

DOI

<https://doi.org/10.29393/EID8-1PTVL10001>



OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y LA PRODUCCIÓN PERSONALIZADA EN TEXTILES INTELIGENTES CON EL USO DE DISPOSITIVOS PORTABLES

OPTIMIZATION OF CUSTOM DESIGN AND PRODUCTION IN SMART TEXTILE WITH THE USE OF WEARABLE

Valeria Bravo*

Manuel Díaz**

Resumen: El envejecimiento acelerado de la población mundial ha incrementado la demanda de tecnologías que mejoren las capacidades y las condiciones de vida de los adultos mayores. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo personalizado para la generación de energía en textiles inteligentes, integrando dispositivos de estimulación vibratoria y generadores de energía para optimizar la experiencia del usuario y la eficiencia. Se diseñó un marco de optimización para determinar la configuración ideal de baterías y dispositivos según la ocupación de los usuarios, junto con un modelo de producción eficiente para la personalización de textiles inteligentes. Los resultados mostraron mejoras significativas en el rendimiento de los dispositivos, la gestión de energía y la eficiencia de producción, al mismo tiempo que se incrementó la comodidad y la facilidad de uso para los usuarios. Estos hallazgos indican que el modelo propuesto es una solución viable y eficaz para la gerontología aplicada. En general, el estudio sugiere que los textiles inteligentes personalizados pueden mejorar la calidad de vida de los adultos mayores, ofreciendo un enfoque escalable para tecnologías portables en el ámbito de la salud y aplicaciones de asistencia, y destacando su potencial para una adopción generalizada en el cuidado de personas mayores.

Palabras clave: optimización, textiles inteligentes, tecnología vestible, ropa inteligente, salud, adultos mayores, tecnologías de asistencia.

Abstract: The accelerated aging of the global population has increased the demand for technologies that enhance the abilities and living conditions of older adults. This study aimed to develop a customized model for energy generation in smart textiles, integrating vibratory stimulation devices and energy generators to optimize user experience and efficiency. An

*Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería en Diseño, Santiago, Chile. Correo electrónico: valeria.bravoc@usm.cl. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7872-2295>. Autora de correspondencia.

**Universidad Bernardo O'Higgins, Facultad de Ingeniería, Ciencia y Tecnología, Santiago, Chile. Correo electrónico: manuel.diaz@ubo.cl. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9125-3227>

optimization framework was designed to determine the ideal configuration of batteries and devices according to users' occupation, alongside an efficient production model for the customization of smart textiles. The results demonstrated significant improvements in device performance, energy management, and production efficiency, while enhancing user comfort and usability. These findings indicate that the proposed model is a feasible and effective solution for applied gerontology. Overall, the study suggests that personalized smart textiles can improve the quality of life of older adults, offering a scalable approach for wearable technologies in healthcare and assistive applications, and highlighting their potential for widespread adoption in elderly care.

Keywords: optimization, smart textile, wearable technology, smart Clothes, healthcare, elderly, Assistive Technologies.

Recepción: 20.04.2026/ Revisión: 21.04.2026/ Aceptación: 29.04.2026

Introducción

La población mundial está envejeciendo rápidamente. Se proyecta que para el año 2050, una quinta parte (20%) de la población mundial tendrá 65 años o más (Instituto Nacional de Estadística, 2018a, 2018b). Este cambio demográfico plantea un desafío significativo para las políticas de salud pública, que deben adaptarse a las crecientes demandas de esta población. El aumento en el número de personas mayores (PM) a nivel mundial va acompañado de un incremento en la prevalencia de enfermedades no transmisibles, crónicas y progresivas, incluidas las enfermedades neurológicas de origen vascular y neurodegenerativo.

Las enfermedades neurológicas representan aproximadamente el 15% de la carga global de enfermedad y constituyen una fuente importante de discapacidad (Organización Mundial de la Salud, s.f.). Entre estas, la enfermedad cerebrovascular (ECV), causada por una interrupción del flujo sanguíneo cerebral, es una de las más prevalentes en personas mayores (PM) y una de las principales causas de discapacidad a largo plazo en el mundo (Feigin et al., 2014). Se estima que entre el 55% y el 75% de los pacientes con ECV presentan alteraciones motoras y sensoriales persistentes, y más del 60% no puede utilizar la mano afectada en actividades de la vida diaria (AVD) (GBD et al, 2024).

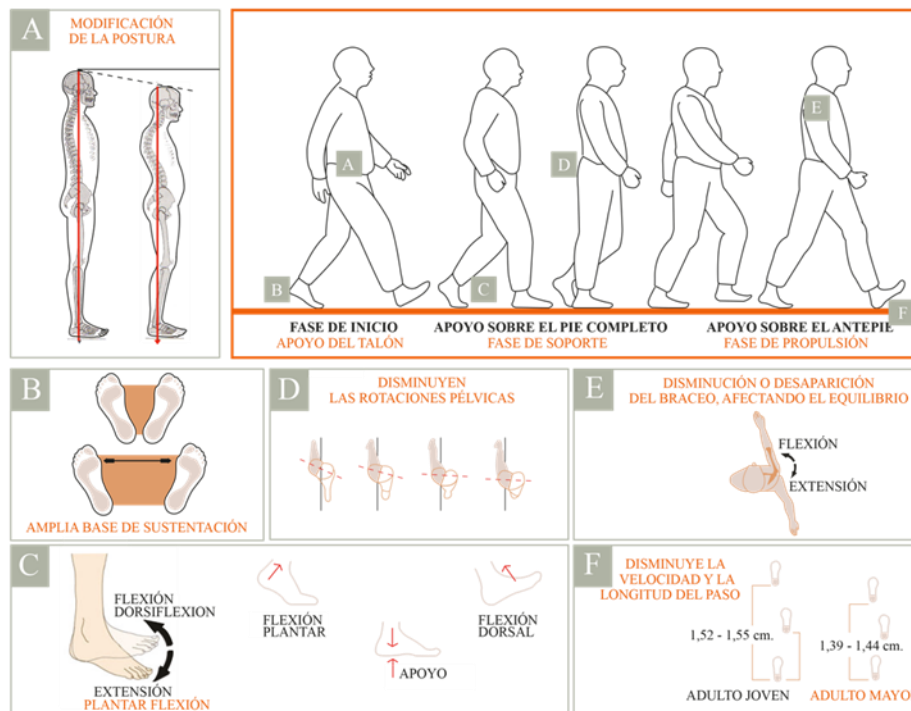
La enfermedad de Parkinson, una condición neurodegenerativa estrechamente relacionada con el envejecimiento se caracteriza por síntomas como bradicinesia, temblor en reposo, rigidez muscular y problemas posturales que pueden provocar caídas y comprometer aún más la funcionalidad. Se estima que alrededor de 4 millones de personas en todo el mundo padecen Parkinson, con una prevalencia del 1%-2% en personas mayores de 65 años y del 3%-5% en mayores de 85 años (Ministerio de Salud, 2013). Estas enfermedades provocan alteraciones motoras, sensoriales y/o cognitivas que afectan significativamente la capacidad de las personas para realizar actividades de la vida diaria y participar en la sociedad. Las limitaciones motoras en esta población generan una necesidad urgente de acceso a servicios de rehabilitación, así como a ayudas técnicas y tecnológicas. Sin embargo, solo un pequeño porcentaje de las personas mayores (PM) con discapacidad tiene acceso a rehabilitación (Chaná et al., 2013).

