



# Revisión de métodos de evaluación de la usabilidad en IHC para personas con limitaciones motrices: fundamentos, métricas e investigaciones recientes

A review on methods for usability assessment of HCI oriented to motor impaired people: foundations, metrics and current research

pp. 21-39

CARLOS FERRÍN BOLAÑOS<sup>2</sup>, HUMBERTO LOAIZA CORREA<sup>3</sup>  
LAURA VALERO ECHEVERRÍA<sup>4</sup>, PAULO VÉLEZ ÁNGEL<sup>5</sup>  
Y JAIME MOSQUERA DE LA CRUZ<sup>6</sup>

REC: 20/10/2021  
ACEP: 7/03/2022

## Resumen

Diseñar una Interfaz Humano Computador (IHC) es un proceso complejo, su desempeño depende de las necesidades particulares de cada persona. Qué tipo de características debe contener, cuáles son las condiciones neurofisiológicas y cómo es el contexto del individuo, son elementos esenciales para un buen diseño. La literatura ha detectado un sinnúmero

de diseños de IHC orientados a personas con limitaciones motrices que no cuentan con los conceptos de usabilidad en toda su amplitud, ni las diferentes pruebas que permitan la evaluación de estos diseños en una forma rigurosa y estandarizada. Por tal razón, en este documento se presentan, después de un ejercicio de revisión documental, de forma sencilla y

1. Artículo de revisión.
2. Ph. D. Electrical and Electronics Engineering School. Docente investigador, Universidad del Valle. Correo electrónico: carlos.ferrin@correounivalle.edu.co - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2739-9205>
3. Ph. D. Doctorado en Robótica y Visión Artificial, Université d'Evry. M. Sc. en Automática, Universidad del Valle. Ingeniero Electricista, Universidad del Valle. Correo electrónico: humberto.loaiza@correounivalle.edu.co - Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7206-7333>
4. Ingeniera Electrónica, Universidad del Valle. Docente investigador, Universidad del Valle. Correo electrónico: laura.valero@correounivalle.edu.co - Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0031-0829>
5. Ingeniero Electrónico, Universidad del Valle. Magíster en Instrumentación Física, Universidad Tecnológica de Pereira. Investigador Unicatólica. Correo electrónico: pavelez@unicatolica.edu.co - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1210-7425>
6. Ingeniero Electrónico, Universidad del Valle. Magíster en Ingeniería, Universidad del Valle. Docente investigador, Unicatólica Cali. Correo electrónico: jhmosquera@unicatolica.edu.co - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9324-1692>

práctica, los conceptos y métricas que permiten evaluar la usabilidad de las IHC orientadas a personas con limitaciones motrices.

**Palabras clave:** interfaz humano computador, usabilidad, limitación motriz.

## Abstract

Designing a Human Computer Interface (IHC) is a robust process, its performance depends on the needs of each person. What kind of features should it contain, what are the neurophysiological conditions, and what is the context of the individual, are essential elements for a good design. The literature has detected countless IHC designs aimed at people with motor limitations that do not include usability concepts in their entirety, nor the different tests that allow the evaluation of these designs in a rigorous and standardized way. For this reason, this document presents, after a documentary review exercise, in a simple and practical way, the concepts and metrics that allow evaluating the usability of IHCs aimed at people with motor limitations.

**Keywords:** human computer interface, usability, motor impairment.

## Introducción

La Association for Computing Machinery (ACM) define la interacción humano-computador como “una disciplina relacionada con el diseño, evaluación e implementación de sistemas o interfaces de computación interactivos para uso humano y con el estudio de los principales fenómenos que los rodean” (Marsh, 1990). Como disciplina que se ocupa de los humanos, la interacción humano-computador está necesariamente relacionada con el fenómeno de la “limitación motriz, sensorial y

cognitiva”. La razón es que, para que se produzca una interacción entre humanos y computadoras, debe haber una interfaz que medie entre ellos y el diseño de dicha interfaz puede imponer inadvertidamente barreras de acceso a algunas personas. La interacción humano-computador aborda este tema desde diferentes ángulos, algunos de los cuales son diametralmente opuestos (Armagno, 2012).

Como humanos, la capacidad de controlar los computadores (y en general las máquinas) es una parte esencial en el mundo moderno. La mayoría de IHC se han diseñado bajo el paradigma de universalidad y no bajo el de accesibilidad (Armagno, 2012; Kumar y Arjunan, 2016). Estas interfaces se basan en el uso de dispositivos como palancas, ruedas, teclados y *mouse*, con los que se pueden controlar casi todos los recursos que ofrecen los computadores, tanto para comunicarse como para satisfacer necesidades del diario vivir. Sin embargo, estas tecnologías asumen que los usuarios tienen destreza en sus manos y pueden recibir retroalimentación sensorial como visual, presión y movimiento. Superar esta deficiencia es el enfoque de un gran número de empresas y equipos de investigación de todo el mundo, y se incluye en el ámbito genérico de la interacción humano-computador.

Uno de los conceptos relacionados más importantes en el diseño de IHC es el de usabilidad, porque expresa la relación entre los usuarios finales y las aplicaciones informáticas. En la práctica, el concepto de usabilidad se utiliza para medir qué tan bien puede un usuario en un contexto específico usar un producto para lograr un objetivo definido de manera efectiva, eficiente y satisfactoria. Los diseñadores de IHC suelen medir la usabilidad de un diseño a lo largo del proceso de desarrollo, desde los bocetos hasta el producto final, para garantizar

la máxima usabilidad. A menudo, quienes diseñan nuevas IHC confunden la usabilidad con experiencia del usuario y facilidad de uso. La usabilidad es un componente del diseño de la experiencia del usuario. Según Isaías y Blashki (2014), la usabilidad es el segundo nivel en la experiencia del usuario. Viene después de la utilidad y antes de la deseabilidad y la experiencia de marca. Por lo tanto, una vez se haya determinado que la IHC resuelve los problemas de los usuarios, se debe abordar su facilidad de uso. La usabilidad de un diseño depende de qué tan bien se adapten sus características a las necesidades y contextos de los usuarios. A pesar de la importancia de este concepto, su uso ha sido pobremente desarrollado en los diferentes trabajos encontrados en la literatura (Manresa Yee, 2009).

Con base en lo descrito anteriormente, el propósito de este documento es brindar una introducción y un panorama actual sobre la usabilidad de las IHC en pacientes con limitaciones motrices. Para lograr esto, en la primera sección se establecen los principios y componentes fundamentales de las IHC. En la segunda sección se proporcionan conceptos suficientes para comprender la usabilidad en IHC en forma general. Luego, en la tercera y cuarta secciones se definen las métricas de evaluación de usabilidad para personas con limitaciones motrices. Finalmente, en la última sección, se proporciona una revisión breve sobre trabajos recientes en IHC para personas con limitaciones motrices, evidenciando las métricas de usabilidad utilizadas y si las pruebas se realizaron en sujetos con o sin limitaciones motrices. Dado que el número de trabajos reportados en la literatura relacionados con IHC en personas con limitaciones es amplio, este documento se enfocará principalmente en las limitaciones motrices, sin desconocer, y en algunos casos referenciar, los trabajos

relacionados con los otros tipos de limitaciones, a saber, el sensorial (principalmente visual) y el cognitivo.

