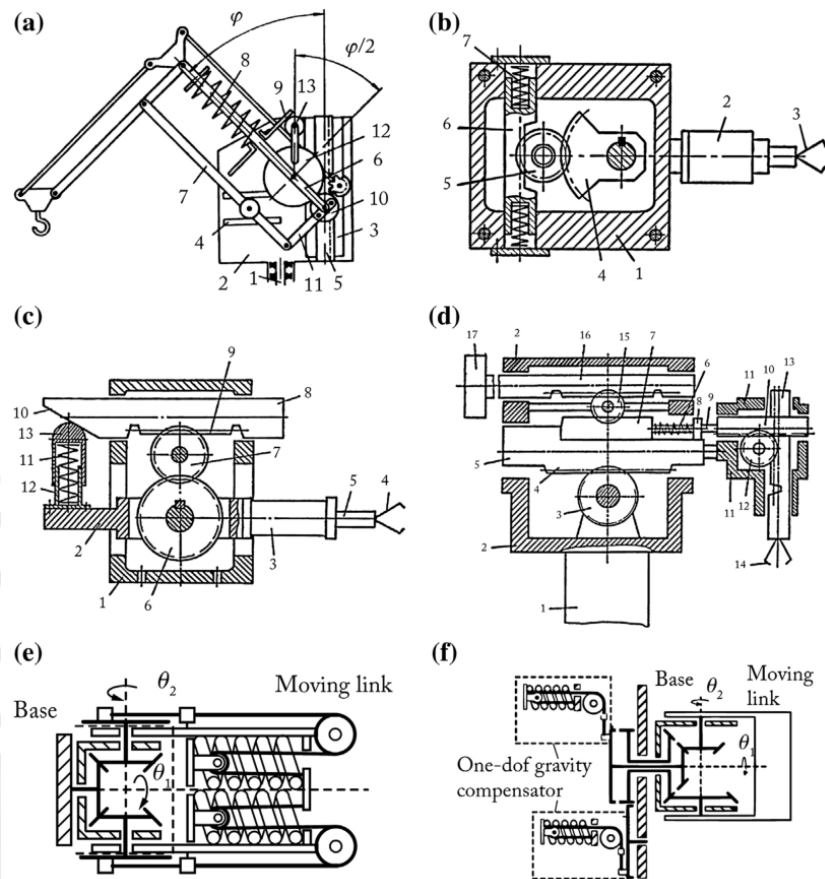


Fig. 2.15 Ejemplos de mecanismos de compensación de carga utilizando sistemas de engranajes y resortes [Arakelian,2016]

En un estudio realizado por C. Cho (2011) se desarrolló la propuesta de una metodología de diseño para un mecanismo de compensación con sistema de engranajes y resortes por medio de un análisis energético y matricial. Se desarrolló el análisis del mecanismo de compensación para un grado de libertad, y luego se extrapoló a “n” grados de libertad, utilizando una matriz obtenida del análisis de la energía potencial del sistema. Además, se propuso un concepto de solución utilizando un sistema de engranajes cónicos diferenciales para generar un torque de asistencia para balancear una carga. En la Figura 2.16 se observa el detalle del mecanismo de compensación, así como la disposición del mecanismo para compensar dos extremidades del brazo de un

sistema de manipulación cargas. Sin embargo, en el estudio se concluyó que este tipo de mecanismo es propenso a introducir un efecto de reacción, o retroceso (“backlash”), cuando cambia la dirección de la carga. Finalmente, se señala que por medio de resortes con pre carga se podría minimizar este efecto [Cho,2011].

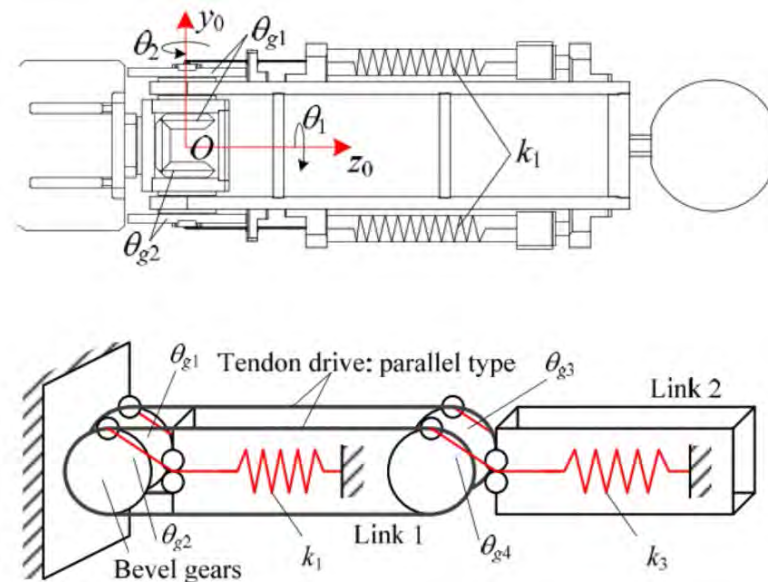


Fig. 2.16 Sistema de compensación utilizando un sistema de engranajes tipo diferencial [Cho,2011]

En las Figura 2.17 se muestra un sistema de tipo plataforma para compensar una carga vertical, en el cual se incorporan tanto la técnica de compensación por medio de levas y resortes como la técnica de compensación basada en engranajes y resortes. Por medio del perfil en espiral de la leva es posible tener una fuerza de compensación constante en todo el desplazamiento vertical de la plataforma. Asimismo, la leva provee un torque constante a un tambor en el que se enrollan cables con el fin de ejercer uniformemente la fuerza de compensación constante. Por otro lado, se realiza un acople de la leva y el tambor por medio de un sistema de engranajes piñón interior y corona. Los engranajes permiten ajustar y rotar la leva para variar la fuerza de compensación que genera el mecanismo [Patente US005311827A, 1994].



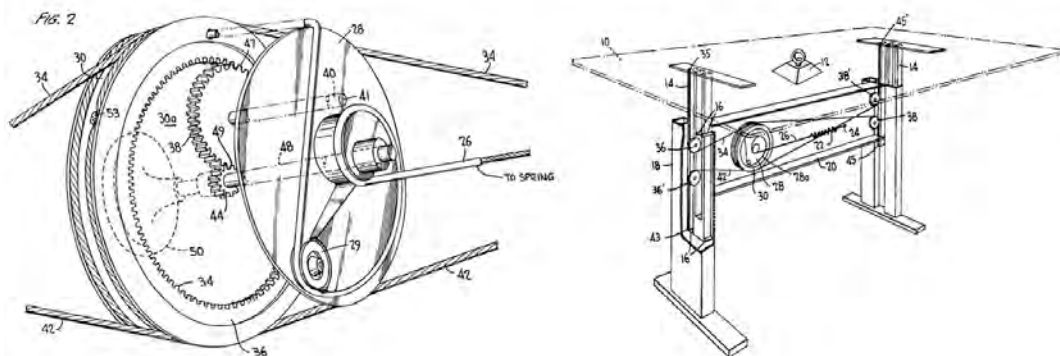


Fig. 2.17 Mecanismo de compensación de carga vertical para una plataforma utilizando sistemas de levas, engranajes y resortes [Patente US005311827A, 1994]

Finalmente, en la Figura 2.18 se muestra un mecanismo de compensación que utiliza dos elementos rígidos de conexión (68), sistemas de engranajes (56, 62 y 64) y un sub mecanismo de actuación (10) conformado por un resorte de compresión, un vástago que va por el interior del resorte a lo largo de su eje axial y una carcasa; con el fin de generar un torque de asistencia en un rango de 180°.

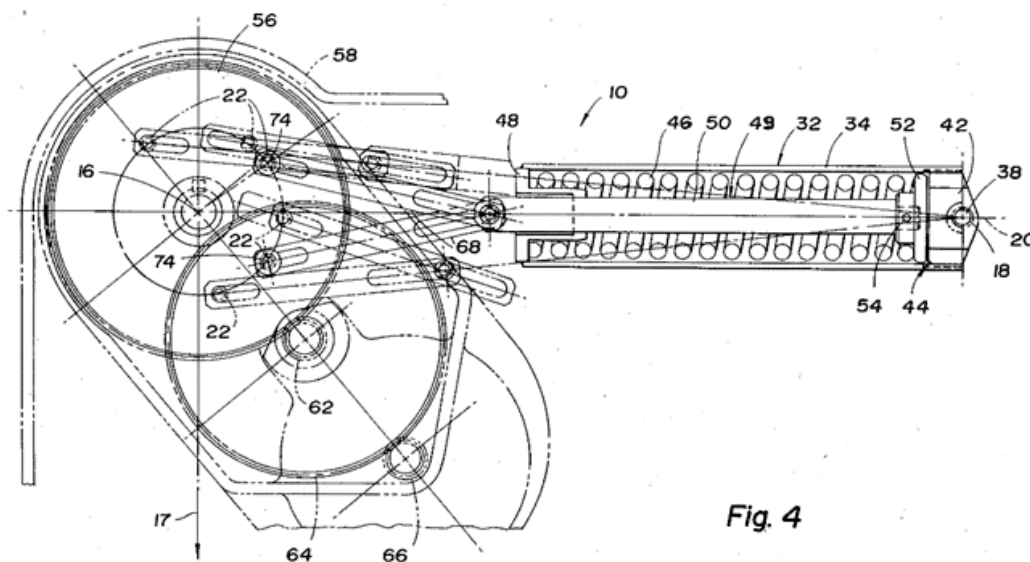


Fig. 4

Fig. 2.18 Vista de corte de mecanismo de compensación de carga basado en bielas, engranajes y resorte [Patente US004653975, 1987]

Se observa que los elementos rígidos de conexión son unas bielas ranuradas, las cuales permiten que exista un juego en los pines de conexión del mecanismo de actuación con el sistema de engranajes. Las ranuras dentro de los elementos de conexión se

proponen con el fin de que las bielas trabajen a tensión o simplemente estén en reposo, dependiendo del ángulo de giro del elemento a compensar. En la Figura 2.19 se observa el concepto del mecanismo, en el cual se representan a los miembros de conexión (68) a manera de cuerdas. En este caso, los engranajes sirven para transmitir de forma compacta el torque de compensación al elemento final a balancear (14).

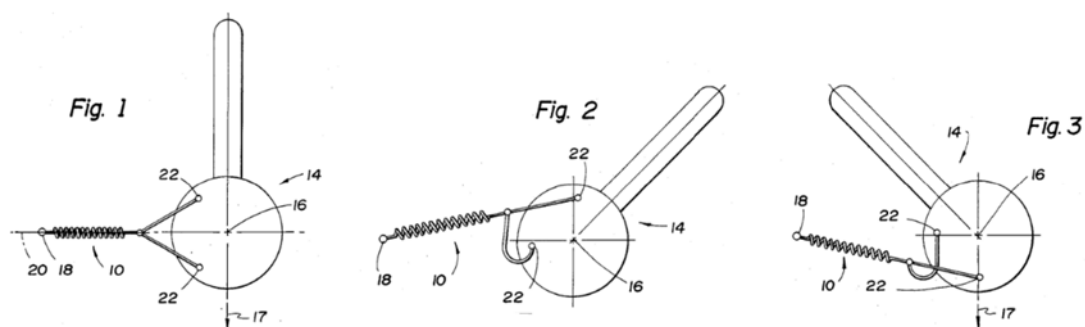


Fig. 2.19 Concepto de funcionamiento de los elementos de conexión para el mecanismo basado en bielas, engranajes y resortes [Patent No. US004653975, 1987]

Por medio de los dos últimos ejemplos descritos se infiere que es posible encontrar diversos conceptos de solución de mecanismos de compensación de carga en los cuales se combina más de una técnica básica de compensación.

## 2.2 Técnicas de compensación de carga basadas en contrapesos

Una de las técnicas más antiguas de compensación de carga es por medio de mecanismos que incorporan contrapesos para balancear y equilibrar un elemento rígido pivotante dentro de un sistema mecánico. En la Figura 2.20 se muestra el concepto básico de compensación de una carga estática por medio de un contrapeso. Asimismo, siguiendo el enfoque propuesto por V. Arakelian (2016), se puede hacer una subdivisión de las técnicas de compensación utilizando contrapesos: técnicas de compensación que montan directamente el/los contrapeso/s en la extremidad móvil que se requiere balancear; y técnicas de compensación que montan el/los contrapeso/s por medio de elementos rígidos auxiliares de conexión [Arakelian,2016].

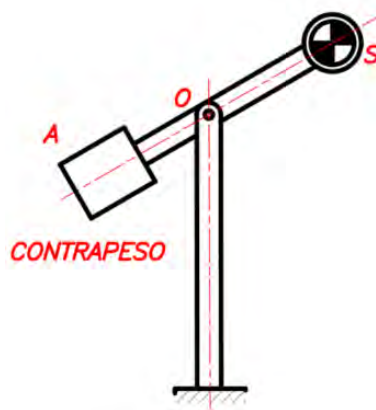


Fig. 2.20 Concepto básico de compensación basada en contrapesos

Los sistemas de compensación de carga basados en contrapesos han sido aplicados de manera exitosa en manipuladores manuales para cargas industriales o HOBM por sus siglas en inglés (Hand-Operated Balanced Manipulator). Los HOBM permiten manipular una carga en un plano horizontal con gran facilidad, dado que se encargan de compensar la carga vertical del peso de la carga. Asimismo, pueden tener mecanismos simples como el mostrado en la Figura 2.20, en el cual el contrapeso se monta directamente en el brazo, como pueden tener elementos de conexión auxiliares que permiten optimizar la compensación de la carga mediante el posicionamiento del centro de masa del sistema mecánico. Por otro lado, se han desarrollado sistemas que incorporan resortes y actuadores activos (hidráulicos y neumáticos) en conjunto con los contrapesos iniciales para optimizar el torque de compensación. En la Figura 2.21, se muestra un ejemplo de un mecanismo para un HOBM que utiliza un sistema de tipo pantógrafo conformado por los elementos AED, EB, BC y DCG.

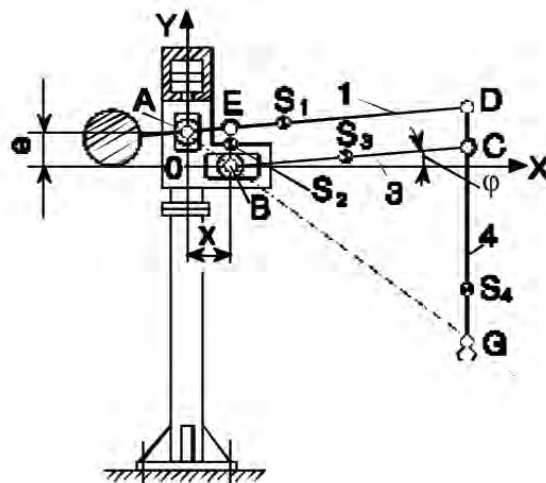


Fig. 2.21 Mecanismo de manipulador de cargas manuales basado en un contrapeso montado en un mecanismo de tipo pantógrafo [Arakelian,2004]

El contrapeso es montado en el extremo correspondiente al punto A para compensar la carga G en el otro extremo del brazo. Para que el contrapeso logre una compensación de la carga a manipular en todo el rango de movimiento, se requiere que el centro de masa del mecanismo de tipo pantógrafo solo se mueva de manera horizontal (o en su defecto, no se mueva). Asimismo, se asume que las cargas actuantes sobre los elementos que conforman el mecanismo tipo pantógrafo son constantes. Cuando se cumplen dichas condiciones, el centro de masa del mecanismo del manipulador coincide con la vertical que pasa por el punto B, como se muestra en la Figura 2.21. Por consiguiente, para desplazamientos verticales de una carga, el esfuerzo para su manipulación será constante y proporcional a la misma; de manera que el operario solo tendrá que vencer las fuerzas de fricción entre los elementos mecánicos para mover libremente el objeto que se desea manipular [Arakelian,2004].