Los dispositivos de asistencia se definen como cualquier producto externo (dispositivos, equipos, instrumentos o software) cuyo propósito principal es mantener o mejorar la independencia y el funcionamiento de las personas, promoviendo así su bienestar. A nivel mundial, la disponibilidad de estas ayudas es insuficiente. Aproximadamente el 21,5% de las personas mayores reporta necesitar dispositivos de asistencia (Ministerio de Desarrollo Social, 2015), que incluyen principalmente bastones, andadores y sillas de ruedas. Si bien estos dispositivos están ampliamente disponibles, incorporan tecnología básica, por lo que su impacto es principalmente de apoyo.

A medida que las personas envejecen, los adultos mayores (PM) pueden perder autonomía en sus actividades físicas, sociales y psicológicas, limitando su capacidad para realizar actividades de la vida diaria (AVD) (Departamento de Estudios y Desarrollo, Superintendencia de Salud, 2008). La movilidad es un factor crucial para la autonomía, ya que depende en gran medida de la capacidad físico-funcional de las personas mayores para desplazarse. Se ha demostrado que la capacidad física de las personas mayores disminuye con la edad debido a cambios fisiológicos como la pérdida de masa muscular, alteraciones posturales, déficits sensoriales y pérdida del equilibrio, entre otros (Gravelle et al., 2002). Estos cambios reducen su movilidad y aumentan su nivel de dependencia, lo que a su vez disminuye su expectativa de vida debido a una mayor incidencia de caídas, lesiones y fracturas (McArdle et al., 1996).

Los cambios biomecánicos en la marcha incluyen modificaciones en la postura de la columna vertebral, que se vuelve curvada, lo que provoca un desplazamiento hacia adelante del centro de gravedad, asociado con retroversión pélvica y flexión de rodillas, como se muestra en la Figura 1. Los cambios en la postura, combinados con una disminución del equilibrio estático y dinámico, conducen a caídas, fracturas y daño en las extremidades inferiores. También se observan alteraciones funcionales en las extremidades inferiores, incluyendo la degeneración del cartílago articular en la cadera y la rodilla, la disminución de la capacidad muscular en los glúteos, cuádriceps e isquiotibiales, y una reducción del diámetro de la pantorrilla (tríceps sural y gastrocnemio). Además, se presenta una disminución de la dorsiflexión y flexión plantar del tobillo, lo que provoca arrastre del pie. La falta de actividad física en los adultos mayores conduce al sedentarismo, lo que resulta en una reducción de la capacidad física y pérdida de masa muscular, incrementando aún más las deficiencias funcionales. Este deterioro funcional disminuye la expectativa de vida debido a la mayor probabilidad de caídas, lesiones y fracturas (McArdle et al., 1996).

Figura 1. Cambios biomecánicos en la marcha en personas mayores (PM).



Elaboración propia

Una técnica para mejorar el control postural y el rendimiento motor a nivel muscular es la vibración de cuerpo completo (WBV, por sus siglas en inglés), que puede activar los propioceptores y actúa como un potente estímulo para las redes de control motor (Filippi et al., 2009). Los parámetros de WBV generalmente se establecen en frecuencias (~10–50 Hz) y amplitudes grandes (~1–5 mm) (Issurin & Tenenbaum, 1999). Se ha demostrado que esta técnica mejora el rendimiento motor de las piernas en adultos mayores no entrenados (Bruyère et al., 2005).

Por esta razón, la WBV implica una estimulación vibratoria de baja amplitud y alta frecuencia aplicada repetidamente a una zona específica del cuerpo. Esta estimulación focalizada representa una intervención selectiva sin efectos negativos y permite el uso de frecuencias más altas (100 Hz), lo que se traduce en mejoras a largo plazo en el rendimiento motor. Puede inducirse mediante un protocolo específico de vibración a este nivel de frecuencia, mejorando significativamente la fuerza muscular y el equilibrio sin requerir sesiones de ejercicio largas y extenuantes, manteniendo e incrementando así la autonomía motora de las personas mayores.

El dispositivo de vibración focal se aplicó cerca del vasto medial y de los tendones del cuádriceps, ejerciendo presión sobre los tejidos para favorecer la transmisión de estímulos mecánicos dentro del músculo (Filippi et al., 2009). En este contexto, tres grupos poblacionales han demostrado efectos positivos tras la aplicación de la vibración muscular focal (FMV):

- a. Adultos mayores con algún grado de alteración del tono muscular (hipertonía con

aumento del tono muscular a una frecuencia de 90–100 Hz e hipotonía con una frecuencia de trabajo de 200–300 Hz). Este grupo incluye subgrupos con condiciones como traumatismo craneoencefálico (TCE), Parkinson y accidente cerebrovascular (ACV) (Ritzmann et al., 2018).

- b. Adultos mayores y adultos con debilidad muscular y alteraciones propioceptivas asociadas al envejecimiento, con un rango de frecuencia de 80–120 Hz. Este grupo se subdivide en tres niveles: bajo (4 DEMV), medio (6 DEMV) y alto (10 DEMV) (Pietrangelo et al., 2009).
- c. Adultos con patologías articulares degenerativas, lesiones, dolor muscular degenerativo, fibromialgia u otras alteraciones del tono muscular, como artrosis de cadera, rodilla y tobillo, con rangos de frecuencia de 50–120 Hz y tres subgrupos (Rabini et al., 2015).

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar y evaluar un modelo de optimización para el diseño y la producción personalizada de textiles inteligentes, integrando dispositivos de estimulación vibratoria y generación de energía, con el fin de mejorar la eficiencia energética, el rendimiento del sistema y la calidad de vida de personas mayores.

Objetivos Específicos

- Diseñar un modelo de optimización que determine la configuración óptima de dispositivos de estimulación vibratoria, baterías y dispositivos generadores de energía según distintos perfiles de uso.
- Desarrollar un modelo de producción que optimice el uso de recursos, inventarios y costos asociados a la fabricación de textiles inteligentes personalizados.
- Analizar la sensibilidad del modelo frente a variaciones en parámetros clave, tales como costos, demanda y capacidad de generación energética.

Materiales y métodos

El presente estudio corresponde a una investigación cuantitativa de carácter aplicado, basada en modelación matemática para el diseño y producción de textiles inteligentes.

El sistema analizado consiste en calzas inteligentes que integran dispositivos de estimulación vibratoria (DEMV), dispositivos generadores de energía (DGE), baterías y una estructura textil funcional. El consumo energético de los DEMV se estimó en función de su potencia individual (0,09 W por motor), mientras que los DGE permiten la generación de energía a partir del movimiento corporal.