## Interfaces humano-computador

A pesar de su aparente consistencia, la definición sobre IHC del ACM es seguida por un párrafo que explica que “actualmente no existe una definición acordada de la gama de temas que forman el área de interfaces humano-computador” (Marsh, 1990). Esta dificultad para encontrar una definición única y concisa ha caracterizado al campo a lo largo de su historia y persiste hasta el día de hoy (Grandhi, 2015). Una posible explicación de esta característica es que la IHC no es una disciplina única sino un diálogo entre muchas otras. Su alcance abarca varias teorías, metodologías, concepciones epistemológicas y temas coexistentes.

El diseño de las IHC surgió en la década de los ochenta con el advenimiento de la computación personal, justo cuando máquinas como Apple Macintosh, IBM PC 5150 y Commodore 64 empezaron a aparecer en hogares y oficinas en cantidades que cambiaron totalmente la sociedad (Weyers et al., 2017). En aquella época, por primera vez, los consumidores en general dispusieron de los así denominados sofisticados sistemas electrónicos para usos tales como procesadores de texto, unidades de juegos y ayudas contables. Entonces, se volvió cada vez más necesario crear una interacción humano-computador que también fuera fácil y eficiente para los usuarios menos experimentados, esto debido principalmente a que las computadoras ya no tenían el tamaño promedio de una sala de hogar y las costosas herramientas creadas exclusivamente para expertos en entornos especializados empezaron su desuso. Desde sus orígenes, la IHC se expandió de forma natural, incorporando

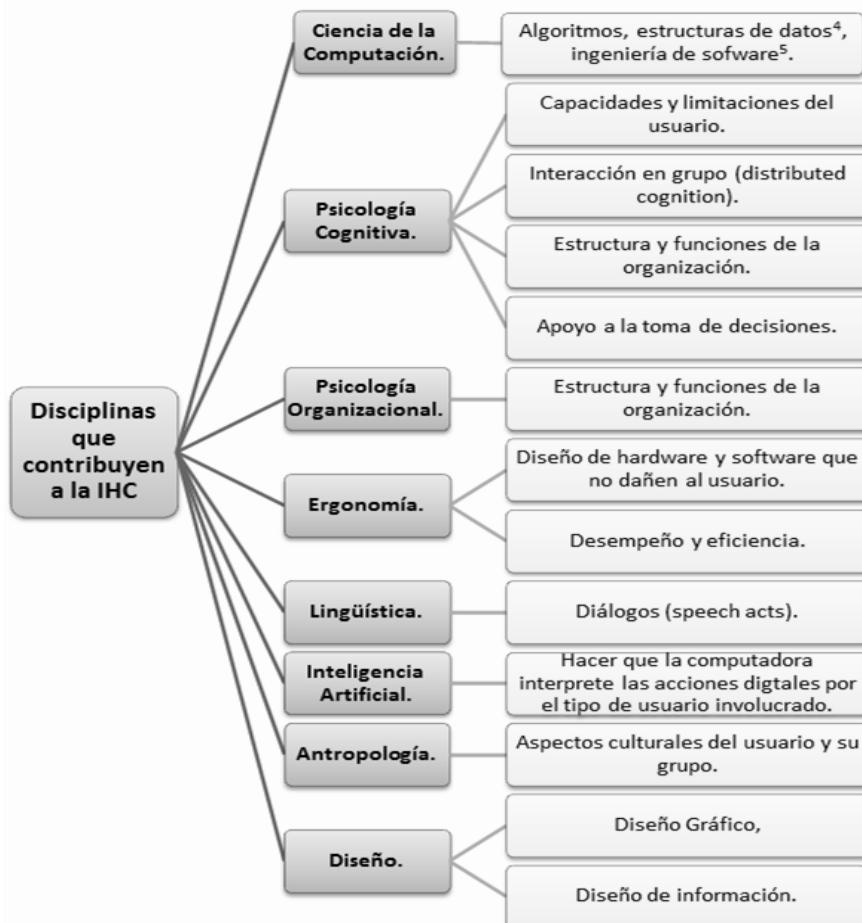
disciplinas tales como la informática, la ciencia cognitiva y la ingeniería de factores humanos (Isaías y Blashki, 2014). Por tal razón, en la actualidad el diseño de IHC es considerado un campo de estudio multidisciplinario que se centra en el diseño de tecnología informática y, en particular, la interacción entre humanos (los usuarios) y computadoras. Si bien inicialmente se ocupó de las computadoras, las IHC se han expandido desde entonces para cubrir casi todas las formas de diseño de tecnología de la información (Weyers et al., 2017).

Actualmente, la IHC es considerada un área de investigación multidisciplinaria (Figura 1), enfocada en las modalidades de interacción entre humanos y computadoras (Manresa Yee, 2009). La IHC investiga y trata todos los aspectos relacionados con el diseño y la implementación de las interfaces entre los humanos y las computadoras.

Esta disciplina, que estudia el intercambio de información mediante *software* entre las personas y las computadoras, se encarga del

Figura 1

*Disciplinas que contribuyen a la concepción, diseño e implementación de sistemas de IHC.*



Fuente: Elaborado con base en Manresa Yee (2009).

diseño, evaluación e implementación de los aparatos tecnológicos interactivos, estudiando el mayor número de casos que les pueda llegar a afectar. El objetivo es que el intercambio sea más eficiente: minimizar errores, incrementar la satisfacción, disminuir la frustración y, en definitiva, hacer más productivas las tareas que rodean a las personas y a los computadores.

Los componentes fundamentales de cualquier sistema de IHC (Isaías y Blashki, 2014; Kumar y Arjunan, 2016; Weyers et al., 2017) son:

- **Usuario:** Hay que tener en cuenta que el ser humano tiene una capacidad limitada de procesar información; lo cual es muy importante considerar al hacer el diseño. El ser humano se puede comunicar a través de cuatro canales de entrada/salida: visión, audición, tacto y movimiento. La información recibida se almacena en la memoria sensorial, la memoria a corto plazo y la memoria a largo plazo. Una vez se recibe la información, esta es procesada a través del razonamiento y de habilidades adquiridas, como por ejemplo el hecho de resolver problemas o el detectar errores. A todo este proceso afectará al estado emocional del usuario, dado que influye directamente sobre las capacidades de una persona. Además, un hecho que no se puede pasar por alto es que todos los usuarios tendrán habilidades comunes, pero habrá otras que variarán según la persona. En el caso de personas con limitación motriz de miembros superiores, la mayor parte de información estará en los movimientos y gestos del rostro, así como de voz.
- **Computador:** El sistema final de interacción usado puede afectar de diferentes formas

al usuario. Los dispositivos de entrada actuales permiten introducir texto, como el caso del teclado del computador, el teclado de un teléfono, el habla o bien un escrito a mano; dibujos; selecciones por pantalla, con el ratón, por ejemplo. Como dispositivos de salida se contraría con diversos tipos de pantallas, mayoritariamente aquellas que son de mapas de bits, pantallas de gran tamaño de uso en lugares públicos. Los sistemas de realidad virtual y de visualización con 3D juegan un rol muy significativo en el mundo de la interactividad persona-computador. También serán importantes los dispositivos de contacto con el mundo físico, por ejemplo controles físicos, como sensores de temperatura, movimiento, etc. El diseño del sistema IHC puede simplificarse mucho si se limita la aplicación objetivo. En el caso de personas con limitación motriz las aplicaciones objetivo más relevantes son aquellas que contribuyen con la inclusión social de las mismas, tales como redes sociales, chats, entre otras.