En un estudio realizado por E. Fukushima (2005), se propone un mecanismo similar para compensar la carga del peso de un brazo robot para un vehículo detector de minas. En ese sentido, se logró reducir los torques requeridos en los actuadores de las articulaciones móviles del brazo gracias al sistema de compensación por contrapesos. Asimismo, se demostró que el contrapeso, colocado estratégicamente en la extremidad del manipulador tipo pantógrafo, mantenía la estabilidad del sistema, incluso cuando el extremo del brazo actuante (L1) se encontraba por debajo del nivel de las llantas del vehículo, como se muestra en la Figura 2.22. Se observa el gran alcance que posee el

brazo para escanear un terreno irregular manteniéndose la estabilidad del vehículo [Fukushima,2005].

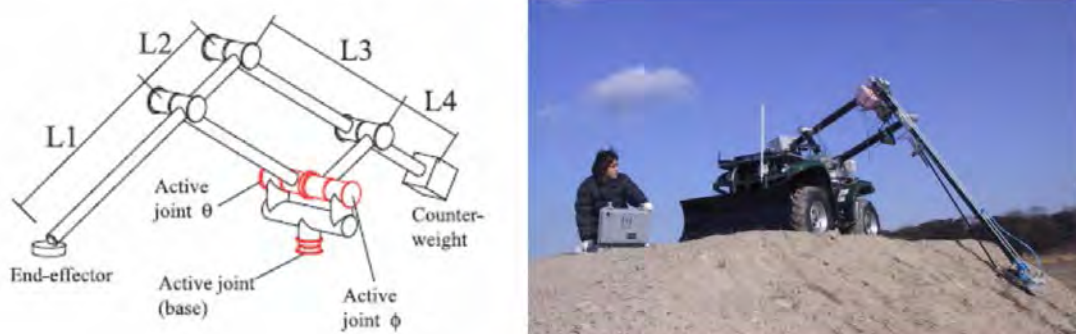


Fig. 2.22 Mecanismo de compensación por medio contrapesos para un brazo robot manipulador de un vehículo tele operado para detectar minas [Fukushima,2005]

No obstante, es importante señalar las desventajas de utilizar un sistema de contrapesos como técnica de compensación. La primera desventaja es que este método aumenta inevitablemente la masa de todo el sistema mecánico, lo cual, puede ser perjudicial, por ejemplo, cuando se desea diseñar un sistema mecatrónico compacto y ligero, donde uno de los objetivos es minimizar el peso del equipo. Asimismo, se incrementará el volumen del mecanismo, y si se tienen limitaciones de espacio, añadir contrapesos puede ser contraproducente. Por esta razón, es común que en algunas aplicaciones de sistemas robóticos se utilicen a los mismos motores o actuadores del robot como contrapesos, como se observa en la Figura 2.23 [Arakelian,2016]. La segunda desventaja es que, al incrementar la masa del sistema, también aumentará el momento de inercia, además que puede darse el caso de que se tenga un efecto negativo, en el cual, en lugar de reducir el torque requerido para la actuación del sistema, este se incrementa. La tercera desventaja es que un contrapeso puede provocar un desbalance en otra sección de la máquina o sistema mecatrónico si no es colocado en el punto adecuado [Mahalingam, 1986].

Por las razones expuestas, las técnicas de compensación basadas en resortes son más eficientes comparadas con las basadas en contrapesos. No obstante, en el caso de los HOBM, es común que aún se incorporen sistemas de compensación utilizando contrapesos, pero son optimizados utilizando otras técnicas de compensación como se

detalló anteriormente. Finalmente, debido al incremento de masa que conlleva esta técnica, no sería viable incorporar esta técnica en mecanismos de tipo exoesqueleto u órtesis.

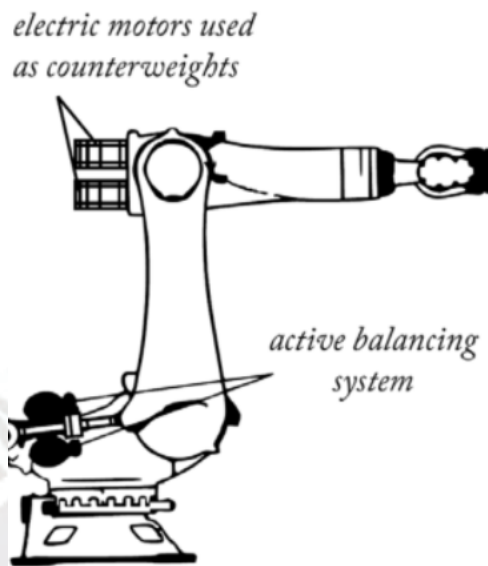


Fig. 2.23 Ejemplo de compensación en un brazo robot que utiliza a los motores como contrapesos [Arakelian,2016]

### 2.3 Técnicas de compensación de carga basada en actuadores auxiliares

Estas técnicas también se clasifican como compensación de carga activa, debido a que se utilizan actuadores auxiliares, como cilindros neumáticos o hidráulicos, para generar la fuerza de asistencia requerida para balancear la carga. Estos elementos usualmente se conectan directamente al mecanismo de compensación. Por ejemplo, en la Figura 2.24 se muestra un HOBM que, además de tener un contrapeso (18), utiliza un cilindro (15) que actúa directamente sobre el mecanismo de tipo pantógrafo del manipulador. Por otro lado, también se han desarrollado mecanismos de tipo plataforma en los cuales el actuador se acopla directamente para compensar cargas verticales [Arakelian,2016].

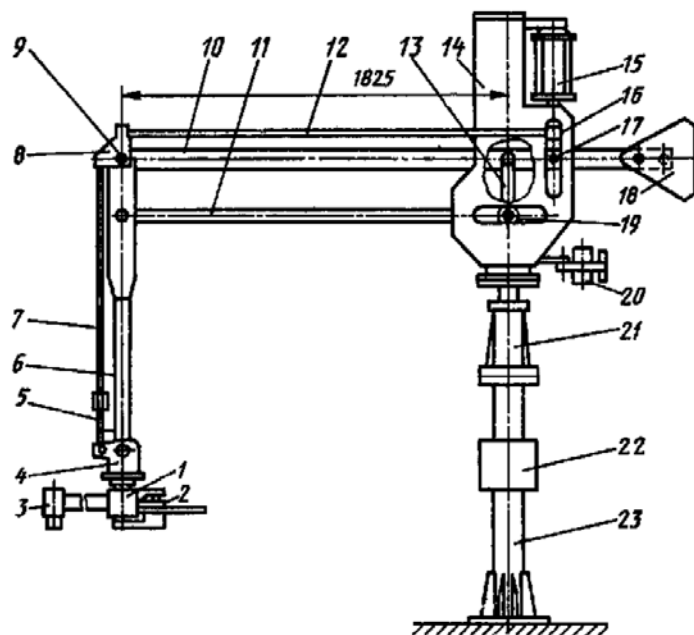


Fig. 2.24 Manipulador manual para cargas industriales con mecanismo de compensación basado en actuadores [Arakelian,2004]

También se han desarrollado propuestas de sistemas de compensación de carga activa bajo el concepto de incorporar reservorios de fluido para que trabajen a manera de contrapesos variables. En la Figura 2.25 se muestra un esquema de este concepto, en el cual se logra una compensación continua de la carga actuante sobre el punto (7), por medio de un sistema que bombea un determinado fluido entre los reservorios (8) y (9) dependiendo de la magnitud de la carga actuante en (7). No obstante, según menciona V. Arakelian (2016), este tipo de técnica es aplicable solo para mecanismos que actúan dentro de un solo plano, debido a que, si se quisiera operar en varios planos, se complicaría demasiado el diseño del mecanismo, aumentando considerablemente la masa del mismo [Arakelian,2016].

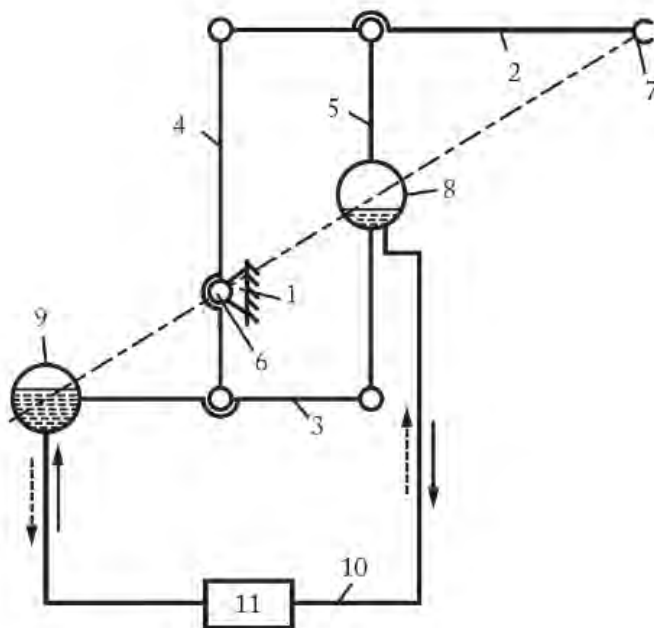


Fig. 2.25 Concepto de un mecanismo de compensación activo basado en contrapesos variables por medio del bombeo de un fluido [Arakelian,2016]

Finalmente, uno de los campos de aplicación actuales para los mecanismos de compensación de gravedad por medio de actuadores es el del desarrollo de sistemas de asistencia para caminar y realizar labores de rehabilitación. Estos mecanismos de tipo exoesqueleto activo de miembros inferiores incorporan sistemas que compensan el peso de las piernas de los usuarios por medio de actuadores que requieren poca energía para ser operados, y, en algunos casos, incluso incorporan sistemas de resortes en las articulaciones para eliminar los efectos de la gravedad [Arakelian,2016]. No obstante, en relación al presente trabajo de investigación, es de mayor interés el estudio de las técnicas pasivas de compensación de carga, en especial las técnicas basadas en resortes, puesto que los principios mecánicos de estas técnicas son los que finalmente son incorporados en los exoesqueletos industriales que serán estudiados y comparados en el siguiente capítulo.



### **CAPÍTULO 3**

## **COMPARACIÓN DE EXOESQUELETOS INDUSTRIALES CON ACTUACIÓN PASIVA DE MIEMBROS SUPERIORES**

Se han desarrollado diversos exoesqueletos industriales que brindan asistencia a trabajadores en el entorno laboral; reduciendo la fatiga muscular generada por la ejecución de trabajos repetitivos y por mantener posiciones forzadas (no ergonómicas) durante tiempos prolongados. En este sentido, se requiere que dichos dispositivos sean compactos, confiables y fáciles de mantener. Asimismo, como se mencionó en el Capítulo 1, deben asistir al operario sin restringir su movilidad al realizar las distintas actividades que hacen de manera cotidiana en el entorno laboral. Por lo tanto, si bien existen exoesqueletos industriales activos en el mercado, actualmente se prefiere incorporar exoesqueletos industriales de actuación pasiva debido a que no dependen de una fuente externa de energía; no incorporan actuadores costosos, y son más livianos en comparación con los exoesqueletos activos. Además, el costo para que una empresa realice pruebas piloto en campo con estos dispositivos también es menor. Esta versatilidad ha permitido que los exoesqueletos industriales pasivos hayan sido implementados con éxito en actividades de manufactura, logística y mantenimiento.

Asimismo, como se explicó en el Capítulo 1, la mayoría de estos exoesqueletos se enfoca en asistir al operario en una tarea en específico, de manera que el dispositivo interactúa con una sola parte del cuerpo y los grupos musculares de interés. Esto permite un movimiento más natural para el operario y una experiencia menos invasiva. Por consiguiente, las zonas del cuerpo humano en las cuales se han enfocado la

mayoría de exoesqueletos pasivos industriales principalmente son las piernas, la espalda baja y los hombros. No obstante, el presente trabajo de investigación se centra en realizar el estudio comparativo de exoesqueletos pasivos de miembros superiores, los cuales, en su mayoría, son para la asistencia del hombro. En este sentido, en el presente capítulo se desarrollará un estudio comparativo entre los principales exoesqueletos pasivos de miembros superiores desarrollados a la fecha; donde se explicarán los principios de funcionamiento de los mecanismos de actuación. Estos mecanismos de actuación están basados en las técnicas de compensación de carga explicadas en el Capítulo 2, principalmente las técnicas basadas en resortes. Asimismo, en base al estudio realizado por A. Voilqué, se realizará un análisis cinemático estructural de los exoesqueletos en estudio [Voilqué ,2019].

Lo exoesqueletos contemplados en este estudio son ocho: Shoulder X v3, Skelex 360, Levitate Airframe, Comau Mate, Paexo, Hyundai H-VEX, EksoVest v1, y Robo-mate; con el fin de brindar al lector un panorama general de los distintos principios mecánicos en los que se basan estos dispositivos. No obstante, muchos de estos dispositivos han sido desarrollados recientemente, por lo que la información expuesta en este documento queda sujeta a ser actualizada según se vayan incorporando las nuevas versiones y mejoras por parte de los fabricantes en el futuro.

### **3.1 ShoulderX**

El ShoulderX es un exoesqueleto industrial pasivo para minimizar la carga y la fatiga en los músculos del hombro al realizar actividades sobre cabeza por tiempos prolongados. El exoesqueleto ha sido desarrollado por SuitX, una marca comercial de la firma norteamericana US Bionics. Cuenta con un diseño modular, el cual le permite conectarse a un exoesqueleto de asistencia para las piernas (LegX), para transferir la carga de los hombros hasta el suelo. No obstante, también puede ser utilizado de manera individual, distribuyendo la carga de los hombros hacia la zona lateral de la cadera y parte del torso del operario. Actualmente se han desarrollado 3 versiones. La última versión del ShoulderX v3 será analizada en este estudio (Figura 3.1).



Fig. 3.1 Exoesqueleto ShoulderX v3<sup>4</sup>

La principal ventaja que ofrece esta última versión, en comparación a las versiones anteriores, es la drástica reducción del peso, aproximadamente en un 40% en comparación con la versión anterior. El peso de este exoesqueleto es de 3,2 kg o 7,1 lbs. Asimismo, cuenta con accesorios adicionales para mejorar la comodidad y seguridad del operario, como un apoyo de cuello, puntos de conexión para cinturones de herramientas, puntos para el montaje de ventiladores para trabajos en alta temperatura, entre otros. Por otro lado, puede ser configurado con materiales a prueba de fuego, a prueba de polvo y resistentes al agua para entornos de trabajo hostiles tales como sitios de construcción y líneas de ensamblaje de barcos. La fuerza de soporte proporcionada por este dispositivo es de 1,4 kgf a 5,4 kgf (3 lbs a 12 lbs) por cada brazo. Esta fuerza puede ser regulada en este rango de manera continua según el perfil anatómico del operario y la tarea específica a realizar. Según Van Engelhoven (2019), este dispositivo es capaz de reducir hasta el 80% de la actividad muscular del hombro.