Se desarrollaron dos modelos de optimización. El primero, formulado como un problema de programación lineal entera, tiene como objetivo minimizar el costo y el peso del sistema,

determinando la configuración óptima de DEMV, baterías y DGE para ocho subgrupos de usuarios. Este modelo considera restricciones de balance energético, capacidad de almacenamiento y limitaciones físicas del sistema.

El segundo modelo se enfoca en la planificación de la producción, maximizando las ganancias mediante la optimización del uso de recursos, inventarios y costos de adquisición, considerando restricciones de demanda y tamaños de lote.

Ambos modelos fueron resueltos utilizando el software CPLEX. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad variando parámetros clave como el factor de generación energética y los costos de los componentes, con el fin de evaluar la robustez del sistema.

Adicionalmente, la validación conceptual del modelo se realizó mediante la revisión de literatura científica y la coherencia de los resultados obtenidos en distintos escenarios simulados. Si bien el estudio no contempla experimentación con usuarios finales, los parámetros utilizados fueron definidos en base a antecedentes clínicos y técnicos reportados en la literatura, lo que permite asegurar la pertinencia del modelo propuesto en contextos reales de aplicación.

Resultados

Como se describe en Bravo-Carrasco et al. (2023) y Bravo-Carrasco et al. (2019), las calzas inteligentes comprenden varios componentes diseñados para mejorar la recuperación y proporcionar soporte, incluyendo:

- **Plantilla textil:** El tejido de la plantilla mejora la recuperación, ya que es un textil terapéutico que proporciona compresión graduada (5–29 mmHg) y aporta beneficios de recuperación.
- **Soporte lumbar y pélvico (tejido térmico):** Aplicado desde la zona media lumbar y pélvica para mantener la postura mediante el uso de tejido térmico.
- **Bandas de TPU (poliuretano termoplástico):** Ubicadas a lo largo del eje longitudinal de los músculos. El poliuretano termoplástico es una de las variedades existentes dentro de los poliuretanos. Es un polímero elastomérico lineal y, por lo tanto, termoplástico.
- **Tallas:** El tallaje de la plantilla incluye XS, S, M, L, XL y XXL, tanto para hombres como para mujeres.
- **Cinturón inteligente:** Rodea la cadera y sirve como soporte para la caja de control, la cual suministra energía a los dispositivos vibratorios mediante la batería.
- **Cubierta protectora para los dispositivos de estimulación vibratoria:** La cubierta protectora actúa como un parche que envuelve los estimuladores para proporcionar uniformidad en el diseño y eliminar el sistema ubicado alrededor del área de la rodilla.

- Dispositivos de estimulación vibratoria (DEMV): Micromotores vibratorios completamente sellados e impermeables que estimulan la musculatura por encima de la rodilla para mejorar la función motora. El consumo de energía de los motores DEMV es el siguiente: consumo de 1 motor: 0,06 amperios (A), equivalente a 60 mA. El motor opera a un voltaje de 1,5 volts.

$$P=1.5 \text{ V} * 0.06 \text{ A}$$

$P=0,09 \text{ [W]}$ lo que equivale a la potencia de vibración de 1 motor.

$P= 0,09 \text{ [W]} * x$ (número de motores)

$P= y \text{ [W]}$ (consume de x motores)

Potencia de la batería = 1,702 [W]

Para determinar el número de motores asociados a la potencia de la batería se utiliza:

$$\frac{\text{Potencia de la batería}}{\text{Consumo por motor}} \text{ (número de DEMV por batería).}$$

Dispositivos Generadores de Energía (DGE): Los dispositivos generadores de energía actúan como generadores de energía mecánica mediante materiales termoelectricos incorporados en la fibra textil del calzado, utilizando un área de ocupación correspondiente a la totalidad del textil.

La tecnología wearable, tecnología corporal, vestimenta tecnológica e inteligente o electrónica textil, corresponde a dispositivos electrónicos inteligentes incorporados en la ropa o utilizados sobre el cuerpo como implantes o accesorios, que pueden actuar como una extensión del cuerpo o la mente del usuario. Actualmente, la tecnología wearable presenta una amplia variedad de aplicaciones, tales como monitoreo de actividad, usos comerciales, navegación de sistemas, deportes, procesos productivos, prevención y salud.

La integración electrónica en textiles requiere la fabricación de dispositivos directamente en la propia fibra mediante materiales de alto rendimiento que permitan su incorporación sin interrupciones en los tejidos. La electrónica y optoelectrónica tejida, lograda mediante el entrelazado de fibras con funciones complementarias, utiliza grafeno fabricado directamente sobre fibras textiles y obtenido mediante el tejido de fibras electrónicas de grafeno en una tela. Con ello, se busca lograr un desarrollo potencialmente transformador en prendas inteligentes. Estas se caracterizan por ser generadoras de energía al obtener energía del cuerpo humano (energía mecánica), lo que permite convertir directamente la energía calórica disipada por el cuerpo en electricidad, ofreciendo la posibilidad de integrarse con otros dispositivos y circuitos sin necesidad adicional de baterías.

Por lo tanto, los wearables son dispositivos electrónicos inteligentes incorporados en la fibra textil del calzado, utilizando un área de ocupación del textil (cm²). Se caracterizan por ser un textil auto-recargable mediante el movimiento articular del cuerpo humano por fuerza de descompresión. Están compuestos por hilo de supercondensador flexible en TENG, Ni (níquel) y rGO (óxido de grafeno reducido) sobre la superficie de hilos de poliéster (tejido de las calzas inteligentes) (Pu et al., 2016; Torres-Alonso et al., 2018).

Batería: Alimenta los DEMV cuando no existe almacenamiento disponible a través de los DGE

provenientes del textil. Su unidad de medida es [mAh]. Los DGE permiten alimentar los DEMV durante el uso de la prenda. En caso de no uso, se utilizan para cargar la batería.

Cinturón inteligente: Permite el control de la alimentación eléctrica hacia los DEMV.

Es importante destacar que se debe disponer de autonomía para determinar la cantidad de DGE, el consumo de la batería y la cantidad de dispositivos DEMV a utilizar según todas las dosis de uso para cada una de las configuraciones. De esta manera, se considera un peso adecuado, se determina la cantidad de DGE, baterías y se define la cantidad de DEMV para cada tipo de población definida.

Modelo de Optimización 1

Este modelo consiste en desarrollar un modelo personalizado para la aplicación de generación de energía en textil inteligente, cuyo objetivo es determinar, para cada configuración, la cantidad de baterías, DGE y DEMV que optimicen el rendimiento dentro de todos los programas de uso, y definir la producción de calzas inteligentes de cada tipo para la mejor configuración en cada uno de los 8 subgrupos poblacionales, minimizando el costo y el peso para todo el universo de escenarios de uso. Cabe señalar que las dosis de uso, sesiones, configuraciones, cantidad de DEMV, tiempo de aplicación y duración para cada uno de los tres grupos poblacionales están validadas por un profesional kinesiólogo.