- **Origen del proceso interactivo:** Es necesario que haya una buena comunicación entre usuario y computador, por este motivo la interfaz tiene que ser diseñada pensando en las necesidades del usuario y la aplicación objetivo. Es de vital importancia el buen entendimiento entre ambas partes para hacer posible la interacción.

Para diseñar y evaluar una IHC suelen considerarse los siguientes principios de diseño experimental (Harte et al., 2017):

1. **El enfoque inicial se ubica en los usuarios y en las tareas:** Se establece cuántos usuarios se necesitan para realizar las tareas y se determina quiénes deben ser los usuarios

adecuados (lo más probable es que alguien que nunca haya usado la IHC y que no la utilizará en el futuro, no sea un usuario válido). Además, se definen las tareas que realizarán los usuarios y la frecuencia con la que deben realizarse.

2. Medición empírica: La IHC se prueba con usuarios reales que entran a diario en contacto con la interfaz. Los resultados pueden variar con el nivel de rendimiento del usuario y es posible que la interacción típica humano-computador no siempre esté representada. Se deben determinar los detalles de usabilidad, como la cantidad de usuarios que realizan la(s) tarea(s), el tiempo para completar la(s) tarea(s) y la cantidad de errores cometidos durante la(s) tarea(s).
3. Diseño iterativo: Despues de determinar qué usuarios, tareas y medidas empíricas incluir, se llevan a cabo los siguientes pasos de diseño iterativo:
  - Diseñar la interfaz de usuario.
  - Probar.
  - Analizar resultados.
  - Repetir.

El proceso de diseño iterativo se repite hasta que se crea una interfaz sensible y fácil de usar (Harte et al., 2017).

Cuando los diseñadores de IHC piensan en formas de cómo un usuario puede interactuar con el dispositivo que están diseñando, conciben nuevas tecnologías que pueden utilizar para que el dispositivo se considere “fácil de usar” para la mayoría del público. Sin embargo, muchas veces las personas con limitaciones motrices son ignoradas y sus gustos o disgustos no se tienen en cuenta al diseñar productos (Kumar y Arjunan, 2016).

Aunque en la actualidad muchos productos informáticos tienen formas para que las personas con limitaciones motrices interactúen, todavía hay muchos que son difíciles de usar. Por lo tanto, las personas con limitaciones motrices están pobremente representadas en el campo de la IHC, incluso en la actualidad. Los autores de este documento consideran que es preponderante diseñar productos que todos, incluidas las personas con limitaciones motrices, puedan utilizar sin ser excluidos. Afortunadamente, hoy en día existen algunas pautas básicas que los diseñadores de IHC pueden seguir para que personas de todas las capacidades puedan interactuar fácilmente con los dispositivos desarrollados.

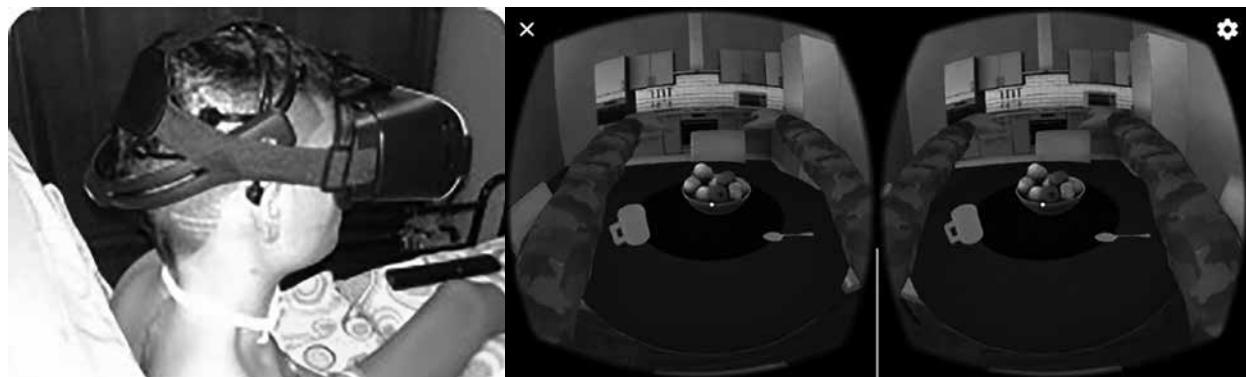
El *mouse* de la computadora, el teclado, la pantalla inteligente y el *joystick* son algunos ejemplos de IHC más tradicionales que utilizan la mayoría de las personas para comandar una computadora u otros dispositivos similares. Sin embargo, un número significativo de personas con limitaciones no pueden utilizar dichos dispositivos. Debido a esto, actualmente se dispone de una serie de interfaces mecánicas que facilitan a estos usuarios controlar máquinas y ordenadores.

Adicionalmente, otros tipos de IHC investigados en la actualidad para este tipo de usuarios son las IHC basadas en comandos de voz (Mosquera-De la Cruz et al., 2021), gestos faciales (Ferrín-Bolaños et al., 2021) y bioseñales tales como electromiográficas (EMG) (Barreto et al., 2000), electrooculográficas (EOG) (Deepika y Murugesan, 2015), electroencefalográficas (EEG) (Ferrín-Bolaños y Loaiza-Correa, 2018), etc.

En las Figuras 2 y 3 se pueden observar ejemplos de IHC basados en neuroseñales.

**Figura 2**

*Interfaz Humano Computador basado en neuroseñales para comandar un entorno 3D sobre unas gafas de realidad virtual en un paciente con limitación motriz de miembros superiores.*



Fuente: Archivo propio de los autores [autorizado].

**Figura 3**

*Interfaz Humano Computador basado en neuroseñales para comandar el cursor del computador.*



Fuente: Šumak et al. (2019).

## Usabilidad en IHC

Las IHC deben pasar por una evaluación de usabilidad con el fin de determinar *qué tan utilizable realmente es la interfaz*. A la hora de diseñar una IHC se debe tener en cuenta que la usabilidad significa centrarse en los usuarios:

conocerlos, observarlos, hablar con ellos y entrevistarlos, visitarlos en su entorno laboral o diario, conocer las tareas que realizan y recopilar la mayor cantidad de información posible para diseñar y desarrollar un producto realmente utilizable.