En la Figura 3.2 se muestra el elemento de actuación donde se encuentra alojado el mecanismo de compensación de carga. Asimismo, se observa la ubicación de los puntos de ajuste para la regulación de la magnitud del torque o fuerza de asistencia; la regulación del ángulo para el cual se desarrolla el torque o fuerza máxima; y el *switch* para bloquear o desbloquear el mecanismo de actuación, el cual permite la transición hacia un estado de fuerza de compensación mínima, para que el operario realice actividades secundarias sin problemas [Van Engelhoven,2019].

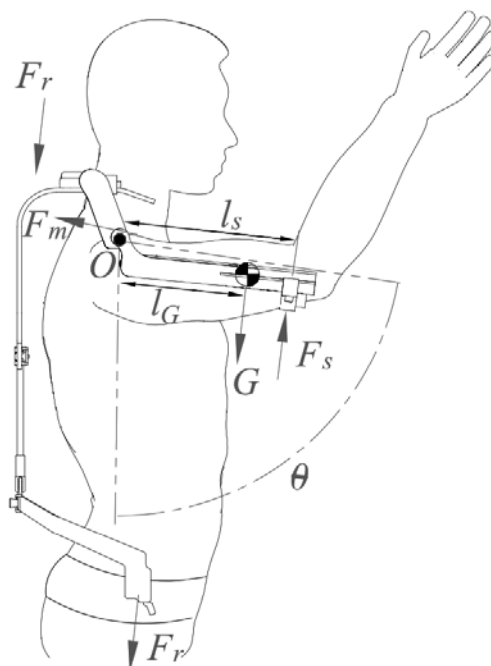
<sup>4</sup> Figura tomada de <https://www.suitx.com/shoulderx>



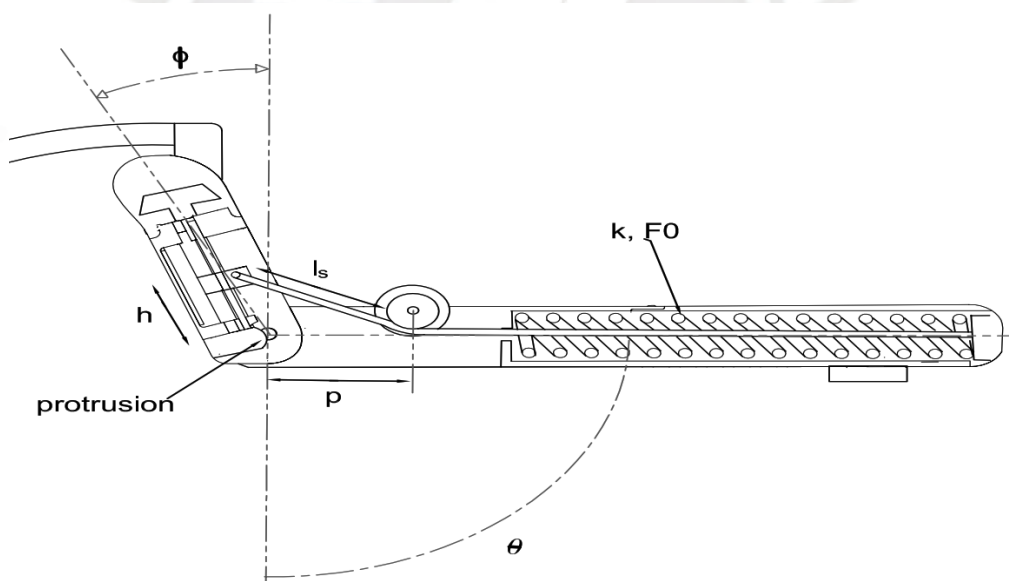
Fig. 3.2 Modelo 3D del elemento de actuación del ShoulderX v3 [Van Engelhoven,2019]

Este exoesqueleto propone un mecanismo de actuación basado en la conexión de resortes por medio de cables y poleas para generar la fuerza de compensación, como se observa en la Figura 3.3. El mecanismo incorpora unas modificaciones al mecanismo básico de compensación mostrado en la Figura 2.3 del Capítulo 2; con el fin de que no se tenga un perfil iso-elástico o de compensación completa, pues se requiere que el dispositivo entregue la fuerza de asistencia solo en un rango determinado del movimiento de flexo-extensión del hombro.

Por lo general, el esfuerzo en los grupos musculares del hombro (deltoides anterior y deltoides medio) se intensifica para mayores ángulos de flexión del hombro (alrededor de  $90^\circ$ ), por lo que el dispositivo busca proveer la fuerza de asistencia solo para ese arco de trabajo [Van Engelhoven,2019]. En otras palabras, cuando el ángulo de flexión es 0 grados, se busca que el torque de asistencia sea casi nulo y que no obstaculice los movimientos del usuario al bajar los brazos, para que este pueda realizar otras actividades como abducir los brazos sin dificultad; tomar cosas del suelo; meter las manos en los bolsillos del pantalón; etc.



(a) Diagrama de cuerpo libre del exoesqueleto



(b) Mecanismo de actuación basado en resortes, cables y poleas

Fig. 3.3 Configuración del mecanismo del ShoulderX v3 [Van Engelhoven,2019]

El torque de compensación generado por el mecanismo puede ser calculado a partir del análisis estático del diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 3.3 y el diagrama de cuerpo libre del mecanismo mostrado en la Figura 3.4. En este sentido, en la Figura 3.4 se observan esquemáticamente los parámetros geométricos del

mecanismo y las principales fuerzas actuantes. En primera instancia, el mecanismo propuesto por Van Engelhoven y Kazerooni (2019) incorpora un ángulo de desfase  $\phi$  (offset angle), como primera modificación respecto a la configuración básica mostrada en la Figura 2.3. Asimismo, otra modificación es la de agregar una fuerza de precarga al resorte  $F_0$  (resorte precargado a compresión), afectando la longitud inicial del resorte sin deformar  $l_{s0}$ , la cual debe ser cero para que se tenga una compensación completa de la carga o un perfil iso-elástico. En base a la configuración mostrada en la Figura 3.4, la Ecuación (3.1) [Van Engelhoven,2019] muestra la relación para calcular el torque de compensación  $T$ ; el cual dependerá de la constante de rigidez del resorte  $k$ , la longitud inicial del resorte sin deformar  $l_{s0}$ , la precarga del resorte  $F_0$ , el ángulo de elevación del brazo con respecto al eje vertical (ángulo de flexión)  $\theta$ , el ángulo de desfase o de rotación del mecanismo  $\phi$ , la distancia proximal  $h$ , y la distancia  $p$ .

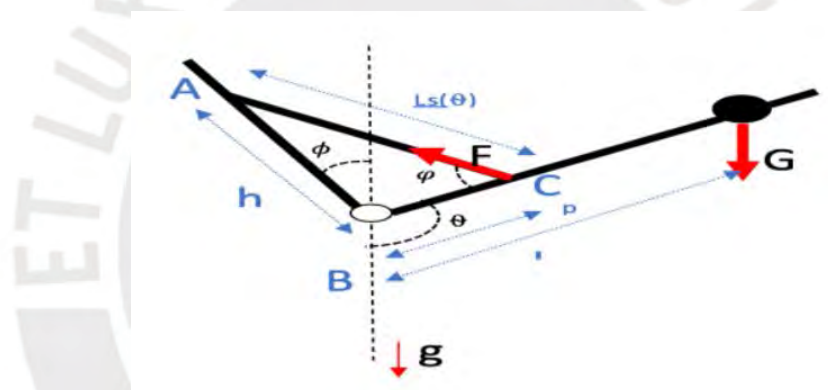


Fig. 3.4 Diagrama de cuerpo libre del mecanismo [Van Engelhoven,2019]

$$T = \frac{[k(\sqrt{h^2 + p^2 - 2hp \cos(180 - \theta - \phi)} - l_{s0}) + F_0]ph \sin(180 - \theta - \phi)}{\sqrt{h^2 + p^2 - 2hp \cos(180 - \theta - \phi)}} \quad (3.1)$$

En la parte izquierda de la Figura 3.5, se muestra la curva de torque iso-elástica o de compensación completa, y a la derecha se muestra la curva de torque modificada del mecanismo en estudio. El valor de la amplitud máxima del torque es definido por las condiciones antropométricas del operario, así como la carga manipulada por el mismo. Se observan dos zonas en la curva de torque modificada en las cuales el torque es cero: una zona para pequeños ángulos de flexión (Lower Zero-Torque Range) y una zona para grandes ángulos de flexión (Upper Zero-Torque Range).

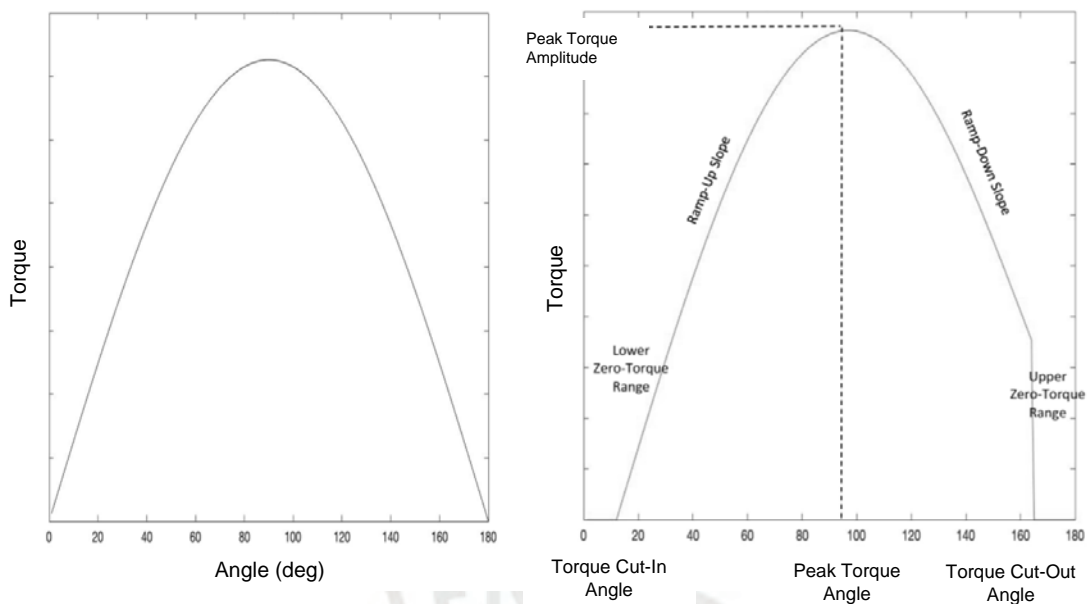


Fig. 3.5 Comparación entre curva de torque de compensación ideal y curva de torque modificada [Van Engelhoven,2019]

Con la finalidad de que el mecanismo logre el torque igual a cero para pequeños ángulos de flexión del hombro, se debe manipular la precarga del resorte  $F_0$  y longitud inicial del resorte sin deformar  $l_{s0}$ . Por otro lado, se muestra una caída abrupta del torque para grandes ángulos de flexión, la cual ha sido configurada, de manera opcional, por medio de un tope en el mecanismo (hard stop) para que el dispositivo pueda incorporar la capacidad del *switch* de bloqueo del mecanismo de actuación.

Asimismo, debido a estas modificaciones, es necesario realinear el ángulo de torque pico para que coincida con el rango de soporte requerido por el hombro. Esto se realiza mediante el ángulo de rotación o de desfase  $\emptyset$  aplicado al mecanismo. Sin embargo, al rotar el mecanismo, surge el inconveniente de que el torque resulte negativo para ángulos de flexión  $\theta$  menores a  $\emptyset$ . Este efecto sería contraproducente, pues en lugar de ayudar a levantar el brazo del operario, lo jalaría hacia abajo. Para solucionar este problema, el mecanismo incorpora una protrusión como se observa en la Figura 3.3 [Van Engelhoven,2019]. Por medio de estas estrategias es posible optimizar el perfil de la curva del mecanismo de actuación para que la entrega de torque se realice solo en el rango deseado.

El ángulo de torque máximo (Figura 3.6) se regula variando el ángulo de rotación  $\emptyset$ . En el mecanismo de actuación del ShoulderX v3, esto se realiza desajustando un

tornillo, el cual permite aflojar una abrazadera para así regular el ángulo  $\emptyset$ . Esta posición se puede regular en intervalos de  $5^\circ$  por el operario. Asimismo, este mecanismo ofrece un rango de  $60^\circ$  para ajustar el ángulo para el cual se requiere el torque pico, como se observa en la Figura 3.6.

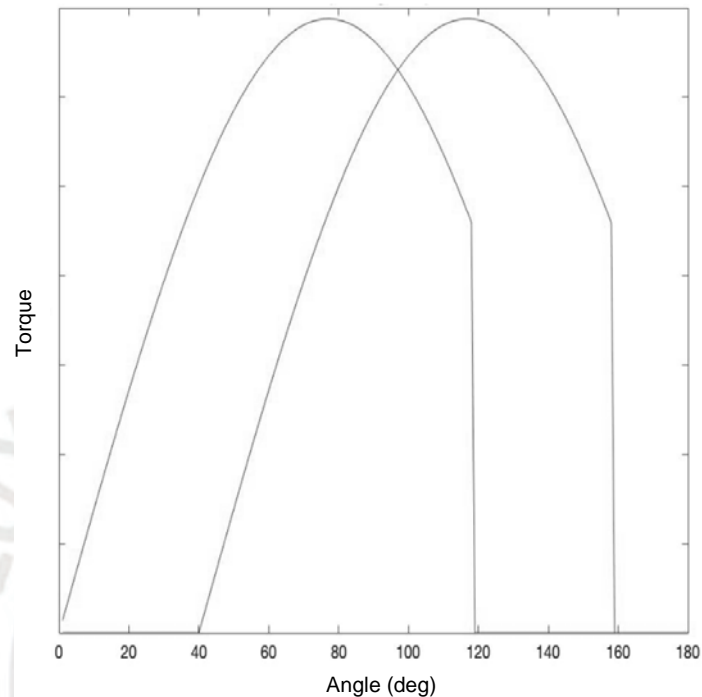


Fig. 3.6 Curvas de ajuste del ángulo de torque máximo [Van Engelhoven,2019]

Dependiendo de la carga manejada por el operario y las dimensiones antropométricas de su cuerpo, el mecanismo permite ajustar la fuerza de compensación para lograr las condiciones de operación deseadas. Para ello, se ajusta la distancia proximal  $h$  en el dispositivo de actuación, por medio del mecanismo de tipo corredera mostrado en la Figura 3.3. En este sentido, es posible incrementar el torque desde la configuración de torque de asistencia mínima a la configuración de torque de asistencia máxima en 150%. Estos valores de torque corresponden a la fuerza de asistencia mínima y máxima que ofrece el exoesqueleto respectivamente. En la Figura 3.7 se observan las curvas de respuesta al ajustar la máxima amplitud del torque de asistencia [Van Engelhoven,2019].