Modelo 1: Configuración de calzas inteligentes

Variables de decisión:

I. Variable de decisión para el Dispositivo Generador de Energía (DGE) (*DGE*)

$ADGE_{ic}$: Área utilizada por el dispositivo generador de energía tipo i en la configuración c referida a los subgrupos.

$$i=\{1,\dots,n\} \quad c=\{1,\dots, 8\}$$

II. Variable de decisión para la batería

B_{jc} : Cantidad de baterías de tipo j utilizadas en la configuración c para los subgrupos.

$$j=\{1,\dots,n\} \quad c=\{1,\dots, 8\}$$

III. Variable del tipo de batería seleccionada y tipo de DGE

Materiales y métodos

X_{ic} : 1 si el DGE de tipo i es utilizado en la configuración c y 0 en caso contrario.

Y_{jc} : 1 si la batería de tipo j es utilizada en la configuración de tipo c y 0 en caso contrario.

1. Parámetros para los Dispositivos Generadores de Energía (DGE):

$PDGE_i$: Potencia generada por el DGE tipo i durante una hora de movimiento. $[W/ [cm]^2]$

ADleggingsDGE: Área de tela disponible para instalar DGE

PreDGE_i : Precio del dispositivo generador de energía tipo *i*.

HMDGE_c : Horas promedio semanales de movimiento para el subgrupo tipo *c* (h/semanas)

2. Parámetros de la batería

EB_j : Capacidad de la batería tipo *j* [W * h]

PB_j: Peso de la batería tipo *j*

PreB_j: Precio de la batería tipo *j*

SB: Semanas de capacidad mínima de suministro del sistema en operación con generación y consumo de energía.

Bmax_j: Descarga máxima sugerida para cada batería tipo *j*

FGdge: Factor de generación del DGE en relación con la demanda (factor crítico, cuánto se generará por hora de uso en relación con el consumo del tratamiento).

3. Parámetros para los Dispositivos de Estimulación Vibratoria (DEM V):

ConDEM V_c : Consumo de los DEM V para cada configuración tipo *c* [W].

HSaplicación_c : Horas por semana de aplicación para cada subgrupo tipo *c* (h/semana)

Saplicación_c : Semanas de tratamiento para cada configuración de subgrupo *c* (semanas)

NDEM V_c: Número de DEM V utilizados en la configuración del subgrupo tipo *c*

El modelo detallado se presenta a continuación:

Función objetivo minimizar costo y peso

$$\min A = \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^o (ADGE_{ic} * PreDGE_i) + \sum_{j=1}^m \sum_{c=1}^o (B_{jc} * PreB_j) \quad (1)$$

$$\min B = \sum_{c=1}^o \sum_{j=1}^m B_{jc} * PB_j \quad (2)$$

Sujeto a:

$$B_{maxj} * EB_j * B_{jc} \geq SB * ConDEM V_c * HSaplicación_c, \forall j, c \quad (3)$$

$$EB_j * B_{jc} \geq Saplicación_c * | PDGE_i * ADGE_{ic} * HMDGE_c - ConDEM V_c * HSaplicación_c |, \forall j, i, c \quad (4)$$

$$ADGE_{ic} * PDGE_i * HMDGE_c \geq ConDEM V_c * HSaplicación_c * FGdge, \forall i, c \quad (5)$$

$$ADGE_{ic} \leq AD_{leggingsDGE}, \forall i, c \tag{6}$$

$$ADGE_{ic} \leq M * X_{ic}, \forall i, c \tag{7}$$

$$B_{jc} \leq M * Y_{jc}, \forall j, c \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ic} = 1, \forall c \tag{9}$$

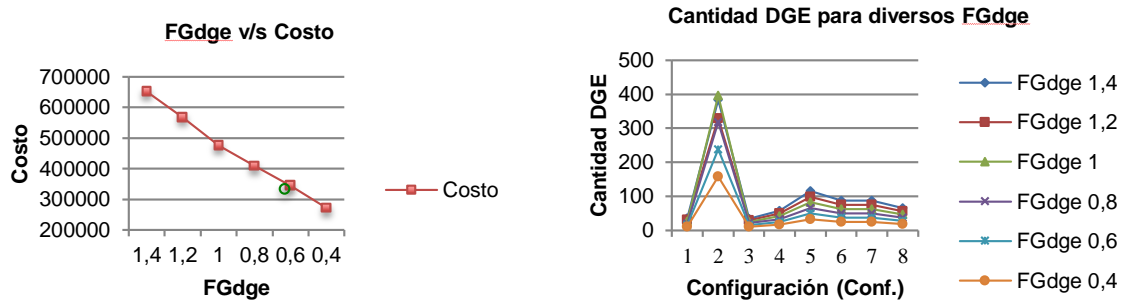
$$\sum_{j=1}^m Y_{jc} = 1, \forall c \tag{10}$$

$$ADGE_{ic}, B_{jc} \geq 0 \forall i, c, j \tag{11}$$

Resultados del Modelo 1

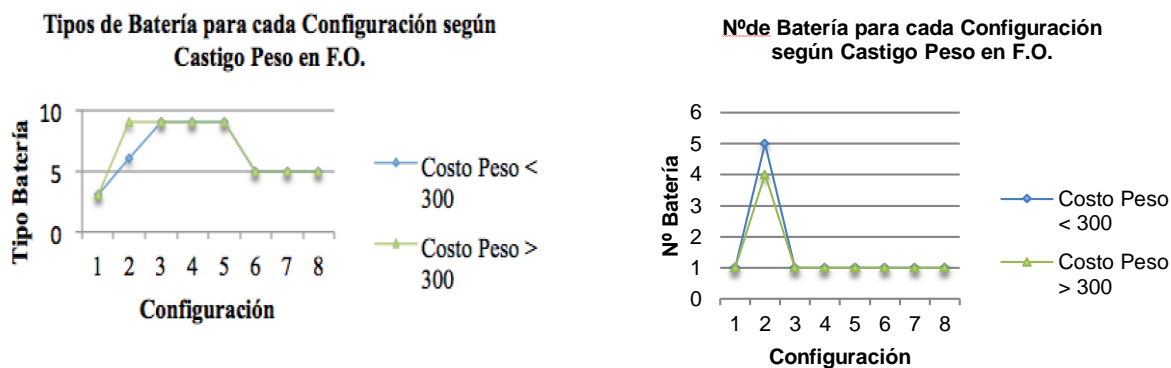
Los resultados se analizan con variación en el parámetro FGdge (0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2 y 1.4), donde en la Figura 2 un FGdge de 1.4 significa que los DGE generan en una hora de movimiento un 40% más de energía de la que consumen los DEMV en una hora de aplicación. En la misma figura se identifican los tipos de baterías para distintos valores asignados de FGdge. Además, la Figura 3 analiza las configuraciones 1, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, las cuales mantienen el mismo tipo de DGE (Tipo 1) para todos los escenarios de FGdge y experimentan una pequeña variación en el área requerida para satisfacer la demanda energética (las configuraciones 5, 6 y 7 muestran mayor variación en comparación con las demás). La configuración 2, en cambio, utiliza el Tipo 3 (FGdge 1.2 y 1.4) y el Tipo 1 para los demás casos, experimentando una mayor variación.