La usabilidad es un término que no ha sido definido de la misma manera ni por los diferentes estándares que existen ni por los investigadores que estudian y desarrollan IHC (Hornbæk, 2006); sin embargo, es un concepto que toma en consideración múltiples factores como el desempeño, la satisfacción del usuario, la aceptabilidad del sistema y la facilidad de aprendizaje. Una definición de usabilidad se encuentra en la norma internacional ISO 9241-11 (ISO, 2018) sobre los requisitos ergonómicos para el trabajo de oficina con pantallas de visualización (VDT). Dicha norma define usabilidad como: “El grado en que un producto puede ser utilizado por usuarios para lograr objetivos específicos con eficacia, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso específico”. Las tres medidas que se deben controlar, según la ISO 9241-11 (ISO, 2018) son:

1. **Eficacia:** ¿Qué tan bueno fue el cumplimiento de la tarea?, ¿qué tan completo fue el logro de los objetivos?, ¿qué tan exacta y completamente pueden los usuarios realizar sus objetivos especificados?
2. **Eficiencia:** ¿Qué tanto esfuerzo se requiere para lograr el nivel de eficacia en el cumplimiento de los objetivos?
3. **Satisfacción:** ¿Qué tanto se satisfacen las expectativas personales de los usuarios?, ¿qué tan bien se sienten con la consecución de sus objetivos?, ¿hay comodidad y actitud positiva hacia el sistema en el cumplimiento de los objetivos?

Nótese que los tres parámetros mencionados arriba se ven afectados por el usuario (¿quién será el usuario final del producto?, ¿es un usuario experimentado o novato?, ¿tiene alguna condición física particular o no?), las metas (¿qué tipo de tareas se quieren realizar cuando utilizan la IHC?) y el contexto en que use la IHC (¿dónde se va a utilizar el dispositivo y en qué condiciones puntuales?).

Dumas y Redish (1999) definen la usabilidad como: “un dispositivo es usable si las personas que usan el producto pueden hacerlo rápida y fácilmente para realizar sus propias tareas”. Y esta definición se basa en cuatro puntos: i) la usabilidad significa enfocarse en los usuarios; ii) las personas usan los productos para ser productivos; iii) los usuarios son personas ocupadas que intentan realizar tareas; y iv) los usuarios deciden cuándo un producto es fácil de usar. Esta definición, aunque no es muy precisa, es similar a la de la ISO 9241-11 ya que considera a las personas, las tareas que van a realizar, una referencia de tiempo y la facilidad del producto para el usuario.

Centrarse en los usuarios significa saber quiénes son los usuarios, comprenderlos y trabajar con ellos.

Para desarrollar una IHC utilizable, se debe considerar la opinión de los usuarios finales reales, los usuarios que van a trabajar con el producto. Hablar con la gente que rodea a los usuarios finales puede ayudar a hacer un mejor análisis de los requisitos pero es fundamental contar con la opinión de los usuarios reales. Los diseñadores deben ser conscientes de que el producto tiene que ofrecer un beneficio al usuario porque el producto es una herramienta, no un objetivo. La realización de las tareas tiene que ser más rápida, mejor, más cómoda o brindar cualquier otro beneficio que el usuario encuentre en su desempeño o en sus preferencias personales. Los usuarios necesitan que el producto sea fácil de usar y de comprender.

La usabilidad no es una propiedad unidimensional de una interfaz de usuario, ya que relaciona múltiples componentes asociados con cinco atributos (Hustak y Krejcar, 2016):

1. **Capacidad de aprendizaje:** Cuanto más fácil es aprender un sistema, más rápido el usuario puede obtener un beneficio de él, por lo que es deseable que el sistema o producto sea fácil de usar y de comprender.
2. **Eficiencia:** El producto debe ser eficiente, por lo que una vez que el usuario sepa cómo utilizar el sistema, podrá obtener un alto nivel de productividad.
3. **Memorizable:** Debe ser fácil para el usuario recordar cómo operar con el sistema.
4. **Errores:** Es importante que el sistema tenga una baja tasa de errores, una fácil

recuperación de los errores, si aparecen, y no errores catastróficos.

**5. Satisfacción:** Es importante que al usuario le guste el sistema. Este debe estar subjetivamente satisfecho con el producto.

La utilidad es otro factor deseado en las IHC. La diferencia entre utilidad y usabilidad radica en que la utilidad es la capacidad del producto para hacer lo que se necesita (Manresa Yee, 2009), esto es, la funcionalidad; y la usabilidad es qué tan bien los usuarios pueden hacer uso de la funcionalidad del producto, por ejemplo, midiendo los así llamados cinco atributos mencionados anteriormente.

Otros factores que se deben tener en cuenta para aceptar un sistema IHC están relacionados con el costo, la confiabilidad y la compatibilidad. Se observa que en general hay muchos parámetros posibles de controlar para asegurar el logro de un sistema utilizable. No hay consenso ni acuerdo, sin embargo, muchos autores coinciden con la mayoría de las características en estudio y comparten la importancia de que los usuarios estén incluidos en el proceso de diseño y desarrollo, y la necesidad de controlar todos aquellos factores que pueden ayudar en el proceso, alcanzando un producto eficiente, eficaz y satisfactorio.

Para ayudar a la inclusión de la usabilidad en el proceso general, dan cuatro principios al desarrollar sistemas: i) enfocarse temprano y continuamente en los usuarios; ii) integrar los aspectos de la usabilidad definidos en la fase de requerimientos; iii) probar las versiones con los usuarios de manera temprana y continua; y iv) integrar el diseño final de la IHC.

Las consideraciones descritas anteriormente ayudarán a desarrollar las funcionalidades

que realmente se necesitan y se van a utilizar en el desarrollo de una IHC. Probar un prototipo en las primeras etapas hará que las modificaciones en el sistema sean menos costosas y el usuario participará en las decisiones de diseño. Además, los costos que aparecen por las tareas de mantenimiento y soporte también disminuyen, los usuarios necesitan menos tiempo para aprender el sistema y la calidad del sistema aumenta.

## Evaluación de usabilidad en IHC

La usabilidad se utiliza para comprender mejor las necesidades y requisitos del usuario y para ofrecer y mejorar la experiencia del usuario (Isaías y Blashki, 2014; Marsh, 1990). Para aceptar una IHC como usable, se debe recopilar información sobre los parámetros y atributos mencionados antes.

Básicamente, la evaluación consiste en medirlos y decidir si los resultados se consideran suficientemente buenos o no. Para obtener esta información, los usuarios finales deben utilizar el sistema y realizar un conjunto de tareas predefinidas o, en algunos casos, sus propias tareas. Se deben analizar y registrar todos los problemas que se observen: qué es fácil o difícil para los usuarios al usar el sistema, cómo lo usan, qué tan rápido lo usan (rápido, es decir, en cuántos botones, menús o ventanas deben hacer clic para realizar un proceso específico), la rapidez con que lo aprenden y todos los demás aspectos relacionados con el uso del sistema. Lo ideal es contar con un equipo de desarrollo multidisciplinario con experiencia en diferentes áreas como informática, usabilidad o diseño de interfaces para poder recopilar toda la información posible y aplicarla en el desarrollo del sistema o producto más utilizable y eficiente.