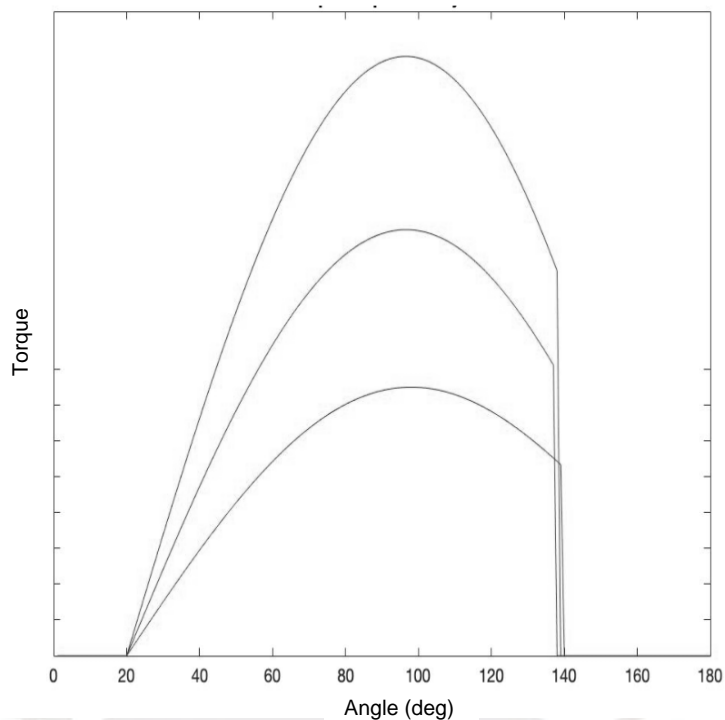


Fig. 3.7 Curvas de regulación del torque máximo de asistencia [Van Engelhoven, 2019]

Finalmente, el ShoulderX incorpora un mecanismo que le permite bloquear la fuerza de soporte generada por el acumulador de energía. Para ello, incorpora un *switch* que permite cambiar entre un estado de *on*, en el cual está activa la fuerza de asistencia, y un estado de *low*, en el cual se desactiva dicha fuerza y el torque de asistencia es mínimo como se observa en la Figura 3.8. Mecánicamente, esto se realiza utilizando un arreglo de dos resortes concéntricos en paralelo. En el modo de baja rigidez o *low*, solo actúa el resorte interno, el cual tienen una constante de rigidez pequeña. Cuando se cambia al modo de *on*, para activar la fuerza de compensación por medio de un acople que utiliza imanes, el otro resorte de mayor rigidez entra en funcionamiento para trabajar en paralelo con el resorte de menor rigidez. Para permitir esta transición es necesario incorporar el tope (*hard stop*) del cual se habló anteriormente, de manera que se liberen las fuerzas residuales en el mecanismo [Van Engelhoven, 2019].

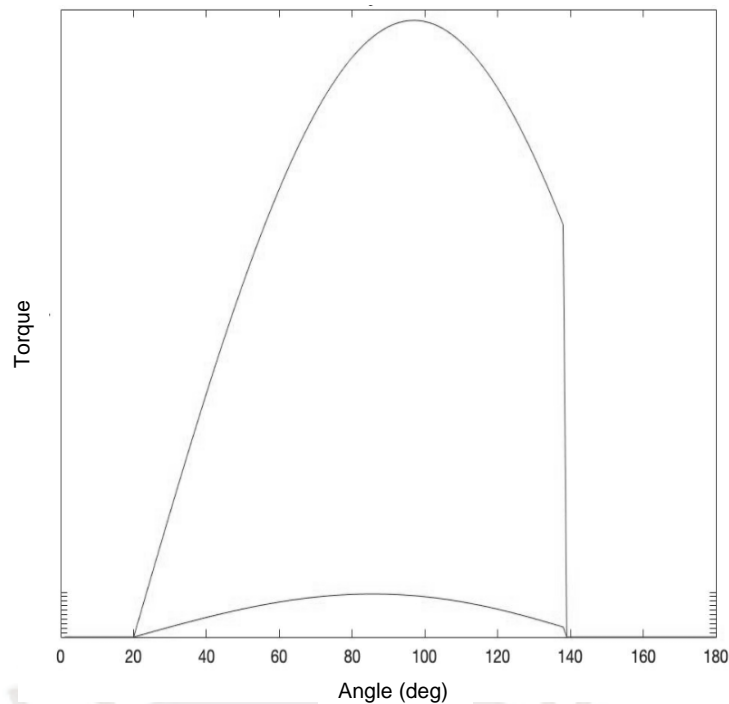


Fig. 3.8 Comparación de curvas del torque de compensación para el mecanismo activado (superior) y el mecanismo desactivado (inferior) [Van Engelhoven,2019]

La estructura del ShoulderX v3 ha sido desarrollada utilizando materiales ligeros como fibra de carbono y aluminio. Para el análisis del marco estructural del exoesqueleto, se tomará la propuesta de A. Voilqué (2019), la cual se basa en el análisis cinemático de mecanismos paralelos. En la Figura 3.9 se presenta el diagrama cinemático a la izquierda y el diagrama de conectividad a la derecha para el exoesqueleto en estudio. Estos diagramas son elaborados con el fin de entender la estructura del exoesqueleto y, posteriormente, calcular el indicador para medir la complejidad del mismo, propuesto por el estudio de A. Voilqué (2019).

En este sentido, es necesario entender la simbología utilizada. Las articulaciones son representadas por cilindros, prismas o esferas. En primer lugar, las articulaciones representadas por cilindros hacen referencia a una articulación de rotación, similar a una bisagra de un solo grado de libertad. En segundo lugar, las articulaciones representadas por prismas, hacen referencia a articulaciones prismáticas, las cuales indican un movimiento de solo traslación, similar a una corredera. En tercer lugar, las articulaciones representadas por esferas, hacen referencia a articulaciones esféricas o rótulas. En el diagrama de conectividad, las articulaciones rotativas, prismáticas y esféricas están representadas por las letras R, P y S respectivamente. Por otro lado, las

líneas rojas punteadas que conectan los distintos elementos del mecanismo, representan entre qué miembros de la estructura está presente el mecanismo de actuación o resorte. Finalmente, se representa a la zona en la cual se redistribuye la carga (en este caso la cadera) como el suelo o nivel de referencia [Voilqué,2019].

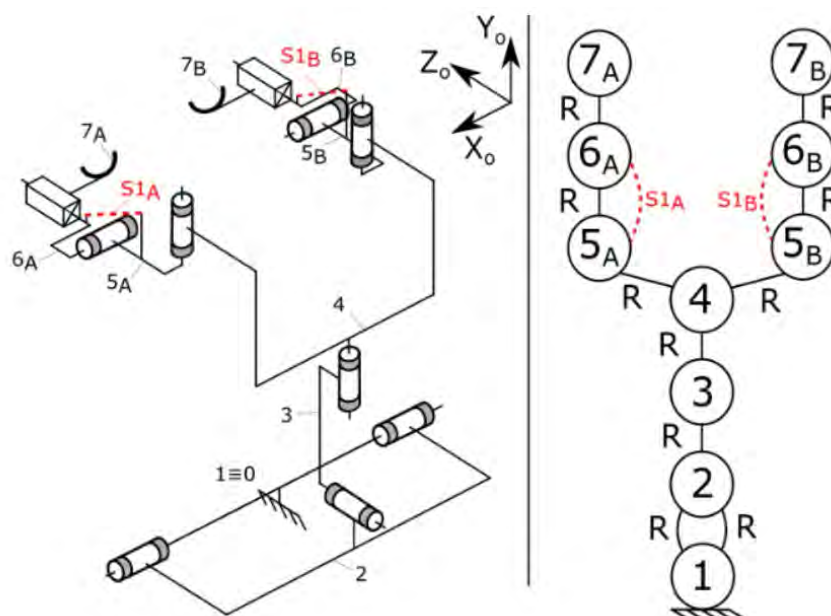


Fig. 3.9 Diagramas cinemático y de conectividad del ShoulderX [Voilqué,2019]

Asimismo, para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, es necesario contabilizar la cantidad de puntos de interacción con el cuerpo humano ( $N$ ), por ejemplo, la cadera, el tronco y los brazos; la cantidad de articulaciones del exoesqueleto ( $p$ ) en base al diagrama cinemático; y el número de mecanismos de actuación ( $a$ ). Para este exoesqueleto, los valores de dichos indicadores serían los siguientes:  $N=3$ ,  $p=10$ , y  $a=2$ . El indicador de complejidad  $C$  se calcula como el producto de  $N$ ,  $p$  y  $a$ . En este caso el indicador de complejidad es de 60, el cual es un valor intermedio en comparación a los demás exoesqueletos en el presente estudio [Voilqué,2019].

### 3.2 Skelex 360-XFR

El Skelex 360-XFR es otra propuesta de exoesqueleto industrial pasivo que minimiza la carga y la fatiga en los músculos del hombro al realizar actividades sobre cabeza por

tiempos prolongados. El exoesqueleto ha sido desarrollado por la empresa Skelex en Rotterdam, Holanda. Se han desarrollado varias versiones de este exoesqueleto, por lo que en este trabajo se analizará la última versión, el Skelex 360-XFR. La particularidad del Skelex es que los acumuladores de energía potencial por deformación del exoesqueleto forman parte de su marco estructural. En la Figura 3.10 se muestra la configuración del dispositivo de asistencia y la ubicación de los acumuladores de energía en el dorso del usuario.



Fig. 3.10 Exoesqueleto Skelex 360-XFR<sup>5</sup>

Los acumuladores de energía del Skelex son elementos curvos sometidos a flexión, análogos a los resortes de hoja de sección rectangular o muelles. El principio de funcionamiento del mecanismo es sencillo, y se basa en las técnicas de compensación de carga por medio de la conexión directa de resortes. En este caso, el resorte acumula energía potencial cuando el operario baja los brazos, de manera que el resorte cantiléver se flecta, para que luego, al alzar los brazos, se entregue la fuerza de compensación.

La curvatura del acumulador de energía ha sido diseñada para adaptarse al perfil antropométrico del ser humano, así como también para entregar los máximos valores de torque de asistencia en el rango requerido, el cual, usualmente es para mayores ángulos de flexión del hombro. El elemento de soporte del brazo actúa a manera de palanca debido a su perfil geométrico, así como también debido al punto de conexión del resorte de flexión. El mecanismo cuenta con un cable de acero que sirve para tensar

<sup>5</sup> Figura tomada de <https://www.skelex.com/>

el muelle del exoesqueleto, regulando de esta forma la precarga del resorte. Por consiguiente, el mecanismo logra una compensación completa de la carga, y el perfil del torque de asistencia es iso-elástico. La precarga del resorte se regula de manera continua mediante un mecanismo que gira un tornillo para tensar (o destensar) un cable conectado al acumulador de energía, y se ajusta en función de dos parámetros básicos: la carga que debe manipular el operario y el peso de sus brazos. De esta manera, se puede regular la fuerza de asistencia proporcionada por el mecanismo en el rango de 1 kgf hasta 4,9 kgf. El peso del Skelex es de 2,5 kg, con un marco estructural fabricado de aleación de aluminio 6061 y acero inoxidable AISI-SAE 304 [Skelex,2020]. Según un estudio realizado por F.J. van Geer (2016), el Skelex reduce la actividad muscular del hombro en un rango de 21% a 36% [Van Geer,2016].

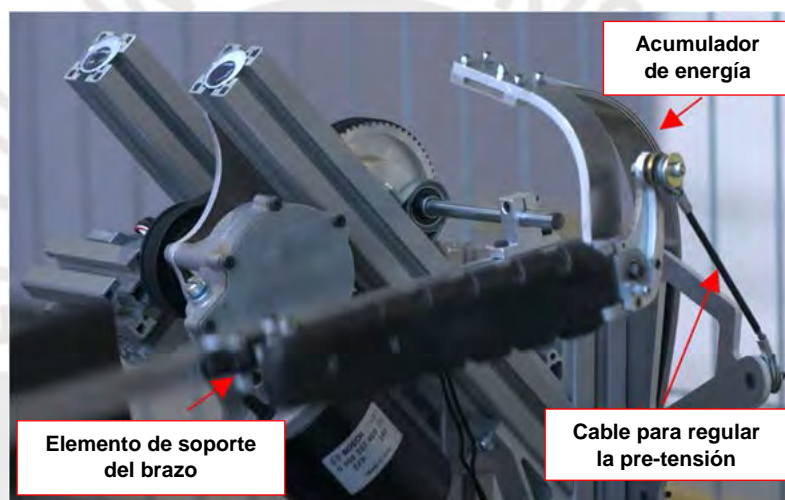


Fig. 3.11 Ensayo del mecanismo de actuación del exoesqueleto Skelex<sup>6</sup>

En la Figura 3.11, se observa al muelle del exoesqueleto pasando una prueba de resistencia mecánica, en donde la máquina de ensayos flexiona por varios ciclos al mecanismo. Según el Skelex (2020), el exoesqueleto es ensayado a fatiga para resistir alrededor de 1 000 000 de ciclos [Skelex,2020]. Asimismo, para aplicaciones como soldadura, Skelex ofrece recubrimientos del exoesqueleto a prueba de fuego, anti estático, entre otros; y cuenta con las siguientes certificaciones: EN ISO 11611, EN ISO 11612, EN ISO GB 8965.1, EN ISO 1149. Continuando con el análisis estructural propuesto por A. Voilqué (2019), en la Figura 3.12 se presenta el diagrama cinemático a la izquierda y el diagrama de conectividad a la derecha para el Skelex. Los resortes

<sup>6</sup> Figura tomada de <https://www.youtube.com/watch?v=hNVy3CDmx28>

de hoja del exoesqueleto están representados como S1A y S1B para ambos brazos del dispositivo. Dichos elementos también conforman la estructura del Skelex, siendo parte del elemento 1. Para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, los valores los parámetros de comparación son los siguientes:  $N=3$ ,  $p=10$ , y  $a=2$ , con lo que el indicador de complejidad para este exoesqueleto es de 60 [Voilqué,2019].