Figura 2. FGdge vs. costo y cantidad de DGE para diversos valores de FGdge



Elaboración propia

Figura 3. Selección y cantidad de baterías según la penalización por peso en la F.O.



Elaboración propia

Se analiza el valor de resultado para FGdge 0.6 y se presentan los siguientes valores en la Tabla 1:

Tabla 1. Valores obtenidos

Conf.	Tipo DGE	Área DGE (cm ²)	Tipo Batería	Nº baterías	Nº DEMV	Costo DEMV	Cost (Manufactura)
1	Tipo 1	15,5	Tipo 3	1	8	4.000	\$44.550
2	Tipo 1	238	Tipo 6	5	8	4.000	\$177.850
3	Tipo 1	14,8	Tipo 9	1	4	4.000	\$38.890
4	Tipo 1	24,8	Tipo 9	1	6	4.000	\$43.890
5	Tipo 1	49,6	Tipo 9	1	10	4.000	\$72.290
6	Tipo 1	37,2	Tipo 5	1	4	4.000	\$39.950
7	Tipo 1	37,2	Tipo 5	1	4	4.000	\$39.950
8	Tipo 1	27,9	Tipo 5	1	4	4.000	\$35.300

Elaboración propia

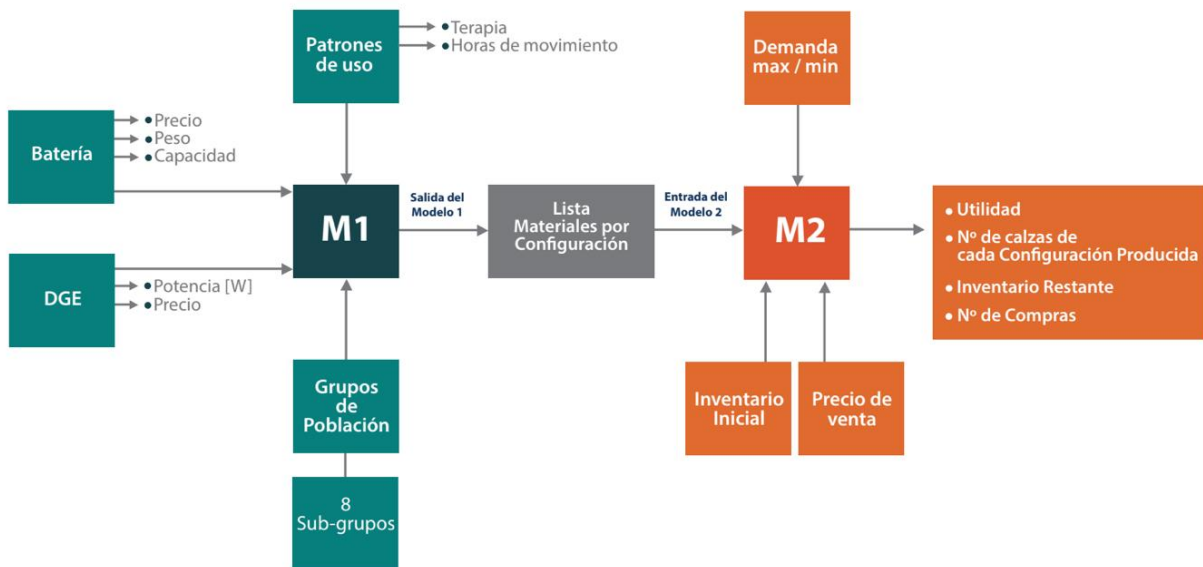
Estos resultados corresponden a un escenario donde las personas mayores (PM) se mueven un total de [4, 2.5, 5, 3, 1.5, 1.5, 1.5, 2] horas por semana para cada configuración. El costo total es de \$492,670 para generar 8 calzas inteligentes, una de cada configuración.

Finalmente, los resultados se analizan con la variación del costo del peso de la batería en la Función Objetivo (F.O.). La F.O. indica en la Figura 3 que cuando la penalización del costo de la batería es menor a 300, se selecciona la batería tipo 6, y cuando es mayor, se elige la batería tipo 9. La misma figura también muestra el cambio en el número de baterías: cuando el costo por peso era menor, la configuración 2 incluía 5 baterías tipo 6, con un peso total de 87.5 gramos. Cuando el costo por peso aumentó, se redujo a 4 baterías tipo 9, resultando en un peso total de 76.8 gramos.

Modelo de Optimización 2

Este modelo consiste en recibir las configuraciones del modelo 1, recibir un precio de venta, inventarios iniciales de cada uno de los componentes y demandas mínimas y máximas para cada una de las configuraciones de calzas inteligentes. A partir de ello, determina la cantidad de compras a realizar de cada uno de los materiales, donde cada compra tiene un tamaño de lote determinado (DGE 1000 cm², baterías tipo 3.9 = 20 y tipo 5.6 = 30 y DEMV 50), actualiza el inventario, reporta el número de compras necesarias y reporta el inventario restante de cada uno de los materiales. La función objetivo está dada por maximizar las ganancias, incluyendo los costos del número de pedidos realizados en el período y considerando el inventario restante en base a un valor unitario. La Figura 4 muestra la interacción de ambos modelos:

Figura 4. Diagrama de los modelos 1 y 2.



Elaboración propia

Model 2 Producción de calzas:

Variables de decisión:

IV. Variable de inventario de recursos

I_DGE_Type1: Inventario disponible de DGE tipo 1

I_Bat_Type3: Inventario disponible de batería tipo 3

I_Bat_Type5: Inventario disponible de batería tipo 5

I_Bat_Type6: Inventario disponible de batería tipo 6

I_Bat_Type9: Inventario disponible de batería tipo 9

I_DEMV: Inventario disponible de DEMV

V. Variable de compra de materiales

PurchaseDGE_Type1

PurchaseBat_Type3

PurchaseBat_Type5

PurchaseBat_Type6

PurchaseBat_Type9

PurchaseDEMV

VI. Variable número de compras

N_PurchaseDGE_1

N_PurchaseBat_3

N_PurchaseBat_5

N_PurchaseBat_6

N_PurchaseBat_9

N_PurchaseDEMV

VII. Variable de inventario restante

IR_DGE_Type1: Inventario restante de DGE tipo 1

IR_Bat_Type3: Inventario restante de batería tipo 3

IR_Bat_Type5: Inventario restante de batería tipo 5

IR_Bat_Type6: Inventario restante de batería tipo 6

IR_Bat_Type9: Inventario restante de batería tipo 9

IR_DEMV: Inventario restante de DEMV

VIII. Variable cantidad de calzas

Calzas: Cantidad de calzas tipo c a fabricar.