Se deben establecer metas cuantitativas y cualitativas para el sistema durante todo el proceso para evaluar realmente la usabilidad y ayudar en el proceso de decisión de diseño. Cómo elegir esas medidas de control es una pregunta difícil de responder. La usabilidad no se puede medir directamente, sino que se deben encontrar aspectos de la usabilidad que sí se puedan medir con base en el uso final que vaya a tener. Se pueden recopilar dos tipos de métricas de usabilidad durante una prueba. Estas métricas son en esencia información objetiva y subjetiva:

- **Información objetiva:** Datos objetivos de desempeño que se pueden capturar durante la sesión de prueba de usabilidad y que representan lo que realmente sucedió. Esta información es cuantitativa, como, por ejemplo: tiempo para terminar una tarea, tiempo dedicado a recuperarse de errores, tasas de finalización de tareas exitosas o tasas de error.
- **Información subjetiva:** Datos subjetivos de lo que el usuario pensó y cómo se sintió al usar la aplicación y su interfaz. Los datos subjetivos pueden ser cualitativos o cuantitativos, como por ejemplo, si se presenta una escala Likert (Jebb et al., 2021) (escala psicométrica comúnmente utilizada en cuestionarios, donde los encuestados especifican su nivel de acuerdo mediante declaración) y se le pide al usuario que califique qué tan fácil o difícil es utilizar un sistema utilizando esta escala; se obtendrá una percepción subjetiva transformada en una respuesta cuantitativa. Para medir la información subjetiva se pueden controlar las calificaciones de lo fácil que fue instalar el producto, lo fácil que fue aprender a usar el sistema, las preferencias del sistema o los comentarios espontáneos.

Con frecuencia, el término usabilidad se define por aquellos aspectos que se pueden medir y, por lo tanto, es importante seleccionar un conjunto de medidas válidas de la usabilidad. En general, las medidas más comunes se pueden agrupar en tres categorías: eficacia, eficiencia y satisfacción.

A su vez, estos grupos se pueden dividir en subgrupos basados en parte en las medidas de usabilidad mencionadas en libros referentes como en Kumar y Arjunan (2016), en libros sobre ciencia del comportamiento (Fisher et al., 2011) y en discusiones bien conocidas sobre medidas de usabilidad (Hustak y Krejcar, 2016) y en parte sobre las similitudes encontradas en las medidas de usabilidad utilizadas por los estudios reportados en Manresa Yee (2009). Lo más relevante es seleccionar medidas adecuadas de usabilidad y entender la relación entre ellas. Han surgido muchas discusiones sobre cómo medir la usabilidad y qué afecta la usabilidad, como por ejemplo el tiempo, la estética, la cultura, la retroalimentación, la visualización gráfica, el flujo, la diversión, la alegría y muchas otras cuestiones (Kumar y Arjunan, 2016; Manresa Yee, 2009):

1. **Medición de la efectividad:** La efectividad tiene que ver con el desempeño de las tareas, la exactitud y la precisión con que el usuario logró los objetivos. Para medir la precisión y la completitud es necesario indicar un conjunto de criterios operativos para considerar el logro de una tarea. Los aspectos que pueden medirse son el número o porcentaje de tareas que los usuarios completan con éxito, la precisión con la que los usuarios completan las tareas, las tasas de error, la precisión de los usuarios al señalar o manipular objetos de la interfaz de usuario, entre otros.

2. **Medición de la eficiencia:** La eficiencia es la cantidad de esfuerzo que se requiere para lograr el nivel de efectividad en el desempeño de las metas. La eficiencia es la relación entre el nivel de efectividad y los recursos utilizados. Toma en cuenta recursos como tiempo, esfuerzo físico o mental o costos materiales y económicos.
3. **Medición de la satisfacción:** Con frecuencia la satisfacción se mide mediante cuestionarios de satisfacción. Hay diferentes momentos en los que se pueden hacer preguntas: antes de realizar la prueba, después de cada tarea y al final de la prueba (conjunto de tareas). El cuestionario de prueba previa suele recoger información sobre el usuario tales como antecedentes o experiencia; esto permite comprender e interpretar los datos obtenidos y así poder agrupar usuarios, por ejemplo, por experiencia. Los cuestionarios posteriores a la tarea son necesarios para obtener una reacción inmediata después de una tarea en particular, para ver si la percepción del usuario a lo largo del tiempo cambia entre las tareas. Y, finalmente, el cuestionario posterior a la prueba se realiza después de que se han realizado todas las tareas y, por lo tanto, el usuario ha pasado tiempo utilizando el sistema. Por lo general, estos cuestionarios incluyen preguntas generales que podrían aplicarse a cualquier producto, como “¿qué tan fácil fue usar el sistema?” y también hay un conjunto de preguntas específicas que solo se aplican al sistema o producto en particular. Además, la satisfacción es una medida correlacionada hasta cierto punto con otras medidas de usabilidad como la eficacia y la eficiencia (Sauro y Kindlund, 2005). Algunas preguntas de la encuesta incluso

tratan directamente sobre hechos de eficacia y eficiencia.

Aun cuando no existe un acuerdo sobre qué medidas utilizar, se debe tener en cuenta que todas las métricas que se apliquen para la evaluación de la usabilidad deben brindar información que se pueda utilizar para identificar medidas de efectividad, eficiencia y satisfacción junto con otros parámetros deseados de usabilidad/aceptabilidad que se quieren controlar. La ISO 9241-11 advierte que es necesario medir al menos un factor de efectividad, uno de eficiencia y otro de satisfacción.

Estas métricas deben considerarse en todas las pruebas de usabilidad ya que la correlación entre estas no está totalmente demostrada (Frokjer et al., 2000); sin embargo, se pueden tener en cuenta otros factores además de las tres medidas incluidas en la norma ISO 9241-11 (ISO, 2018). Actualmente no existen reglas generales para elegir y combinar estas mediciones, ya que están fuertemente relacionadas con el contexto aplicado. Para esto último, los autores sugieren analizar las hipótesis sobre las métricas que se establezcan durante la fase de levantamiento de requerimientos.

### Evaluación de usabilidad para IHC orientadas a personas con limitación de miembros superiores

El Comité Europeo de Normalización ha redactado la norma estándar ISO 9241-9 (ISO, 2000); es decir, los requisitos ergonómicos para el trabajo de oficina con terminales de visualización (VDT) - parte 9: Requisitos para dispositivos de entrada sin teclado. Esta norma fue estipulada en el año 2000 e incluye métodos potenciales para probar este tipo de sistemas, pero solo comprende dispositivos para los que existe suficiente información

ergonómica publicada como ratones, *joysticks*, etc. No cubre rastreadores oculares, interfaces de voz, controladores montados en la cabeza, guantes de datos, dispositivos para usuarios discapacitados, dispositivos controlados con el pie o interfaces basadas en el rostro que utilizan técnicas de visión por computadora o interfaces cerebro-computador.

Sin embargo, hay muchos requisitos de diseño y métodos descritos que pueden usarse para mejorar y probar las IHC orientadas a personas con limitaciones de miembros superiores, basados en técnicas de visión por computadora, ya que es un dispositivo señalador.

La ISO 9241-9 proporciona métodos potenciales para probar y evaluar en dispositivos de entrada aspectos de usabilidad como eficiencia o efectividad y también describe escalas de calificación de comodidad. El procedimiento de evaluación define condiciones ambientales, ajustes del entorno, recomendaciones de condiciones de cada sesión, selección de usuarios y otros.

Este documento además contiene dos partes diferentes en la evaluación: factores del sistema y factores humanos. La evaluación de los factores del sistema se basa en la Ley de Fitts (Zhai, 2002), que predice que el tiempo requerido para moverse rápidamente a un área objetivo es una función de la distancia y el tamaño del objetivo, y la evaluación de los factores humanos consiste en un cuestionario que comprende 12 preguntas sobre los niveles de comodidad y esfuerzo que implica el funcionamiento del sistema. La medida es una escala de Likert de intervalo de 7 puntos (Manresa Yee, 2009).