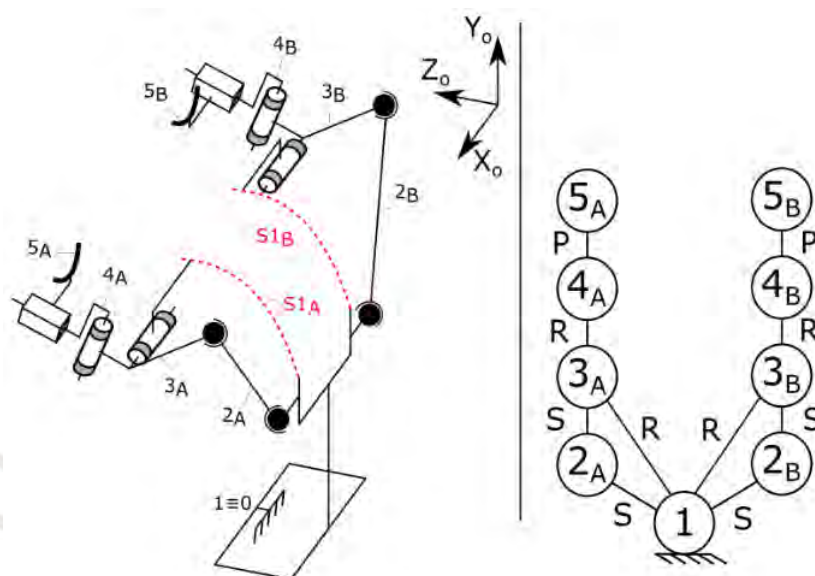


Fig. 3.12 Diagramas cinemático y de conectividad del ShoulderX [Voilqué,2019]

### 3.3 Airframe

Este exoesqueleto pasivo de miembros superiores desarrollado por la firma Levitate transfiere la carga de los hombros del operario hacia la zona lateral de la cadera, como se observa en la Figura 3.13. Su peso es 3,2 kg y está conformado por una estructura de aluminio. El Airframe tiene un mecanismo generador de la fuerza de asistencia con un principio de funcionamiento similar al ShoulderX. En este sentido, está basado en la técnica de compensación de carga que utiliza resortes conectados por medio de sistemas de cables y poleas. No obstante, a diferencia del ShoulderX, el Airframe ofrece actuación por resorte, acoplado a un sistema mecánico de polea y leva, dentro del módulo del brazo, como se observa en la Figura 3.14. La desventaja que presenta con respecto al ShoulderX, es que, para la regulación de la fuerza de compensación, es necesario intercambiar todo el módulo del brazo, también llamado “casete”. El exoesqueleto ofrece 6 “casetes” modulares intercambiables para incrementar la fuerza

de actuación del exoesqueleto según el requerimiento del usuario. Asimismo, ofrece un torque máximo de asistencia de 5,5 N.m para la sexta configuración.



Fig. 3.13 Exoesqueleto Airframe Levitate<sup>7</sup>

El mecanismo utilizado es similar al sistema mecánico de poleas no circulares de los arcos compuestos, el cual fue explicado en el Capítulo 2. En la Figura 3.14, se observa la conexión del resorte helicoidal por medio de un cable que pasa por una polea circular y termina conectando con la polea no circular o leva. La polea no circular gira solidariamente con otra polea que transmite, por medio de otro cable, la fuerza de compensación a la articulación del módulo del brazo, para finalmente levantar el brazo del operario.

Como se explicó en el capítulo anterior, mediante el diseño de la leva es posible configurar el perfil de la curva de torque de asistencia que ofrece el mecanismo. Asimismo, el Airframe Levitate ofrece la posibilidad de regular el ángulo de máximo torque dentro de un rango de 45°. Finalmente, el Airframe reduce la carga en los hombros del operario en un rango de 20% a 30% [Levitate Technologies,2020].

<sup>7</sup> <https://www.levitatetech.com/>

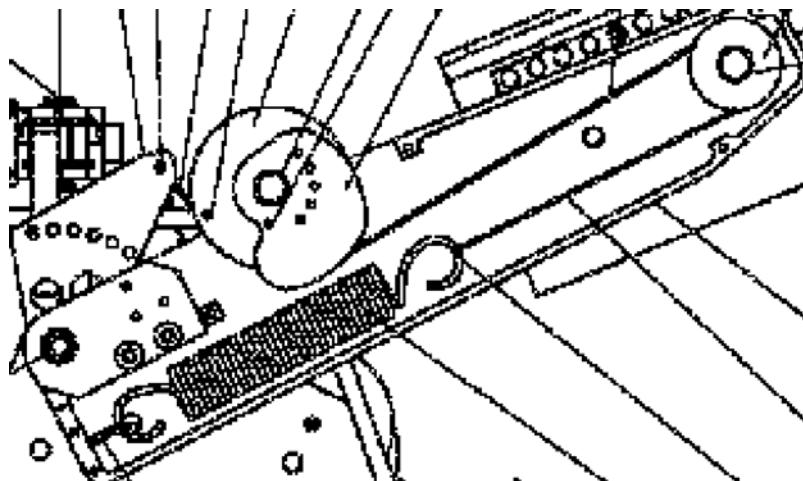


Fig. 3.14 Mecanismo del Airframe Levitate [Patente US9737374 B2,2017]

Continuando con el análisis estructural propuesto por A. Voilqué (2019), en la Figura 3.15 se presenta el diagrama cinemático a la izquierda y el diagrama de conectividad a la derecha para el Airframe Levitate. El exoesqueleto cuenta con articulaciones prismáticas para que los apoyos de los brazos deslicen libremente. Para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, los valores los parámetros de comparación son los siguientes:  $N=3$ ,  $p=8$ , y  $a=2$ , obteniéndose un indicador de complejidad del exoesqueleto de 48 [Voilqué,2019].

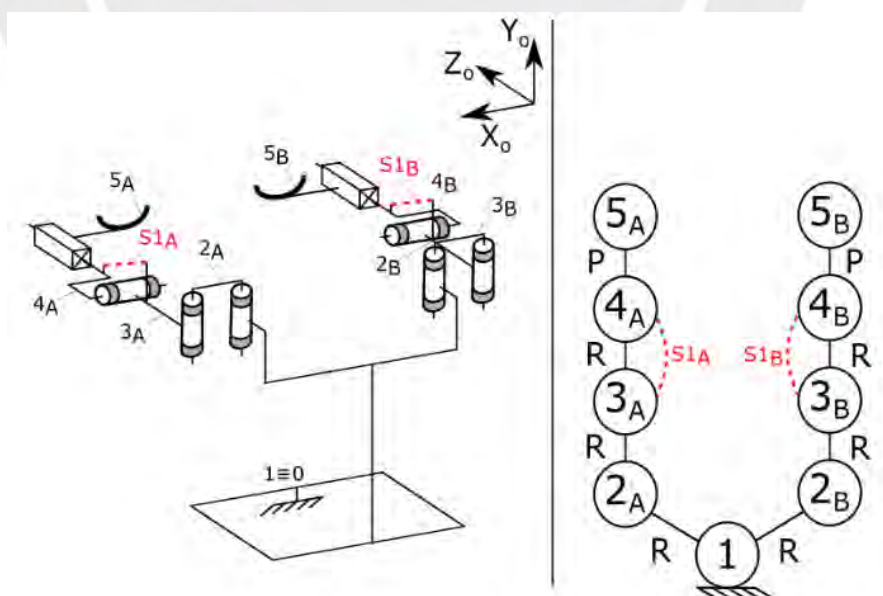


Fig. 3.15 Diagramas cinemático y de conectividad del Airframe [Voilqué,2019]



### 3.4 Mate

El Mate es un exoesqueleto industrial pasivo de soporte de hombro para realizar actividades sobre cabeza por tiempos prolongados. El exoesqueleto, comercializado por la compañía italiana COMAU, ha sido desarrollado en conjunto por las firmas IUVO y ÖSSUR. En la Figura 3.16 se muestran las vistas lateral y posterior del exoesqueleto. El marco estructural del exoesqueleto está fabricado en aluminio y los cobertores en fibra de vidrio. El peso del exoesqueleto es 4 kg. De manera particular, el Mate destaca por sus articulaciones prismáticas en el hombro, las cuales permiten que el exoesqueleto se ajuste de manera adecuada al perfil del hombro del operario. Asimismo, cuenta con la posibilidad de regular la fuerza de asistencia en 7 niveles, por medio de una perilla en el módulo del brazo. No obstante, no se puede regular el ángulo para el cual se tiene el torque máximo, el cual está configurado para un ángulo de flexión del hombro de  $90^\circ$  como se observa en la Figura 3.16.



Fig. 3.16 Exoesqueleto COMAU-Mate<sup>8</sup>

Este exoesqueleto cuenta con un sistema de bloqueo del mecanismo para que el operario pueda ponérselo o sacárselo con facilidad. El Mate ofrece dos tamaños de marco estructural, diseñados con el fin de satisfacer a operarios dentro de un rango de alturas entre 150 cm y 220 cm. El mecanismo de actuación del Comau-Mate tiene una configuración basada en la conexión de resortes por medio de sistemas de engranajes.

<sup>8</sup> <https://mate.comau.com/how-does-it-work/>

En la Figura 3.17, se observa un prototipo del Mate desarrollado por IUVO, en el cual se observa el mecanismo de actuación del brazo, conformado por tres resortes helicoidales en paralelo, los cuales están conectados a un sistema de engranajes que transmite el torque de compensación al punto de articulación del hombro.



Fig. 3.17 Mecanismo de actuación del exoesqueleto Mate [Giovacchini,2018]

La versión comercial del exoesqueleto incorpora un arreglo de solo 2 resortes en paralelo y es capaz de transmitir un torque de compensación de hasta 5,5 N.m para el cuarto nivel de asistencia del dispositivo. Finalmente, en un estudio realizado por I. Pacifico (2020), se determinó que el Mate reduce la actividad muscular del hombro en un rango de 30% a 43% [Pacifico,2020].

En relación al análisis estructural del exoesqueleto, en la Figura 3.18 se presenta el diagrama cinemático a la izquierda y el diagrama de conectividad a la derecha para el Mate. Para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, los valores los parámetros de comparación son los siguientes:  $N=3$ ,  $p=8$ , y  $a=2$ . Con estos valores el indicador de complejidad del exoesqueleto resulta 48 [Voilqué,2019].

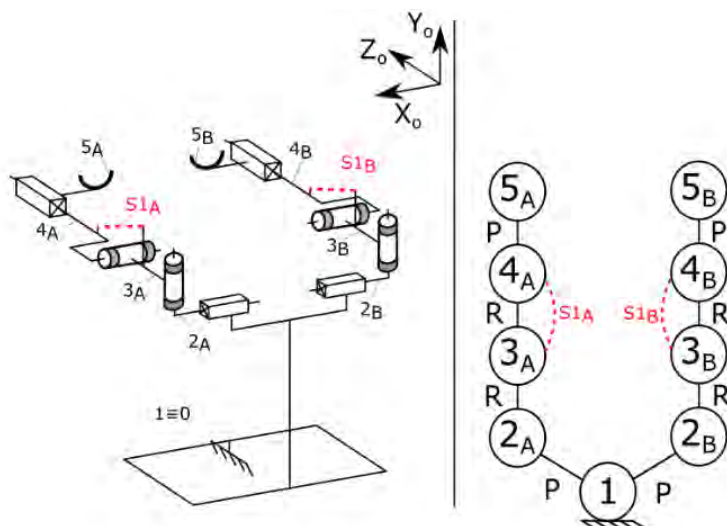


Fig. 3.18 Diagrama cinemático y diagrama de conectividad del Mate [Voilqué,2019]

### 3.5 Paexo

Paexo es un exoesqueleto pasivo de miembros superiores que proporciona una fuerza de asistencia a los brazos del operario y la transfiere hacia la zona de la pelvis a través de un cinturón en la cadera, como se observa en la Figura 3.19. Este exoesqueleto es desarrollado por la firma alemana Ottobock SE & Co. KGaA. Tiene un mecanismo de compensación de carga sencillo basado en la conexión de un resorte por medio de un cable al extremo de un brazo articulado.



Fig. 3.19 Exoesqueleto industrial Paexo [Maurice,2020]

El marco estructural del exoesqueleto está conformado por dos sistemas de actuación para cada brazo, independientes entre sí. Cada sistema consta de una barra de soporte y una barra de brazo que están conectadas a través de una articulación de tipo bisagra

(Punto C), similar a una palanca, como se observa en la Figura 3.20. El actuador pasivo, conformado por un resorte, genera el torque de asistencia en la articulación.

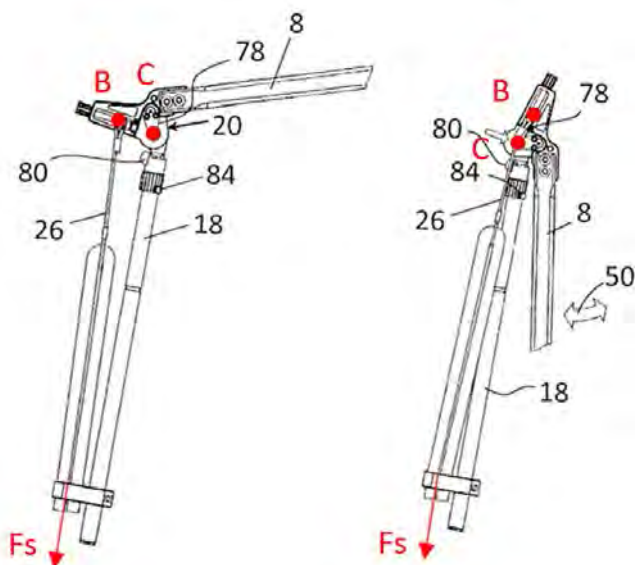


Fig. 3.20 Mecanismo del exoesqueleto Paexo [Patente US 20200038219A1,2020]

El cable está unido a un resorte en el extremo inferior de la barra de soporte. En este sentido, el resorte aplica una fuerza hacia abajo en el punto B, lo cual genera un torque de apoyo hacia arriba en la junta pasiva (punto C), como se observa en la Figura 3.20. La distancia BC es el brazo de palanca que define el torque de asistencia generado por el mecanismo. Esta distancia se ajusta mediante un mecanismo que gira a un tornillo de traslación para así regular la fuerza de compensación, tal como se muestra en la Figura 3.21. Asimismo, en la Figura 3.21 se observa al elemento (78), el cual crea una saliente o protuberancia; de manera que, el cable queda apoyado en este elemento, y la fuerza del resorte no es transmitida cuando el ángulo de flexión del hombro es cero (o cercano a cero). De esta forma, el operario puede bajar sus brazos sin dificultad y realizar actividades secundarias sin que el dispositivo obstaculice sus movimientos; solo sentirá la fuerza de compensación del mecanismo al pasar cierto ángulo de flexión.

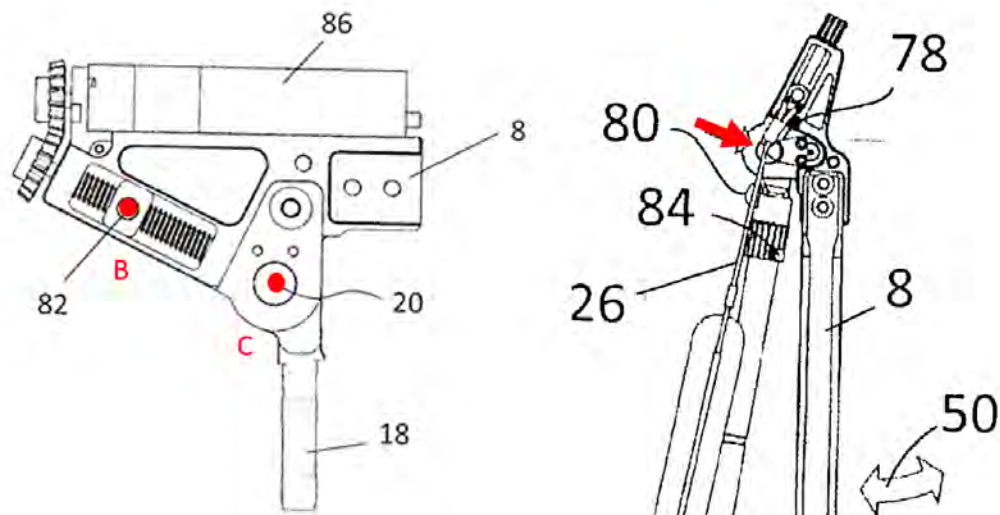


Fig. 3.21 Detalles constructivos del mecanismo de compensación de carga del exoesqueleto Paexo [Patente US 20200038219A1,2020]

Por otro lado, cada barra de soporte se conecta al cinturón de la cadera por medio de una conexión de tipo esférica o rótula. Toda la estructura es ajustable para adaptarse a diferentes tamaños de cuerpo; variando la longitud de la barra de soporte y el ancho del cinturón de cadera. El arnés similar a una mochila, el cual consta de correas unidas al cinturón de cadera, mantiene la estructura de soporte cerca del cuerpo y permite que se mueva de manera comparable al omóplato del usuario. El resultado es un movimiento libre del tronco y extremidades superiores, sin elementos rígidos en la espalda.