$c=\{1,\dots,n\}$

4. Parámetros de materiales requeridos en la configuración de calzas inteligentes

DGE_Type1c: Cantidad de DGE tipo 1 utilizada por cada configuración tipo c

Cost_DGE_Cost_Type1: Costo del DGE tipo 1

Bat_Type3c: Cantidad de baterías tipo 3 utilizadas por cada configuración tipo c

Cost_Bat_Type3: Costo de la batería tipo 3

Bat_Type5c: Cantidad de baterías tipo 5 utilizadas por cada configuración tipo c

Cost_Bat_Type5: Costo de la batería tipo 5

Bat_Type6c: Cantidad de baterías tipo 6 utilizadas por cada configuración tipo c

Cost_Bat_Type6c_Cost: Costo de la batería tipo 6

Bat_Type9c: Cantidad de baterías tipo 9 utilizadas por cada configuración tipo c

Cost_Bat_Type9: Costo de la batería tipo 9

DEMVC: Número de dispositivos de estimulación vibratoria requeridos en cada configuración tipo c

Cost_DEMV: Costo de un DEMV

5. Parámetro de precio de calzas

PriceLegginsc : Precio de venta de una calza para la configuración tipo c.

6. Parámetros de inventarios iniciales

II_DGE_Type1: Inventario inicial de DGE tipo 1

II_Bat_Type3: Inventario inicial de batería tipo 3

II_Bat_Type5: Inventario inicial de batería tipo 5

II_Bat_Type6: Inventario inicial de batería tipo 6

II_Bat_Type9: Inventario inicial de batería tipo 9

II_DEMV: Inventario inicial de DEMV

8. Parámetro de costo por compra:

CostOrder : 5000 (sujeto a variación)

9. Parámetros de demanda de calzas:

DemMaxc : Demanda máxima de calzas de configuración tipo c

DemMinc : Demanda mínima de calzas de configuración tipo c

El modelo detallado se presenta a continuación Función objetivo: maximizar ganancias:

$$\begin{aligned} \max C = \sum_{c=1}^n & (\text{PriceLeggins}_c * \text{legginss}_c - \text{legginss}_c * (\text{DGE_Type1}_c * \\ & \text{Cost_DGE_Type1} + \text{Bat_Type3}_c * \text{Cost_Bat_Type3} + \text{Bat_Type5}_c * \\ & \text{Cost_Bat_Type5} + \text{Bat_Type6}_c * \text{Cost_Bat_Type6} + \text{Bat_Type9}_c * \\ & \text{Cost_Bat_Type9} + \text{DEMVC} * \text{Cost_DEMVC})) - (\text{IR_DGE_Type1} * \\ & \text{Cost_DGE_Type1} + \text{IR_Bat_Type3} * \text{Cost_Bat_Type3} + \text{IR_Bat_Type5} * \\ & \text{Cost_Bat_Type5} + \text{IR_Bat_Type6} * \text{Cost_Bat_Type6} + \text{IR_Bat_Type9} * \\ & \text{Cost_Bat_Type9} + \text{IR_DEMVC} * \text{Cost_DEMVC}) - \text{CostOrder} * (\text{N_PurchaseDGE_1} + \\ & \text{N_PurchaseBat_3} + \text{N_PurchaseBat_5} + \text{N_PurchaseBat_6} + \text{N_PurchaseBat_9} + \\ & \text{N_PurchaseDEMVC}) \end{aligned} \tag{12}$$

Sujeto a:

$$\text{legginss}_c \geq \text{DemMin}_c, \forall c \tag{13}$$

$$\text{legginss}_c \leq \text{DemMax}_c, \forall c \tag{14}$$

$$\text{I_DGE_Type1} = \text{II_DGE_Type1} + \text{PurchaseDGE_Type1} \tag{15}$$

$$\text{I_Bat_Type3} = \text{II_Bat_Type3} + \text{PurchaseBat_Type3} \tag{16}$$

$$\text{I_Bat_Type5} = \text{II_Bat_Type5} + \text{PurchaseBat_Type5} \tag{17}$$

$$\text{I_Bat_Type6} = \text{II_Bat_Type6} + \text{PurchaseBat_Type6} \tag{18}$$

$$\text{I_Bat_Type9} = \text{II_Bat_Type9} + \text{PurchaseBat_Type9} \tag{19}$$

$$\text{I_DEMVC} = \text{II_DEMVC} + \text{PurchaseDEMVC} \tag{20}$$

$$\text{PurchaseDGE_Type1} = \text{N_PurchaseDGE_Type1} * 1000 \tag{21}$$

$$\text{PurchaseBat_Type3} = \text{N_PurchaseBat_Type3} * 20 \tag{22}$$

$$\text{PurchaseBat_Type5} = \text{N_PurchaseBat_Type5} * 30 \tag{23}$$

$$\text{PurchaseBat_Type6} = \text{N_PurchaseBat_Type6} * 30 \tag{24}$$

$$\text{PurchaseBat_Type9} = \text{N_PurchaseBat_Type9} * 20 \tag{25}$$

$$\text{PurchaseDEMVC} = \text{N_PurchaseDEMVC} * 50 \tag{26}$$

$$\text{DGE_Type1}_c * \text{legginss}_c \leq \text{I_DGE_Type1}, \forall c \tag{27}$$

$$\text{Bat_Type3}_c * \text{legginss}_c \leq \text{I_Bat_Type3}, \forall c \tag{28}$$

$$\text{Bat_Type5}_c * \text{legginss}_c \leq \text{I_Bat_Type5}, \forall c \tag{29}$$

$$\text{Bat_Type6}_c * \text{legginss}_c \leq \text{I_Bat_Type6} , \forall_c \quad (30)$$

$$\text{Bat_Type9}_c * \text{legginss}_c \leq \text{I_Bat_Type9} , \forall_c \quad (31)$$

$$\text{DEMV}_c * \text{legginss}_c \leq \text{I_DEMV} , \forall_c \quad (32)$$

$$\text{IR_DGE_Type1} = \text{I_DGE_Type1} - \text{DGE_Type1}_c * \text{legginss}_c , \forall_c \quad (33)$$

$$\text{IR_Bat_Type3} = \text{I_Bat_Type3} - \text{Bat_Type3}_c * \text{legginss}_c , \forall_c \quad (34)$$

$$\text{IR_Bat_Type5} = \text{I_Bat_Type5} - \text{Bat_Type5}_c * \text{legginss}_c , \forall_c \quad (35)$$

$$\text{IR_Bat_Type6} = \text{I_Bat_Type6} - \text{Bat_Type6}_c * \text{legginss}_c , \forall_c \quad (36)$$

$$\text{IR_Bat_Type9} = \text{I_Bat_Type9} - \text{Bat_Type9}_c * \text{legginss}_c , \forall_c \quad (37)$$

$$\text{IR_DEMV} = \text{I_DEMV} - \text{DEMV}_c * \text{legginss}_c , \forall_c \quad (38)$$