Hay un conjunto de acciones que se esperan de los dispositivos señaladores donde no

hay “señalamiento directo” para maximizar el control de la interacción con la computadora. Estas acciones son:

- **Clic:** Evento que emula la presión y la liberación de un botón o punto de actuación en un dispositivo de entrada. Trabajando en un sistema operativo, el clic ofrece todas las posibilidades que utiliza el sistema operativo como por ejemplo el clic del botón izquierdo para seleccionar, el doble clic del botón izquierdo para ejecutar o el clic del botón derecho para abrir menús.
- **Arrastrar:** Evento utilizado para mover uno o más objetos en una pantalla, trasladándolo a lo largo de una ruta determinada, guiado por un puntero.
- **Entrada manual libre:** El dispositivo de entrada controla el movimiento del cursor sin ninguna restricción, siguiendo la entrada manual del usuario. Por ejemplo, usar las flechas de tecla para controlar el *mouse* no permitiría al usuario moverse libremente.
- **Señalar:** Operación con una interfaz gráfica de usuario en la que se usa un dispositivo de entrada para mover una imagen de pantalla pequeña (por ejemplo, un cursor) a una ubicación específica en la misma pantalla.
- **Seleccionar:** Elegir uno o más elementos en una pantalla.
- **Trazar:** Seguir el contorno de una imagen moviendo el cursor o dispositivo de entrada sobre las líneas o la forma de una imagen.
- **Seguimiento:** Mover un puntero de un símbolo predefinido por la superficie de una

pantalla de visualización para seguir un objetivo.

La retroalimentación (visual, táctil, auditiva o de cualquier otro tipo) proporcionada por la IHC también es importante ya que es un reconocimiento de que la acción de un usuario ha desencadenado una reacción en el sistema y es parte del ciclo de comunicación. La ISO 9241-9 provee métodos de medición de los requisitos normativos tales como movimientos de puntero, retroalimentación de eventos o eventos sostenidos. En general, se describen tres tipos de medición:

- **Medición directa:** Una medida que necesita una herramienta o instrumento para cuantificar características.
- **Observación directa:** La percepción o notación de características específicas del dispositivo de entrada por uno o más observadores independientes. Normalmente da como resultado una respuesta (Sí o No) dependiendo de la observación de la presencia o ausencia de la característica.
- **Prueba de desempeño:** Un método que determina la correspondencia entre los requisitos especificados y las características correspondientes de un dispositivo de entrada. Si se lleva a cabo una prueba de rendimiento, se deben proporcionar la metodología de diseño del experimento, el análisis y los resultados.

La eficiencia y la eficacia de las IHC se pueden probar utilizando los procedimientos de prueba incluidos en los anexos de la norma ISO (2000). El proceso de evaluación prueba las siguientes primitivas de tarea: señalar, seleccionar, arrastrar, rastrear y entrada libre manual. No todas las tareas deben analizarse

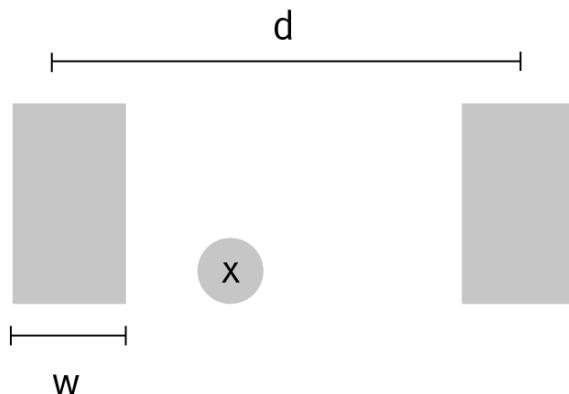
para todos los dispositivos o sistemas de entrada. Solo se inspeccionan los componentes considerados esenciales para el funcionamiento del sistema. Las pruebas proporcionan una medida del rendimiento. Las pruebas potenciales para estudiar el desempeño de los usuarios son: golpeteo (*tapping*) en una dirección (horizontal), golpeteo multidireccional, arrastre, trazo a mano alzada (dibujo), entrada a mano alzada (imágenes o caracteres escritos a mano) y agarre y estacionamiento (cambio de dispositivo).

Las tareas seleccionadas para la prueba deben estar determinadas por el uso previsto del dispositivo con una población de usuarios en particular. La prueba de golpeteo es la prueba más utilizada, que se ha identificado en la revisión de la literatura, para evaluar los dispositivos señaladores para IHC orientada personas con limitaciones de miembros superiores.

Para la prueba de golpeteo el estándar describe tareas de golpeteo unidireccionales y multidireccionales para evaluar un movimiento de apuntado a lo largo de un eje o en varias direcciones. La prueba de golpeteo en una dirección consiste en dos rectángulos de ancho  $w$  y una distancia de centro a centro  $d$  (Figura 4). La tarea consiste en señalar y hacer clic, a lo largo de un eje, dentro de cada rectángulo,  $n$  veces. La prueba comienza cuando el usuario primero mueve el cursor a un rectángulo y activa un evento. La prueba tiene que ser realizada varias veces con diferentes dificultades, modificando la distancia del objetivo  $d$  y el ancho del objetivo  $w$ .

Así mismo, la tarea de golpeteo multidireccional consiste en un círculo con objetivos secuenciales que se espacian equitativamente alrededor de un círculo. Los objetivos deben disponerse de modo que los movimientos

**Figura 4**  
*Tarea de golpeteo unidireccional.*



Fuente: Elaboración propia.

34  
sean casi iguales al diámetro del círculo. La sesión de prueba comienza después de que el usuario apunta al objetivo más alto y finaliza cuando se completa la secuencia (Figura 5). La prueba debe realizarse con diferentes dificultades, variando el tamaño del círculo.

Las medidas de evaluación más comunes son la velocidad y la precisión. La velocidad

generalmente se informa con el tiempo de movimiento (MT) y la precisión generalmente se informa como una tasa de error, el porcentaje de selecciones realizadas fuera del objetivo. Pero estas dos medidas pueden combinarse en la medida de rendimiento.

Aunque la ley de Fitts (Zhai, 2002) se estableció hace bastante tiempo, todavía se usa como herramienta de evaluación en la interacción humano-computador y su poder se basa en su capacidad para proporcionar comparaciones de desempeño entre dispositivos señaladores independiente de las tareas, unificando la velocidad y el rendimiento en un solo indicador, D. Este indicador es el cálculo principal para seleccionar, señalar, arrastrar y rastrear. Adicionalmente, este se mide en bits por segundo, y es una medida compuesta derivada tanto de la velocidad como de la precisión en las respuestas. Específicamente, se calcula como se muestra en la ecuación (1).