La simplicidad del mecanismo permite que este exoesqueleto tenga un peso de solo 2 kg. No obstante, el mecanismo no tiene la posibilidad de regular el ángulo para el cual se tiene el torque máximo, el cual será para un ángulo de flexión del hombro de  $90^\circ$ . Además, el mecanismo no tiene ningún seguro o sistema de bloqueo, por lo que el operador debe ser cuidadoso al quitarse el dispositivo, ya que la tensión remanente podría ocasionar que la barra del brazo se mueva rápidamente y ocasione una lesión. Finalmente, según el estudio realizado por Maurice (2020), el exoesqueleto Paexo reduce hasta en un 55% la carga soportada por los hombros durante operación [Maurice,2020].

En relación al análisis estructural del exoesqueleto, en la Figura 3.22 se muestra el diagrama cinemático a la izquierda y el diagrama de conectividad a la derecha para el

exoesqueleto Paexo. Asimismo, Paexo utiliza un menor número de nodos en comparación con los demás exoesqueletos del presente estudio, y permite mayor movilidad para el centro de rotación del hombro. Para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, los valores los parámetros de comparación son los siguientes:  $N=3$ ,  $p=6$ , y  $a=2$ . Por lo tanto, para este exoesqueleto, se tiene el menor valor para el indicador de complejidad estructural, el cual es de 36 [Voilqué,2019].

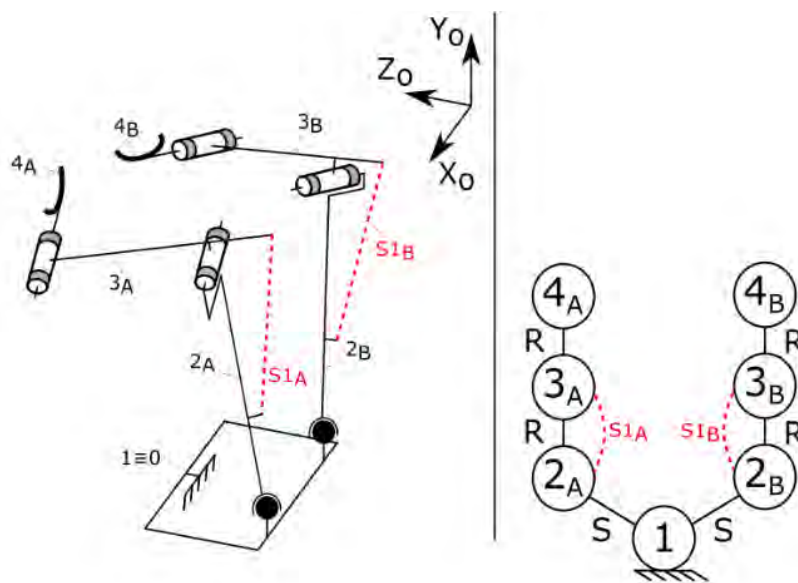


Fig. 3.22 Diagrama cinemático y diagrama de conectividad de Paexo [Voilqué,2019]

### 3.6 Hyundai H-VEX

El Hyundai H-VEX es un nuevo exoesqueleto industrial de miembros superiores de actuación pasiva, desarrollado por la división de investigación y desarrollo de Hyundai Motor Group. El mecanismo generador del torque de asistencia está basado en la técnica de compensación de carga por medio de la conexión de resortes mediante elementos rígidos auxiliares. La estructura principal de este exoesqueleto está elaborada de fibra de carbono, lo cual le permite tener un peso de solo 2.5 kg. Asimismo, el exoesqueleto permite regular el tubo de soporte dorsal en un rango de 90 mm, así como también permite variar la posición del soporte de brazos en un rango de 30 mm, para así ajustarse a la mayoría de perfiles antropométricos. Asimismo, cuenta con un soporte de cuello para mejorar la ergonomía. De manera similar a los demás

exoesqueletos de esta categoría, el H-VEX distribuye la carga de los brazos en la zona de la cadera por medio de un cinturón, como se observa en la Figura 3.23 [Hyun,2019].



Fig. 3.23 Exoesqueleto Hyundai H-VEX [Hyun,2019]

Este exoesqueleto tiene 2 características particulares: el mecanismo de actuación que genera el torque de compensación basado en un sistema de conexiones múltiples (multi-linkage passive mechanism); y el mecanismo policéntrico del hombro diseñado para alinear el exoesqueleto con el movimiento natural del hombro del operario. A continuación, se desarrollarán dichos conceptos.

En la Figura 3.24 se observa el mecanismo pasivo acumulador de energía propuesto por Dong Jin Hyun (2019) para el desarrollo del H-VEX. El mecanismo consiste en una serie de barras, conexiones y resortes; en donde se tienen puntos de conexión fijos a la carcasa (puntos de color gris), como también otras conexiones flotantes o libres (puntos de color verde), cuyo movimiento estará constreñido a las restricciones del mecanismo y el espacio dentro de la carcasa del módulo del brazo del exoesqueleto. Asimismo, las flechas de rotación en azul indican que, en esos puntos, los elementos pueden pivotar libremente con respecto a la carcasa. El mecanismo incorpora un set de 3 resortes en paralelo para aumentar la energía potencial almacenada por el mecanismo y con ello el torque de asistencia que este puede brindar.

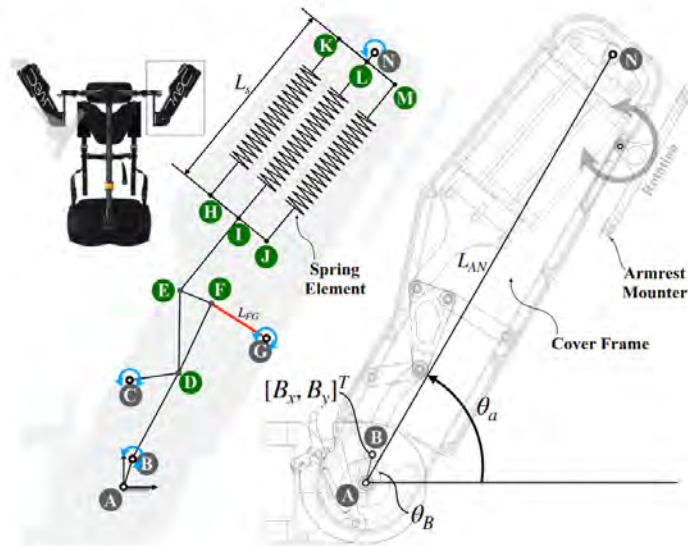


Fig. 3.24 Mecanismo de conexiones múltiples del Hyundai H-VEX [ Hyun,2019]

$$E_p = \frac{1}{2} K(L_s(\theta_a) - L_0)^2 + F_0(L_s(\theta_a) - L_0) \quad (3.2)$$

$$T = -\frac{dE_p}{d\theta_a} = -(K(L_s(\theta_a) - L_0) + F_0) \frac{dL_s(\theta_a)}{d\theta_a} \quad (3.3)$$

En base a un análisis energético, es posible determinar el torque de compensación del mecanismo derivando la energía potencial del sistema, como se muestra en las Ecuaciones 3.2 y 3.3. En ese sentido, la energía potencial del sistema  $E_p$  dependerá de la suma de las constantes de rigidez de los resortes  $K$ ; la longitud de los resortes deformados  $L_s(\theta_a)$ , la cual a su vez depende del ángulo de flexión  $\theta_a$  y la geometría del mecanismo; la longitud inicial de los resortes sin deformar  $L_0$ ; y la precarga de los resortes  $F_0$ . Cabe mencionar que la longitud  $L_s(\theta_a)$  es la misma para los 3 resortes puesto que están en paralelo y se deforman por igual. Asimismo, el torque de compensación también dependerá de dichos parámetros. Luego, en base a la Ecuación 3.3, y por medio del ajuste de los parámetros del diseño mecánico como las posiciones de las conexiones de los elementos, es posible tener distintos perfiles de torque de asistencia para satisfacer los requerimientos de diseño [ Hyun,2019], como se muestra en la Figura 3.25.



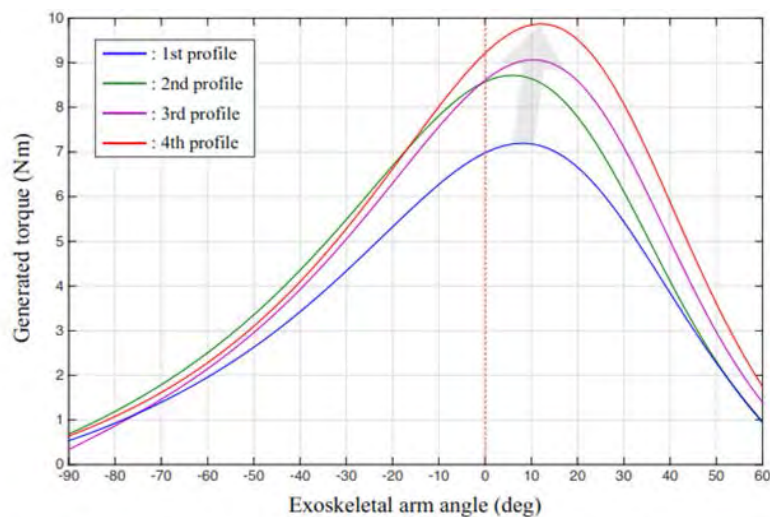


Fig. 3.25 Perfiles de torque del exoesqueleto H-VEX [ Hyun,2019]

Con el objetivo de modificar la curva del torque de compensación del mecanismo, principalmente se varían dos parámetros geométricos: la posición del punto B y la longitud del elemento FG (Figura 3.24). La magnitud del vector posición al punto B afectará la amplitud del torque de compensación generado por el mecanismo, tal como se muestra en la Figura 3.25. Además, la variación del ángulo de fase  $\theta_B$  (Figura 3.24) ocasionará la traslación de la curva del torque de compensación, de manera que variará el ángulo para el cual se desarrolla el torque máximo. El módulo de brazo del H-VEX incorpora un mecanismo con un seguro y un resorte auxiliar que modifica la posición del punto B, incorporando diferentes rangos de trabajo para el exoesqueleto. Dicho mecanismo se muestra en la Figura 3.26, donde se observan las 3 posiciones para los 3 rangos de trabajo que ofrece el exoesqueleto. En la configuración estándar, el exoesqueleto trabaja en un arco de flexión de  $0^\circ$  a  $150^\circ$ . No obstante, por medio de este mecanismo, es posible aumentar o disminuir este rango en  $10^\circ$ . Por otro lado, aumentar la longitud del elemento FG incrementará la amplitud del torque de compensación. En las etapas de prueba del exoesqueleto, se configuraron dichos parámetros para obtener el perfil deseado [Hyun,2019].

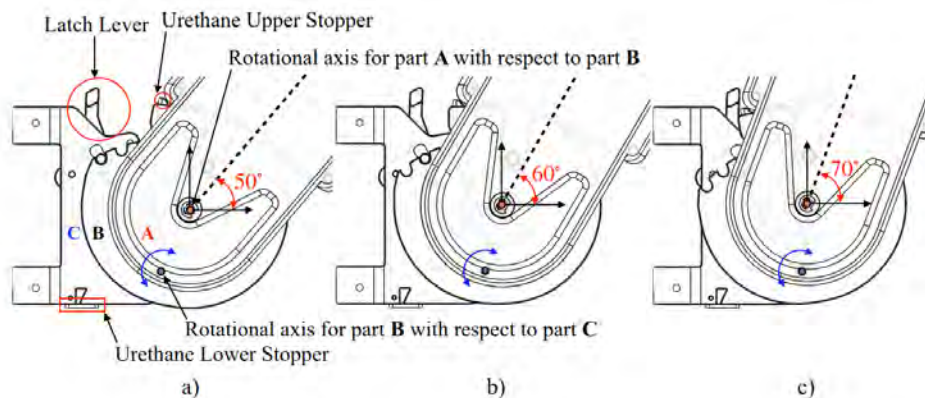


Fig. 3.26 Mecanismo de ajuste manual de tres niveles para variar el rango del torque de asistencia proporcionado por H-VEX [ Hyun,2019]

Otra característica importante de este exoesqueleto es el desarrollo del mecanismo para la articulación del hombro, el cual consta de un sistema de cuatro barras policéntricas, que permiten la correcta alineación del exoesqueleto con respecto al movimiento del hombro humano en el plano transversal (Figura 3.27). La Figura 3.27 (a) muestra el complejo articular del hombro, en el cual se aprecia la trayectoria de la articulación glenohumeral en el plano transversal o coronario del operario. Por otro lado, en la Figura 3.27 (b) se observa la superposición de la trayectoria de la articulación del hombro del H-VEX sobre la trayectoria anatómica en el plano transversal. La geometría de cuatro barras policéntricas permite que el centro instantáneo de rotación del mecanismo (CIR) coincida con el punto de cruce de las barras. En ese sentido, mediante la medición experimental de la trayectoria del hombro, se ajustó la geometría del mecanismo en estudio para que coincida con dicha trayectoria [Hyun,2019].

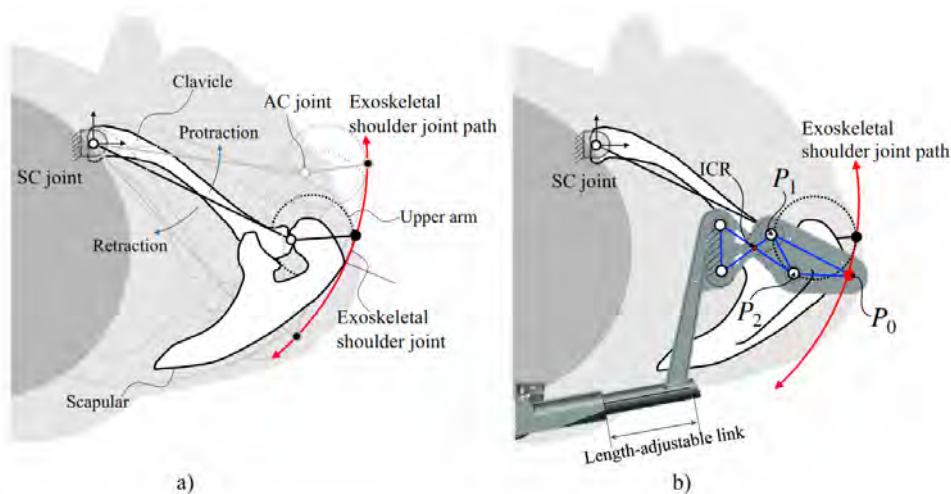


Fig. 3.27 Mecanismo del hombro para el H-VEX [Hyun,2019]

Según Hyundai, el exoesqueleto es capaz de generar una fuerza de asistencia máxima de 5,5 kgf por brazo así como un torque de asistencia de aproximadamente 6,5 N.m. Asimismo, según el estudio realizado por Dong Jin Hyun (2019), el Hyundai H-VEX reduce la actividad muscular del hombro (deltoides anterior y deltoides medio) en un rango entre 31% y 34% [ Hyun,2019].