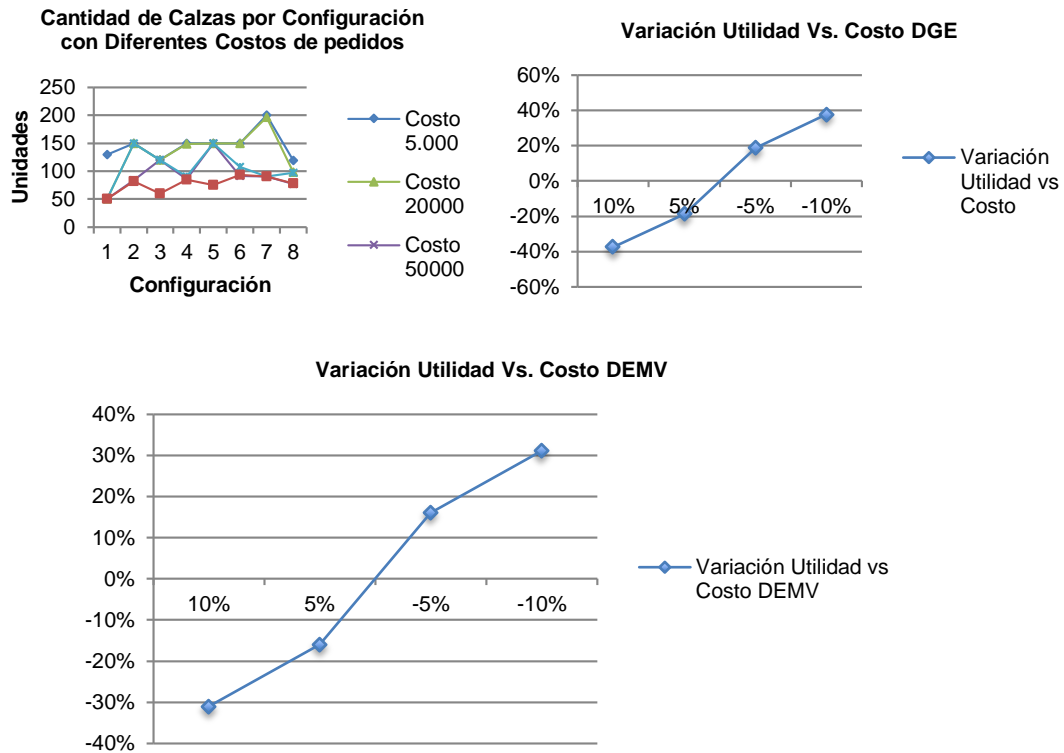
Restricción de no negatividad para todas las variables de decisión. Se considera la restricción de producir dentro del rango de demandas (13)-(14), restricción de igualdad de variables de inventario (15) a (20), restricción de igualdad si se compra, se debe comprar x número de unidades (21) a (26), restricción de disponibilidad de DGE tipo 1 (27), restricción de disponibilidad de batería tipo 3 (28), restricción de disponibilidad de batería tipo 5 (29), restricción de disponibilidad de batería tipo 6 (30), restricción de disponibilidad de batería tipo 9 (31), restricción de disponibilidad de DEMV (32), restricción de igualdad de inventario restante (33) a (38).

Resultados modelo 2

Los resultados se analizan con variación en el costo por pedido, donde se observa un cambio en los márgenes de ganancia. El costo es sensible, ya que genera variaciones en las configuraciones y, a medida que el costo por compra aumenta, la ganancia disminuye.

Por otro lado, en el caso de la cantidad de DGE, DEMV y baterías en inventario restante con diferentes costos por pedido, se observa que existen materiales excedentes para todos los costos por pedido o en algunos casos, excepto en IR_Bat_Type 3. En el número de compras, todos se mantienen en valores altos, excepto N_PurchaseBat_3 y N_PurchaseBat_5. Por otra parte, los resultados se analizan con la variación en el porcentaje del costo de DGE y DEMV, como se muestra en la Figura 5. La variación de la ganancia respecto al costo del DGE refleja la sensibilidad de la ganancia ante cambios en el costo del DGE, mientras que la variación de la ganancia respecto al costo del DEMV ilustra el efecto correspondiente para los DEMV. En ambos escenarios, el DGE es más sensible que el DEMV.

Figura 5. Sensibilidad de la ganancia ante variaciones en el costo de DGE y DEMV.



Elaboración propia

Cabe destacar que la formulación del problema corresponde a un enfoque multiobjetivo, ya que se requiere minimizar el costo y el peso. Por otro lado, considera la maximización de la ganancia (costos, cantidad de pedidos e inventario restante). El solucionador utilizado es CPLEX, ya que considera el tipo de variables y la formulación correspondiente a programación lineal entera. CPLEX implementa optimizadores basados en algoritmos símplex.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la integración de dispositivos de estimulación vibratoria (DEMV) y dispositivos generadores de energía (DGE) en textiles inteligentes permite mejorar significativamente la eficiencia energética y la personalización del sistema. En particular, el modelo de optimización desarrollado demuestra que es posible adaptar la configuración tecnológica a distintos perfiles de usuarios, lo cual resulta clave en contextos de envejecimiento poblacional.

El análisis de sensibilidad respecto al parámetro FGdge muestra que la capacidad de generación energética influye directamente en la selección de componentes, especialmente en el tipo y número de baterías. Este hallazgo coincide con estudios previos sobre sistemas autoalimentados en wearables, donde la eficiencia energética es un factor crítico para la adopción tecnológica.

Asimismo, el modelo de producción permite optimizar la gestión de recursos, destacando la relevancia de los costos de adquisición y el tamaño de los lotes en la rentabilidad del sistema. Se observa que el costo de los DGE tiene un impacto mayor en la utilidad que el de los DEMV, lo cual sugiere que futuras investigaciones deberían centrarse en el desarrollo de tecnologías de generación energética más eficientes y económicas.

En términos aplicados, los resultados refuerzan el potencial de los textiles inteligentes como soluciones escalables en rehabilitación y asistencia a personas mayores, contribuyendo a mejorar su autonomía y calidad de vida.

Conclusiones

El presente estudio permitió desarrollar y evaluar un modelo de optimización para el diseño y la producción personalizada de textiles inteligentes, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados.

En relación con el primer objetivo específico, se logró diseñar un modelo que determina la configuración óptima de DEMV, DGE y baterías, adaptándose a distintos perfiles de uso y garantizando un equilibrio entre consumo y generación energética. Esto permite mejorar el rendimiento del sistema y asegurar su viabilidad operativa.

Respecto al segundo objetivo, el modelo de producción desarrollado demostró ser eficaz en la optimización del uso de recursos, inventarios y costos, maximizando las ganancias bajo restricciones de demanda. Este enfoque contribuye a una gestión eficiente de la producción de textiles inteligentes personalizados.