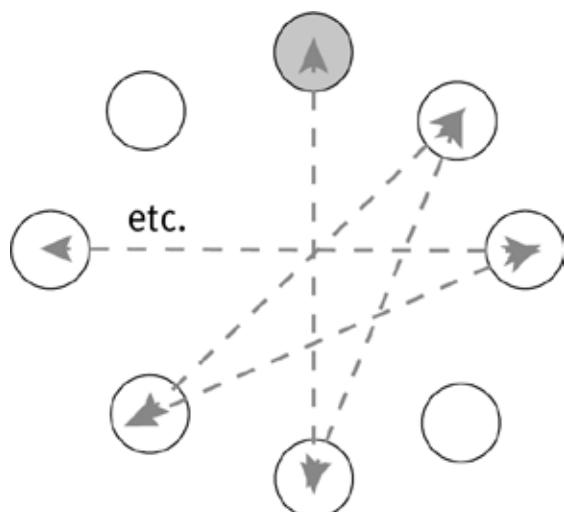
$$D = \frac{ID}{MT} \quad (1)$$

Donde MT es el tiempo de movimiento promedio en segundos, calculado desde el inicio del movimiento del dispositivo de entrada hasta la selección del objetivo para n ensayos dentro de la misma condición; e ID es el índice efectivo de dificultad para una tarea de movimiento. ID es una medida en bits de la precisión del usuario lograda al realizar una tarea expresada como se muestra en la ecuación (2).

$$ID = \log\left(\frac{A_e}{W_e}\right) + 1 \quad (2)$$

Donde  $A_e$  es la respectiva amplitud de movimiento y  $W_e$  es el ancho efectivo del objetivo mostrado, es decir, es el ancho de la distribución de las coordenadas de selección calculadas sobre una secuencia de pruebas. Estos

**Figura 5**  
*Tarea de golpeteo multidireccional.*



Fuente: Elaboración propia.

dos factores se definen en las ecuaciones (3) y (4).

$$A_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (3)$$

$$W_e = 4.133 * SD \quad (4)$$

Donde  $D_i$  es la distancia trasladada de la  $i$ -ésima prueba y  $SD$  es la desviación estándar en las coordenadas de selección medidas a lo largo del eje de aproximación al objetivo. En la tarea de golpeteo unidireccional,  $D_i$  es la diferencia absoluta en las coordenadas  $x$ ; en la tarea de golpeteo bidimensional,  $D_i$  es la distancia euclíadiana. El coeficiente 4.133 de la ecuación (4) corresponde a una tasa de error nominal del 4%. En otras palabras, se cubre el 96% de la distribución espacial de los puntos de respuesta.

En el caso particular de personas con limitaciones motrices, el desempeño obtenido mediante la ecuación (1) puede dar una medida para comparar el rendimiento entre diferentes dispositivos y usuarios, pero no puede explicar por qué existen esas diferencias. Para tratar de explicar las diferencias de desempeño se pueden estudiar y analizar los recorridos realizados por el usuario utilizando un dispositivo en particular. A raíz de esto han surgido nuevas medidas para comparar diferencias entre dispositivos en tareas de puntería de precisión.

En el trabajo de MacKenzie et al. (2001) se estudia la trayectoria del movimiento para intentar establecer las razones de las diferencias existentes en desempeño mediante la definición de siete nuevas medidas. Estos consideran el rendimiento como una medida bruta

que carece de información sobre el movimiento durante un juicio. Así mismo, la ruta donde el usuario mueve el puntero desde la posición inicial directamente al centro del objetivo como la ideal y la tarea de selección de objetivo perfecta es aquella en la que el usuario se mueve en la ruta ideal y presiona el botón del dispositivo para seleccionar el objetivo.

### Investigaciones recientes sobre usabilidad en IHC en pacientes con limitaciones motrices

En la Tabla 1 se compilán investigaciones conducentes al desarrollo de IHC orientadas a personas con limitaciones motrices, recopiladas utilizando motores de búsqueda como Scopus, Web of Science, Google Academics, PubMed y Springer Link. Se filtraron aquellos que se encontraban en una ventana de temporalidad de 2011 a 2021. Por cada trabajo se determinó si se aplicaron las métricas de usabilidad y si además las pruebas se realizaron con sujetos de control y/o con limitaciones motrices.

A partir de la Tabla 1 se puede observar que en general existe una baja proporción de trabajos que evalúen los tres aspectos de usabilidad. Además, es preocupante que las pruebas en su mayoría sean con sujetos de control y no con sujetos reales.

Lo anterior puede deberse a que las investigaciones estén en fase preliminar o que el alcance esté limitado. Sin embargo, es menester advertir que siguiendo los principios de diseño, las pruebas, aun cuando sean iniciales, deben trabajarse con los usuarios finales desde la concepción de la IHC para recopilar la mayor cantidad de información que conduzca a IHC realmente usables en personas con limitaciones motrices.

**Tabla 1**

*Investigaciones recientes (2011-2021) en IHC orientada pacientes con limitaciones motrices. Sujetos de control hace referencia a sujetos sin limitación motriz, sensorial o cognitiva.*

Autores/Año	Tipo de IHC	Sujetos con limitación motriz	Prueba de usabilidad
(Šumak et al., 2019)	Interfaz cerebro computador utilizando dispositivo EEG - Emotiv EPOC	Sujetos de control y ocho adultos con limitación severa motora	Eficacia: Sí Eficiencia: Sí Satisfacción: Sí
(Ferrín-Bolaños et al., 2021)	Interfaz basada en gestos faciales utilizando técnicas de visión por computador	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: Sí
(Ubeda, lañez y Azorin, 2011)	Interfaz basada en EOG	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: Sí Satisfacción: No
(Forbes, 2013)	Interfaz basada en EMG e IMU.	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No
(Mosquera-De la Cruz et al., 2021)	Interfaz basada en voz utilizando técnicas de procesamiento de lenguaje natural	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No
(Deepika y Murugesan, 2015)	Interfaz basada en movimiento de los ojos	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No
(Carrera, Alonso, de la Rosa y Aguiar, 2013)	Interfaz basada en parpadeos	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No
(Malik, Kumar y Jain, 2020)	Interfaz basada en gestos del rostro	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No
(Matos, Filipe y Couto, 2016)	Interfaz basada en gestos del rostro	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No
(Sambrekar y Ramdasi, 2015)	Interfaz basada en movimientos del ojo	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No
(Abiyev y Arslan, 2020)	Interfaz basada en movimientos del ojo	Sujetos de control	Eficacia: Sí Eficiencia: No Satisfacción: No

Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

La usabilidad es el aspecto central del proceso de IHC. Este permite mejorar las características del mismo y satisfacer las necesidades de los usuarios. Los principios de diseño de IHC ayudan a los diseñadores, analistas y usuarios a identificar las necesidades del sistema a partir del estilo del texto, las fuentes, el diseño, los gráficos y el color, mientras que la usabilidad confirmará si el sistema es eficiente, efectivo, seguro, utilitario, fácil de aprender, fácil de recordar, fácil de utilizar y evaluar prácticas visibles y proporcionar satisfacción funcional a los usuarios.

Aun cuando trabajos recientes dan cuenta que muy poco se usan los conceptos de usabilidad en el diseño de IHC, la adopción de estos aspectos en el proceso de desarrollo del sistema, incluido el diseño sostenible, medirá y logrará los objetivos y tareas de los usuarios mediante el uso de una tecnología específica. Finalmente, con este documento utilizado como guía, se espera que los diseñadores de IHC incluyan los aspectos de usabilidad aquí desarrollados en su planeación para mejorar la aceptación y el rendimiento de sus tecnologías y satisfacer las necesidades de accesibilidad de las personas con limitaciones motrices.