En relación al análisis estructural del exoesqueleto, se desarrolló el diagrama cinemático, así como también el diagrama de conectividad para el exoesqueleto Hyundai H-VEX (Figura 3.28), de manera análoga a los esquemas realizados por A. Voilqué (2019). Las barras correspondientes al mecanismo policéntrico del hombro están representadas por los elementos 3.1A, 3.2A, 3.1B, 3.2B para cada brazo respectivamente. Para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, los valores los parámetros de comparación son los siguientes:  $N=3$ ,  $p=13$ , y  $a=2$ . Asimismo, para este exoesqueleto,  $C$  tiene un valor de 78. En comparación a los demás exoesqueletos, el valor del indicador de complejidad estructural del H-VEX  $C$  es alto. Esto se debe en particular al diseño de la articulación policéntrica de 4 barras cruzadas, pues incrementa el número de puntos articulables considerablemente.

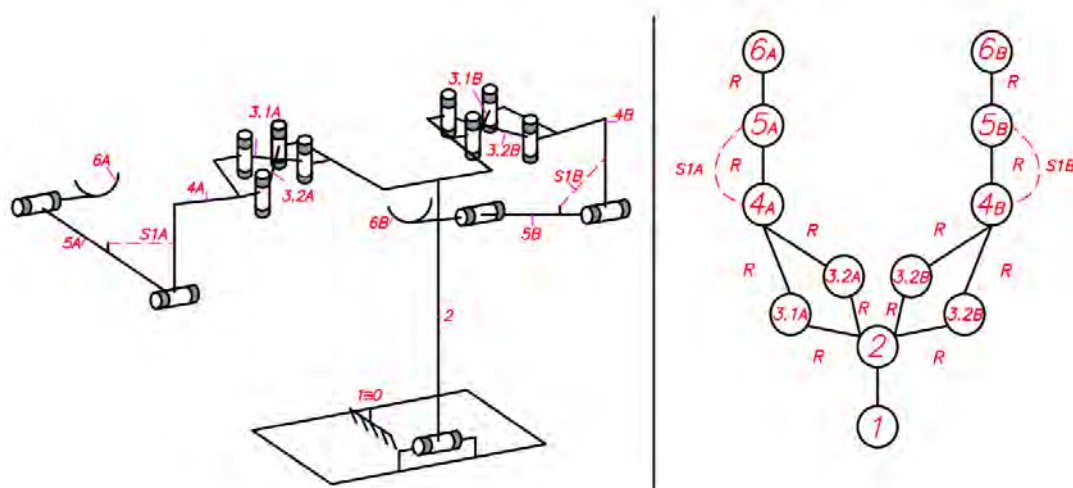


Fig. 3.28 Diagrama cinemático y diagrama de conectividad de H-VEX

### 3.7 Ekso-Vest

El Ekso-Vest es un exoesqueleto pasivo de miembros superiores desarrollado por la firma Ekso Bionics, el cual provee un torque de asistencia variable dependiendo del ángulo de flexo-extensión que ejerza el operario (Figura 3.29).



Fig. 3.29 Exoesqueleto Ekso-Vest<sup>9</sup>

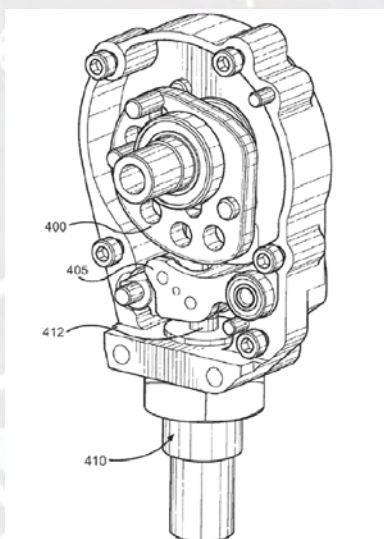


Fig. 3.30 Mecanismo de actuación del Ekso-Vest [Patente US 20180361565A1,2018]

Al igual que los exoesqueletos pasivos antes mencionados, busca reducir la carga en los músculos del hombro y distribuirla en las zonas de la cadera y espalda del operario. El Ekso-Vest está basado en las técnicas de compensación de carga por medio de sistemas de levas y resortes. Su mecanismo de actuación (Figura 3.30) es mediante un resorte de gas (410) (cilindro con gas presurizado), una leva (400) y un seguidor de la leva (405).

<sup>9</sup> Figura tomada de <https://www.telegraph.co.uk/technology/2019/01/02/bob-bionic-builder-4000-exosuits-trialled-construction-workers/>

El resorte de gas sirve como un acumulador de energía potencial y trabaja de manera análoga a un resorte a compresión. El acumulador de energía está conectado a un vástago, el cual, en su otro extremo, tiene un perfil (seguidor) que hace contacto con la leva del mecanismo. Al rotar el hombro, también rota el perfil de la leva, de manera que se realiza la entrega del torque de asistencia de manera progresiva. En base a este perfil, para determinada flexo-extensión del hombro del operario, se tendrá el torque de asistencia máximo proporcionado por el actuador, el cual está alrededor de los  $90^\circ$ . Este exoesqueleto ofrece la posibilidad de intercambiar los resortes de gas de manera práctica a manera de cartuchos, los cuales generan una fuerza de compensación de hasta 6,8 kgf o 15 lbs. El Ekso-Vest dispone de 4 cartuchos intercambiables para ajustar la fuerza de asistencia según la carga que se requiera manejar. El peso de este exoesqueleto es 4,3 kg, y su marco estructural está elaborado de fibra de carbono y aluminio.

En relación al análisis estructural del exoesqueleto, se desarrolló el diagrama cinemático, así como también el diagrama de conectividad para el exoesqueleto Ekso-Vest (Figura 3.31), de manera análoga a los esquemas realizados por A. Voilqué (2019). Para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, los valores los parámetros de comparación son los siguientes:  $N=3$ ,  $p=10$ , y  $a=2$ . Asimismo, para este exoesqueleto,  $C$  tiene un valor de 60.

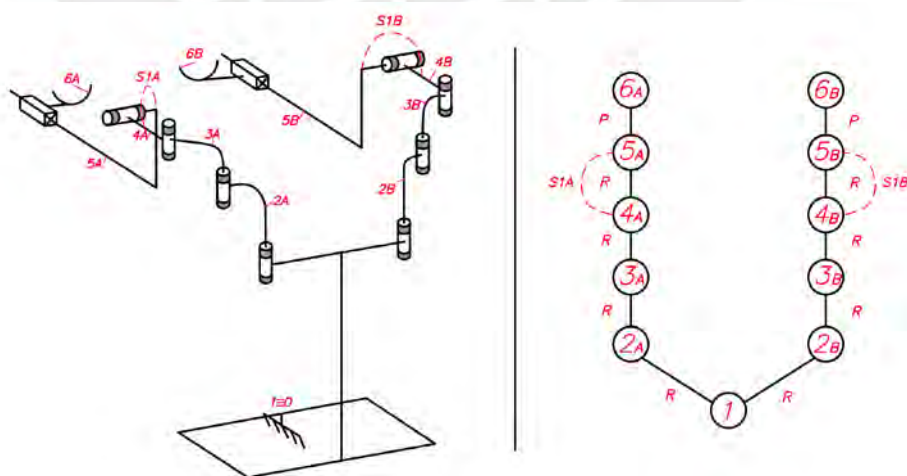


Fig. 3.31 Diagrama cinemático y diagrama de conectividad del Ekso-Vest

### 3.8 Robo-Mate Passive Arms

El Robo-Mate Passive-Arms es un exoesqueleto industrial pasivo que incorpora dos brazos con sistemas de compensación de carga con geometría de paralelogramos, con el fin de que el operario pueda manipular una carga determinada sin dificultad y por un tiempo prolongado. El exoesqueleto ha sido un proyecto en el cual han participado diversas entidades europeas. Sin embargo, el desarrollo del exoesqueleto ha sido principalmente por la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich. En la Figura 3.32 se observa el prototipo del exoesqueleto en estudio.



Fig. 3.32 Exoesqueleto Robo-Mate Passive Arms<sup>10</sup>

A diferencia de los demás exoesqueletos en el presente estudio, el Robo-Mate proporciona una fuerza de compensación para actividades en las cuales el ángulo de flexión puede ser pequeño. En ese sentido, los puntos en donde se colocan los mecanismos de actuación no son en el brazo, sino el antebrazo del operario. Cada brazo es capaz de proveer al usuario una fuerza de asistencia de hasta 7,5 kgf por cada brazo, por lo que es el exoesqueleto pasivo que permite levantar la mayor carga dentro de este estudio comparativo. No obstante, también es el más pesado, ya que pesa cerca de 7,4 kg. Por otro lado, el dispositivo cuenta con cuatro mecanismos de compensación de carga, los cuales tienen la forma de un paralelogramo (Figura 3.33). Este exoesqueleto está basado en las técnicas de compensación de carga por medio de la conexión de resortes a través de elementos rígidos auxiliares. Por medio de un análisis estático y sumatoria de momentos en el punto O, es posible determinar la magnitud de la fuerza de compensación  $F_z$  generada por el mecanismo, obteniéndose la Ecuación

<sup>10</sup> Figura tomada de <https://www.nextbigfuture.com/2017/03/robomate-exoskeleton-will-make-it-ten.html>

(3.4), en dónde  $F_c$  es la fuerza generada por el resorte. La fuerza del resorte puede ser calculada como la constante de rigidez multiplicada por la deformación del resorte, considerando un comportamiento ideal. No obstante, no considerar el comportamiento de un real de un resorte podría resultar en un error entre 3% a 8% [Altenburger,2016].

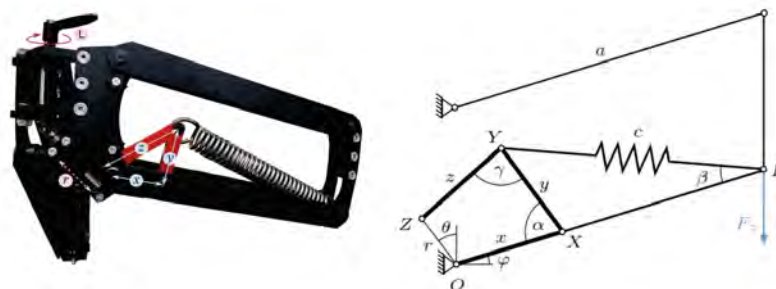


Fig. 3.33 Mecanismo de actuación del Robo-Mate [Altenburger,2016]

$$F_z = F_c \left[ \frac{\sin(\beta)}{\cos(\varphi)} - \frac{x \sin(\gamma + \alpha - \beta) \sin(\alpha)}{a \sin(\gamma) \cos(\varphi)} \right] \quad (3.4)$$

En relación al análisis estructural del exoesqueleto, se desarrolló el diagrama cinemático, así como también el diagrama de conectividad para el Robo-Mate (Figura 3.34), de manera análoga a los esquemas realizados por A. Voilqué (2019). Para el cálculo del indicador de complejidad del exoesqueleto, los valores los parámetros de comparación son los siguientes:  $N=3$ ,  $p=22$ , y  $a=4$ . Asimismo, para este exoesqueleto,  $C$  tiene un valor de 264. Se observa un drástico incremento en la complejidad del dispositivo.

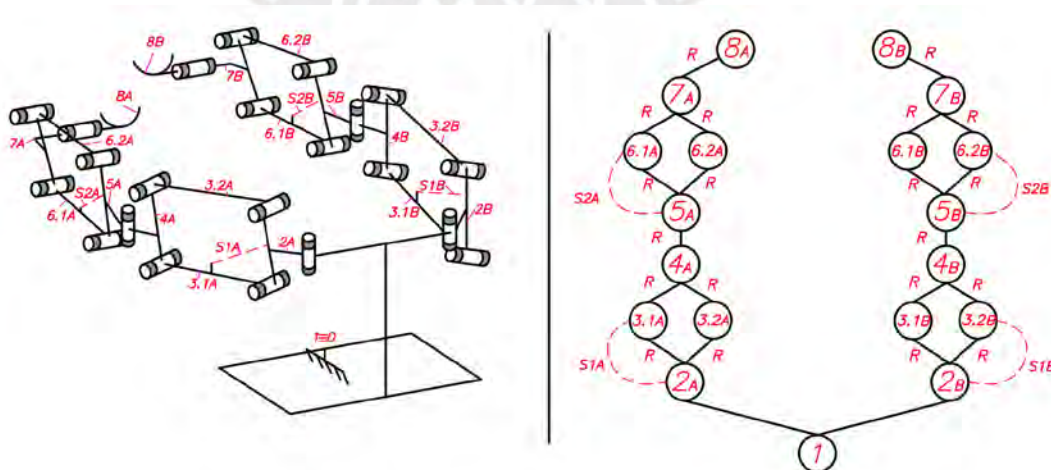


Fig. 3.34 Diagrama cinemático y diagrama de conectividad del Robo-Mate

### 3.9 Tablas resumen

En esta sección se presentan, a manera de resumen, las principales características de los exoesqueletos en estudio con el fin de comparar las prestaciones de cada uno. En este sentido, en las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran los parámetros generales de los exoesqueletos. Por ejemplo, se propone valorar a los exoesqueletos en cuanto a su relación de fuerza máxima/peso y su versatilidad en función de las posibilidades de regulación ofrecidas (regulación de la fuerza de asistencia, opciones de ajuste y capacidad de bloqueo del mecanismo de actuación). También se indican las técnicas de compensación de carga en las cuales se fundamentan los dispositivos. Finalmente se detallan algunas de sus prestaciones comerciales (fabricante, dimensiones, tallas y rango de altura), así como también los materiales empleados en su manufactura.