En cuanto al tercer objetivo, el análisis de sensibilidad evidenció que parámetros como el costo de los componentes y el factor de generación energética tienen un impacto significativo en los resultados del sistema, destacando especialmente la influencia de los DGE en la rentabilidad global.

En conjunto, los modelos propuestos constituyen una herramienta robusta para la toma de decisiones en el diseño y producción de tecnologías vestibles aplicadas a la salud, con un alto potencial de impacto en la mejora de la calidad de vida de las personas mayores.

En términos generales, los resultados evidencian que la integración de modelos de optimización en el diseño de textiles inteligentes no solo mejora la eficiencia técnica del sistema, sino que también permite avanzar hacia soluciones personalizadas y escalables en el ámbito de la salud. Este enfoque representa una contribución relevante al desarrollo de tecnologías vestibles aplicadas a la rehabilitación, posicionándose como una alternativa innovadora frente a dispositivos tradicionales de asistencia.

Finalmente, a través del modelo 1, se espera determinar la aplicación óptima de las dosis de tratamiento según el paciente y la enfermedad en cada uno de los 8 subgrupos poblacionales. De esta manera, será posible ofrecer la mejor configuración, tiempo de tratamiento y días de aplicación para cada caso. Por otro lado, el modelo 2 permite determinar la distribución eficiente de los recursos, considerando las restricciones de demanda máxima y

mínima, optimizando las ganancias y minimizando el costo y el peso de los productos. Estos modelos ofrecen un enfoque innovador y eficaz para mejorar la funcionalidad y la calidad de vida de las personas mayores, y su implementación puede generar un impacto positivo significativo en el ámbito de la salud y la rehabilitación.

Referencias

- Bravo-Carrasco, V., Muñoz-Vidal, J., & Caparrós-Manosalva, C. (2023). Vibration motor stimulation device in smart leggings that promotes motor performance in older people. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 61(3), 635–649. <https://doi.org/10.1007/s11517-022-02733-7>
- Bravo, V., Caparros, C., Zuniga, R., Munoz, J., Nicholis, O., & Barra, R. (2019). *Anthropometric Study among Chilean Older Adults*. *Journal of Ergonomics*, 09(01). <https://doi.org/10.35248/2165-7556.19.9.244>
- Bruyère, O., Wuidart, M. A., Di Palma, E., Gourlay, M., Ethgen, O., Richey, F., & Reginster, J. Y. (2005). Controlled whole body vibration to decrease fall risk and improve health-related quality of life of nursing home residents. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(2), 303–307. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2004.05.019>
- Chaná, P., Jiménez, M., Díaz, V., & Juri, C. (2013). Mortalidad por enfermedad de Parkinson en Chile. *Revista Médica de Chile*, 141, 327–331.
- Departamento de Estudios y Desarrollo, Superintendencia de Salud. (2008). *Dependencia de los adultos mayores en Chile*.
- Feigin, V. L., Forouzanfar, M. H., Krishnamurthi, R., Mensah, G. A., Connor M, Bennett, D. A., et al. (2014). Global and regional burden of stroke during 1990–2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet*, 383(9913), 245–54.
- Filippi, G. M., Brunetti, O., Botti, F. M., Panichi, R., Roscini, M., Camerota, F., Cesari, M., & Pettorossi, V. E. (2009). Improvement of stance control and muscle performance induced by focal muscle vibration in young-elderly women: A randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(12), 2019–2025. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2009.08.139>
- Gravelle, D. C., Laughton, C. A., Dhruv, N. T., Katdare, K. D., Niemi, J. B., Lipsitz, L. A., & Collins, J. J. (2002). Noise-enhanced balance control in older adults. *Neuroreport*, 13(15), 1853–6.
- GBD 2021 Stroke Risk Factor Collaborators (2024). Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet. Neurology*, 23(10), 973–1003. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(24\)00369-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(24)00369-7)
- Instituto Nacional de Estadística. (2018a). *Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 Total país*. Recuperado de <http://www.censo2017.cl/descargas/proyecciones/sintesis-estimaciones-y-proyecciones-de-la-poblacion-chile-1992-2050.pdf>
- Issurin, V. B., & Tenenbaum, G. (1999). Acute and residual effects of vibratory stimulation on explosive strength in elite and amateur athletes. *Journal of Sports Sciences*, 17(3), 177–182. <https://doi.org/10.1080/026404199366073>
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (1996). *Exercise physiology: Energy, nutrition, and human performance* (4th ed.). Williams & Wilkins.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2015). *Estudio Nacional de la Discapacidad 2015*. Recuperado de http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/endisc/docs/Libro_Resultados_II_Estudio_Nacional_de_la_Discapacidad.pdf
- Ministerio de Salud. (2013). *Guía Clínica Accidente cerebrovascular isquémico en personas de 15 años y más*. Recuperado de <https://www.minsal.cl/portal/url/item/7222754637e58646e04001011fo14e64.pdf>

- Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *Dispositivos y tecnologías de apoyo a las personas con discapacidad*. Recuperado de <https://www.who.int/disabilities/technology/es/>
- Pietrangelo, T., Mancinelli, R., Toniolo, L., Cancellara, L., Paoli, A., Puglielli, C., Iodice, P., Doria, C., Bosco, G., D'Amelio, L., Fulle, S., Fanò, G., & Reggiani, C. (2009). Effects of local vibrations on skeletal muscle trophism in elderly people: Mechanical, cellular, and molecular events. *International Journal of Molecular Medicine*, 24(4), 503–512. <https://doi.org/10.3892/ijmm.00000259>
- Pu, X., Li, L., Liu, M., Jiang, C., Du, C., Zhao, Z., Hu, W., & Wang, Z. L. (2016). Wearable self-charging power textile based on flexible yarn supercapacitors and fabric nanogenerators. *Advanced Materials*, 28(1), 98–105. <https://doi.org/10.1002/adma.201504403>
- Rabini, A., De Sire, A., Marzetti, E., Gimigliano, R., Ferriero, G., Piazzini, D. B., Iolascon, G., & Gimigliano, F. (2015). Effects of focal muscle vibration on physical functioning in patients with knee osteoarthritis: A randomized controlled trial. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 51(5), 513–520.
- Ritzmann, R., Stark, C., & Krause, A. (2018). Vibration therapy in patients with cerebral palsy: A systematic review. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 14, 1607–1625. <https://doi.org/10.2147/NDT.S152543>
- Torres-Alonso, E., Rodrigues, D. P., Khetani, M., Shin, D. W., De Sanctis, A., Joulie, H., Faour, I., Mizzi, C. A., Veigas, M. L., Sinha, S., & Craciun, M. F. (2018). Graphene electronic fibres with touch-sensing and light-emitting functionalities for smart textiles. *NPJ Flexible Electronics*, 2(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41528-018-0040-2>



Todos los contenidos de la revista **Ergonomía, Investigación y Desarrollo** se publican bajo una [Licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) y pueden ser usados gratuitamente, dando los créditos a los autores y a la revista, como lo establece la licencia