## Referencias

- Abiyev, R. H., y Arslan, M. (2020). Head mouse control system for people with disabilities. *Expert Systems*, 37(1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/exsy.12398>
- Armagno, G. (2012). The Role of HCI in the Construction of Disability, (September). <https://doi.org/10.14236/ewic/hci2012.71>
- Barreto, A. B., Scargle, S. D., y Adjouadi, M. (2000). A practical EMG-based human-computer interface for users with motor disabilities. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 37(1), 53–64.
- Carrera, A., Alonso, A. A., de la Rosa, R., y Aguiar, J. M. (2013). Biomechanical Signals Human-Computer Interface for Severe Motor Disabilities. *E-Health Telecommunication Systems and Networks*, 02(04), 65–71. <https://doi.org/10.4236/etsn.2013.24009>
- Deepika, S. S., y Murugesan, G. (2015). A novel approach for Human Computer Interface based on eye movements for disabled people. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, ICECCT 2015*, 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2015.7226124>
- Dumas, J. S., y Redish, J. C. (1999). *A Practical Guide to Usability Testing*. United Kingdom: ACM Digital Library. Retrieved from <https://dl.acm.org/doi/10.5555/600280>
- Ferrín-Bolaños, C., Mosquera-DeLaCruz, J., Piñon-Murcia, J., Moctezuma-Ruiz, L., Burgos-Martínez, J., Aragón-Valencia, L., y Loaiza-Correa, H. (2021). Interfaz humano-computador basada en gestos faciales y orientada a la aplicación WhatsApp para personas con limitación motriz de miembros superiores. *TecnoLógicas*, 24(50), e1722. <https://doi.org/10.22430/22565337.1722>
- Ferrin Bolaños, C. D., y Loaiza Correa, H. (2018). Interfaz cerebro-computador multimodal para procesos de neurorrehabilitación de miembros superiores en pacientes con lesiones de médula espinal: una revisión. *Revista Ingeniería Biomédica*, 12(24), 35–46. <https://doi.org/10.24050/19099762.n24.2018.1222>
- Fisher, W. W., Piazza, C. C., y Roane, H. S. (2011). *Handbook of Applied Behavior Analysis*.

- Forbes, T. (2013). *Mouse HCI Through Combined EMG and IMU*. University of Rhode Island. Retrieved from <https://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1042&context=theses>
- Frokjer, E., Hertzum, M., y Hornbæk, K. (2000). Measuring usability. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '00* (Vol. 2, pp. 345–352). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/332040.332455>
- Grandhi, S. (2015). Educating ourselves on HCI education. *Interactions*, 22(6), 69-71. <https://doi.org/10.1145/2834811>
- Harte, R., Glynn, L., Rodríguez-Molinero, A., Baker, P. M., Scharf, T., Quinlan, L. R., y ÓLaighin, G. (2017). A Human-Centered Design Methodology to Enhance the Usability, Human Factors, and User Experience of Connected Health Systems: A Three-Phase Methodology. *JMIR Human Factors*, 4(1), e8. <https://doi.org/10.2196/humanfactors.5443>
- Hornbæk, K. (2006). Current practice in measuring usability: Challenges to usability studies and research. *International Journal of Human Computer Studies*, 64(2), 79–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2005.06.002>
- Hustak, T., & Krejcar, O. (2016). Principles of usability in Human-Computer interaction. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 354, 51-57. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-47895-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47895-0_7)
- Isaías, P., y Blashki, K. (2014). *Human-Computer Interfaces and Interactivity*. (P. Isaías y K. Blashki, Eds.). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-6228-5>
- ISO. ISO 9241-9:2000 Ergonomic requirements for office workwith visual display terminals (VDTs) - Part 9: Requirements for non-keyboard input devices., Pub. L. No. ISO 9241 Part 9 (2000). Retrieved from <https://www.userfocus.co.uk/resources/is09241/part9.html>
- ISO. ISO 9241-11:2018(en) Ergonomics of human-system interaction - Part 11: Usability: Definitions and concepts (2018). Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>
- Jebb, A. T., Ng, V., y Tay, L. (2021). A Review of Key Likert Scale Development Advances: 1995–2019. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.637547>
- Kumar, D. K., y Arjunan, S. P. (2016). *Human - Computer Interface Technologies for the Motor Impaired*. (M. J. Scherer y D. Muller, Eds.). CRC Press, Taylor y Francis Group.
- MacKenzie, I. S., Kauppinen, T., y Silfverberg, M. (2001). Accuracy measures for evaluating computer pointing devices. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '01* (pp. 9-16). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/365024.365028>
- Malik, S., Kumar, N., y Jain, A. (2020). Head-Gesture-Based Human–Computer Interface for Disabled People (pp. 1525–1534). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0633-8\\_149](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0633-8_149)
- Manresa Yee, C. S. (2009). *Advanced and natural interaction system for motion-impaired users*. Universitat de les Illes Balears Departament. Retrieved from <http://www.tdx.cat/TDX-0923109-131624>
- Marsh, S. (1990). Human computer interaction: an operational definition. *ACM SIGCHI Bulletin*, 22(1), 16-22. <https://doi.org/10.1145/101288.101291>

- Matos, A., Filipe, V., y Couto, P. (2016). Human-computer interaction based on facial expression recognition: A case study in degenerative neuromuscular disease. *ACM International Conference Proceeding Series*, 8-12. <https://doi.org/10.1145/3019943.3019945>
- Mosquera-De la Cruz, J., Ferrin-Bolaños, C., Santander-Ariza, D., Rosero-Ramos, K., Libreiros-Segura, M., y Loaiza-Correa, H. (2021). Sistema de reconocimiento de voz para controlar la aplicación whatsapp orientado a personas con limitaciones motrices. *Revista Lumen Gentium*, 4(2), 101–115. <https://doi.org/10.52525/lg.v4n2a8>
- Sambrekar, U., y Ramdasi, D. (2015). Human computer interaction for disabled using eye motion tracking. In *2015 International Conference on Information Processing (ICIP)* (pp. 745–750). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INFOP.2015.7489481>
- Sauro, J., y Kindlund, E. (2005). A method to standardize usability metrics into a single score. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 401–409). New York, NY, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/1054972.1055028>
- Šumak, B., Špindler, M., Debeljak, M., Heričko, M., y Pušnik, M. (2019). An empirical evaluation of a hands-free computer interaction for users with motor disabilities. *Journal of Biomedical Informatics*, 96(March 2018), 103249. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2019.103249>
- Ubeda, A., Iañez, E., y Azorin, J. M. (2011). Wireless and Portable EOG-Based Interface for Assisting Disabled People. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(5), 870–873. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2160354>
- Weyers, B., Bowen, J., Dix, A., y Editors, P. P. (2017). *Human–Computer Interaction Series The Handbook of Formal Methods in Human-Computer Interaction*. (B. Weyers, J. Bowen, A. Dix, & P. Palanque, Eds.) (1st ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51838-1>
- Zhai, S. (2002). *On the validity of throughput as a characteristic of computer input*. IBM Research Center, Almaden, California. San Jose, CA 95120-6099. Retrieved from <https://web.archive.org/web/20070824104223/http://www.almaden.ibm.com/u/zhai/papers/Zhai-IBMRepRJ10253.pdf>