Tabla 3.1 Principales exoesqueletos de miembros superiores con actuación pasiva – parámetros generales (parte 1)

Exoesqueleto	Desarrollador / Fabricante	Dimensiones (mm)	Rango de altura del operario	Tallas disponibles	Reducción (%) de carga soportada en hombros durante operación*	Máxima fuerza de asistencia por brazo (kgf)	Máxima fuerza de asistencia total Fmáx. (kgf)
Shoulder X	US Bionics Inc.	No precisa**	de 5% a 95% de la altura promedio de un ser humano	talla única	24% a 80%	5,4	10,8
Skelex 360-XFR	Skelex	Longitud:800 Ancho: 380 Altura: 180	160 cm a 220 cm	talla única (ofrece 3 tallas de abrazaderas para soporte de los brazo)	21% a 36%	4,9	9,8
Airframe	Levitare Technologies Inc.	No precisa**	No precisa**	4 tallas	20% a 30%	No precisa**	No precisa**
Mate	Comau	No precisa**	150 cm a 220 cm	2 tallas (S, L)	30% a 43%	No precisa**	No precisa**
Paexo	Ottobock SE & Co	Longitud:850 Ancho:400 Altura:200	160 cm a 190 cm	talla única	Hasta 55%	No precisa**	No precisa**
H-VEX	Hyundai Motor Group (R.&D. Division)	No precisa**	No precisa**	talla única	31% a 43%	5,5	11,0
EksoVest	Ekso Bionics	No precisa**	130 cm a 204 cm	2 tallas	Hasta 28%	6,8	13,6
Robo-mate	Zurich University of Applied Science	No precisa**	No precisa**	talla única	Hasta 50%	7,5	15,0

\* Porcentajes basados en mediciones experimentales sobre la reducción porcentual de la actividad muscular de los grupos musculares del hombro (deltoides anterior y medio) al incorporar los dispositivos de tipo exoesqueleto

\*\* Información no divulgada de manera comercial por el fabricante



Tabla 3.2 Principales exoesqueletos de miembros superiores con actuación pasiva – parámetros generales (parte 2)

Exoesqueleto	Regulación de la fuerza de asistencia	Ergonomía: opciones de ajuste	Capacidad de bloqueo para el mecanismo de actuación	Peso (kg)	Relación Fmáx./peso	Materiales del marco estructural del exoesqueleto	Técnica de compensación del mecanismo
Shoulder X	Regulación continua	Regulación del ángulo de torque máximo en un rango de 60° (en intervalos de 5°) de 70° a 130° de ángulo de flexión del brazo	Si	3,2	3,38	Fibra de carbono y Aluminio	Compensación basada en la conexión de resortes por medio de cables y poleas
Skelex 360-XFR	Regulación continua (de 1 a 4,9 kg)	No cuenta con mecanismo regulación del ángulo de flexo-extensión para el cual se desarrolla el torque máximo	No	2,5	3,92	Aluminio 6061 Acero inoxidable 304	Compensación basada en la conexión directa de resortes
Airframe	Regulación discreta (6 cassettes modulares intercambiables)	Regulación del ángulo de torque máximo en un rango de 45°	Si	3,2	-	Aluminio	Compensación basada en la conexión de resortes por medio de cables y poleas (polea no circular)
Mate	Regulación discreta (7 niveles de asistencia)	No cuenta con mecanismo regulación del ángulo de flexo-extensión para el cual se desarrolla el torque máximo (90°)	Si	4,0	-	Aluminio (estructura) y cubiertas de fibra de vidrio	Compensación basada en sistemas de engranajes y resortes
Paexo	Regulación continua	No cuenta con mecanismo regulación del ángulo de flexo-extensión para el cual se desarrolla el torque máximo (90°)	No	2,0	-	Aluminio	Compensación basada en la conexión de resortes por medio de cables
H-VEX	Regulación discreta (6 niveles de asistencia)	3 niveles de regulación para máximos ángulos de flexión de 140°, 150°, 160°	Si	2,5	4,40	Fibra de carbono y Aluminio	Compensación basada en la conexión de resortes por medio de elementos rígidos auxiliares
EksoVest	Regulación discreta (set de 4 resortes de gas intercambiables)	3 niveles de regulación para máximos ángulos de flexión de 105°, 115°, 125°	Si	4,3	3,16	Fibra de carbono y Aluminio	Compensación basada en sistemas de levas y resortes (leva y seguidor)
Robo-mate	Regulación continua	No cuenta con regulación del ángulo de flexo-extensión para el cual se desarrolla el torque máximo	No	7,4	2,03	No Precisa*	Compensación basada en la conexión de resortes por medio de elementos rígidos auxiliares

\* Información no divulgada de manera comercial por el fabricante

Sin considerar los exoesqueletos que no especifican la capacidad de asistencia máxima Fmáx. (Airframe, Mate, Paexo), el H-VEX ofrece la mejor relación fuerza a peso. No obstante, el exoesqueleto Shoulder X es el más versátil dado que presenta más opciones de regulación para adaptar la asistencia al requerimiento del usuario. Finalmente, en la Tabla 3.3 se presentan los indicadores de complejidad cinemática de los exoesqueletos continuando el análisis propuesto por A. Voilqué [Voilqué, 2019]. Se observa que el exoesqueleto Paexo es el más simple de los exoesqueletos, además de tener el menor peso de la lista. Por otro lado, el exoesqueleto Robo-mate presenta el mayor grado de complejidad, pero la mayor capacidad de asistencia (7,5 kgf por cada brazo). Finalmente, todos los exoesqueletos tienen en común el punto de redistribución de la carga (la cadera) así como la parte del cuerpo a la que asisten principalmente. Por tanto, cada exoesqueleto tiene su propio mecanismo de compensación, así como también sus propias fortalezas, por lo que la decisión sobre cuál de ellos es el mejor o el más óptimo dependerá de qué prestación es de mayor

importancia para el interesado (relación fuerza máxima/peso; versatilidad y capacidad de regulación; simplicidad constructiva-cinemática; reducción porcentual de la actividad muscular, etc.)

Tabla 3.3 Principales exoesqueletos de miembros superiores con actuación pasiva – complejidad cinemática

Exoesqueleto	Interacción con el cuerpo humano: puntos de contacto (N)	Punto del cuerpo en el que se distribuye la carga	Partes del cuerpo en donde actúa la fuerza de compensación	Número de puntos articulables del exoesqueleto (p)	Tipo de articulaciones	Número de mecanismos de actuación (a)	Indicador de complejidad $C=N^*a^*p$
Shoulder X	3 (cadera, tronco, brazos)	cadera	Hombros	10	Rotación (Bisagra) Prismática (Corredera)	2	60
Skelex 360-XFR	3 (cadera, tronco, brazos)	cadera	Hombros	10	Rotación (Bisagra) Prismática (Corredera) Esférica (Rótula)	2	60
Airframe	3 (cadera, tronco, brazos)	cadera	Hombros	8	Rotación (Bisagra) Prismática (Corredera)	2	48
Mate	3 (cadera, tronco, brazos)	cadera	Hombros	8	Rotación (Bisagra) Prismática (Corredera)	2	48
Paexo	3 (cadera, tronco, brazos)	cadera	Hombros	6	Rotación (Bisagra) Esférica (Rótula)	2	36
H-VEX	3 (cadera, tronco, brazos)	cadera	Hombros	13	Rotación (Bisagra)	2	78
EksoVest	3 (cadera, tronco, brazos)	cadera	Hombros	10	Rotación (Bisagra) Prismática (Corredera)	2	60
Robo-mate	3 (cadera, tronco, antebrazos)	cadera	Antebrazos	22	Rotación (Bisagra)	4	264

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación, se desarrolló el estudio comparativo de los principales exoesqueletos industriales de miembros superiores con actuación pasiva, así como también se explicaron las ventajas y las limitaciones físicas y/o mecánicas de las técnicas de compensación de carga en las cuales se basan estos dispositivos. En base a ello, se concluyó que las principales técnicas aplicadas en el desarrollo de los mecanismos de dichos exoesqueletos se apoyan básicamente en la incorporación de resortes mediante diferentes configuraciones que permiten almacenar la energía potencial para luego liberarla con la finalidad de compensar una carga determinada. Entre las principales configuraciones aplicadas a los exoesqueletos pasivos, se tienen mecanismos que conectan dichos resortes mediante sistemas de cables y poleas (tanto circulares como no circulares), sistemas de levas, sistemas de engranajes, y elementos rígidos de conexión.

Las técnicas basadas en resortes permiten la compensación completa de una carga, y es posible definir un perfil de torque de compensación para una aplicación determinada utilizando sistemas de cables y poleas no circulares, así como también mecanismos de levas y seguidores. No obstante, en la práctica, la eficiencia de los mecanismos de compensación se verá afectada de fuentes de error en la fabricación como la no linealidad de los resortes y las tolerancias en su manufactura.

Actualmente, los exoesqueletos superiores de actuación pasiva desarrollados de manera comercial proveen una fuerza de asistencia máxima en el rango de 4,9 a 7,5 kgf por cada brazo.

El indicador de complejidad cinemática del exoesqueleto, mostrado en el estudio comparativo del acápite anterior, por sí solo no permite seleccionar un exoesqueleto o determinar el diseño óptimo para un diseño tentativo; el análisis debe ser acompañado de otros parámetros, como por ejemplo la versatilidad del exoesqueleto en cuanto a las posibilidades de regulación que este ofrece, así como el indicador de fuerza específica (relación de la fuerza máxima de asistencia con respecto al peso del dispositivo) con la finalidad de lograr una correcta selección del dispositivo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [Akeel,1987] Akeel, H. A. (1987). *Patent No. US004653975*. United States Patent.
- [Altenburger,2016] Altenburger, R., Scherly, D., & Stadler, K. S. (2016). Design of a passive, iso-elastic upper limb exoskeleton for gravity compensation. *ROBOMECHJournal*,3(1),1–8. <https://doi.org/10.1186/s40648-016-0051-5>
- [Arakelian,2004] Arakelian,V.(2004). *HAND-OPERATED BALANCED MANIPULATORS ( HOBM ). 14315*, 347–356.
- [Arakelian,2016] Arakelian, V. (2016). Gravity compensation in robotics. *Advanced Robotics*,30(2),79–96. <https://doi.org/10.1080/01691864.2015.1090334>
- [Banala,2004] Banala, S. K., Agrawal, S. K., Fattah, A., Rudolph, K., & Scholz, J. P. (2004). A gravity balancing leg orthosis for robotic rehabilitation. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*,2004(3),2474–2479. <https://doi.org/10.1109/robot.2004.1307432>
- [Cho,2011] Cho, C., & Kang, S. (2011). Design of a static balancing mechanism with unit gravity compensators. *IEEE International Conference on Intelligent Robot sand Systems*, 1857–1862. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6048054>
- [Mizera,2020] Mizera, O., Kurzweg, A., Mosler, L., Bornmann, J., Fox, S., Schirrmeister, B. (2020). *Patent No. US20200038219A1*. OTTOBOCK SE & CO . KGAA. United States.
- [Doyle,2017] Doyle, M. C. . (2017). *Patent No. US9737374B2*. UNITED STATES: LEVITATE TECHNOLOGIES , INC ., San Diego , CA ( US ).
- [Ebert-Uphoff,2002] Ebert-Uphoff, I., & Johnson, K. (2002). Practical considerations for the static balancing of mechanisms of parallel architecture. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*,216(1),73–85. <https://doi.org/10.1243/146441902760029401>
- [Ebrahimi,2017] Ebrahimi, A. (2017). Stuttgart Exo-Jacket: An exoskeleton for industrial upper body applications. *Proceedings - 2017 10th International Conference on Human System Interactions, HSI 2017*,258–263. <https://doi.org/10.1109/HSI.2017.8005042>
- [Angold,2018] Angold, R., Lubin, J., Solano, M., Paretich, C., Mastaler, T., Cunningham, C., Dacey, K. (2018). *Patent No. US 20180361565A1*. EKSO BIONICS, Inc. United States.
- [Endo,2010] Endo, G., Yamada, H., Yajima, A., Ogata, M., & Hirose, S. (2010). A passive weight compensation mechanism with a non-circular pulley and a spring. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*,(c),3843–3848. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509797>
- [Fukushima,2005] Fukushima, E. F., Debenest, P., Tojo, Y., TAKITA, K., FREESE, M., RADRICH, H., & HIROSE, S. (2005). Teleoperated Buggy Vehicle and Weight Balanced Arm for Mechanization of Mine Detection and Clearance Tasks. *IARP International Workshop on Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining*, 3(June), 58–63.
- [Giovacchini,2018] Giovacchini, F. (2018). *Exoskeleton design for worker assistance System validation*.
- [Gopura,2016] Gopura, R. A. R. C., Bandara, D. S. V., Kiguchi, K., & Mann, G. K. I. (2016). Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Robotics and Autonomous Systems*, 75,203–220. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.10.001>
- [Greene,1994] Greene, H. P. (1994). *Patent No. US005311827A*. USA.
- [Hyun,2019] Hyun, D. J., Bae, K. H., Kim, K. J., Nam, S., & Lee, D. hyun. (2019). A light-weight passive upper arm assistive exoskeleton based on multi-linkage spring-energy dissipation mechanism for overhead tasks. *Robotics and Autonomous Systems*, 122, 103309. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103309>
- [Kobayashi,2001] Kobayashi, K. (2001).New design method for spring balancers. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 123(4), 494–500. <https://doi.org/10.1115/1.1416480>
- [Koser,2009] Koser, K. (2009). A cam mechanism for gravity-balancing. *Mechanics Research Communications*, 36(4), 523–530. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2008.12.005>
- [Levitte,2020] Levitate Technologies. (2020). Levitate Airframe. Tomado de <https://www.levitatetech.com/airframe/>
- [Mahalingam,1986] Mahalingam, S., & Sharan, A. M. (1986). *Optimal Balancing of the Robotic Manipulators*. 828–835.
- [Manna,2018] Manna, S. K., & Dubey, V. N. (2018). Comparative study of actuation systems for portable upper limb exoskeletons. *Medical Engineering and Physics*,60,1–13. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.07.017>
- [Maurice,2020] Maurice, P., Ivaldi, S., Babic, J., Camernik, J., Gorjan, D., Schirrmeister, B., Fritzsche, L. (2020). Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Transactions on Neural*

- Systems and Rehabilitation Engineering*,28(1), 152–164. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2945368>
- [MTPE,2013] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2013). *Anuario Estadístico Sectorial 2013*. 111(479), 1110.
- [MTPE,2018] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo MTPE. (2018). *Anuario Estadístico Sectorial 2018*. 167.
- [Pacífico,2020] Pacífico, I., Molteni, F., Giovacchini, F., Vitiello, N., Crea, S., Scano, A., Colombina, G. (2020). An experimental evaluation of the proto-mate: A novel ergonomic upper-limb exoskeleton to reduce workers' physical strain. *IEEE Robotics and Automation Magazine*,27(1), 54–65. <https://doi.org/10.1109/MRA.2019.2954105>
- [Simionescu,2000] Simionescu, I., & Ciupitu, L. (2000). Static balancing of the industrial robot arms. Part II: continuous balancing. *Mechanism and Machine Theory*,35(9),1299–1311. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00068-3)
- [Skelex,2020] Skelex. (2020). Tomado de <https://www.skelex.com/skelex-360-xfr/>
- [Van Engelhoven,2019] Van Engelhoven, L., & Kazerooni, H. (2019). Design and Intended Use of a Passive Actuation Strategy for a Shoulder Supporting Exoskeleton. *2019 Wearable Robotics Association Conference, WearRAcon2019*,7–12. <https://doi.org/10.1109/WEARRACON.2019.8719402>
- [Van Geer,2016] Van Geer, F. . J. (2016). *Performance testing of the Skel-Ex*.
- [Voilqué,2019] Voilqué, A., Masood, J., Fauroux, J. C., Sabourin, L., & Guezet, O. (2019a). Industrial Exoskeleton Technology: Classification, Structural Analysis, and Structural Complexity Indicator. *2019 Wearable Robotics Association Conference, WearRAcon 2019*, 13–20. <https://doi.org/10.1109/WEARRACON.2019.8719395>

