



Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería
Área de Diseño Mecánico

Correlación entre la Experiencia de Usuario y los Datos
Cuantitativos Generados durante la Interacción Humano-Robot

Tesis

Que para optar por el grado de:
Doctor en Ingeniería

Presenta:

Carlos Gilberto Gómez Monroy

Tutor principal:

Dr. Vicente Borja Ramírez (FI, UNAM)

Comité Tutor:

Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich	(FI, UNAM)
Dra. María del Pilar Corona Lira	(FI, UNAM)
Dra. Adriana Lira Oliver	(FA, UNAM)
Dr. Víctor Javier González Villela	(FI, UNAM)

Ciudad Universitaria, CDMX, México. Marzo del 2024.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Vo.Bo. Síno

Tutor principal: Dr. Vicente Borja Ramírez.....(FI, UNAM)

Sinodal 1: Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich.....(FI, UNAM)

Sinodal 2: Dra. María del Pilar Corona Lira.....(FI, UNAM)

Sinodal 3: Dra. Adriana Lira Oliver.....(FA, UNAM)

Sinodal 4: Dr. Víctor González Villela.....(FI, UNAM)

Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Conjunto Sur, Facultad de Ingeniería. Edificio X, Centro de Ingeniería Avanzada, Ciudad Universitaria, CDMX, México, C.P. 04510

Contenido

Contenido.....	3
Agradecimientos	5
Resumen de tesis	6
1. Introducción	7
2. Antecedentes	11
3. Objetivo: Correlación entre la UX y datos cuantitativos de la IHR.....	15
4. Preguntas de investigación	15
Pregunta general de investigación:.....	15
Preguntas específicas de investigación:.....	15
5. Hipótesis.....	16
6. Contribuciones	17
7. Metodología: Una Lámpara diseñada para “cometer errores”	18
7.1. Errores que “actúa” la Lámpara-robot y sus modos de operación.....	22
7.2. Diseño experimental	23
7.3. Herramienta metodológica para delimitar estudios con usuarios sobre las Interacciones Humano-Robot.....	26
Consentimiento informado: Nivel de Privacidad del usuario	26
Características experimentales del robot: 4 Partes de la Interacción Humano-Robot.....	30
Tipos de Resultados Experimentales en estudios sobre IHR	36
Aplicación de la herramienta metodológica al experimento con Lámpara-robot.....	41
7.4. Diseño de cuestionario para evaluar la experiencia del usuario	44
7.5. Diseño y fabricación de la Lámpara-robot:	44
Almacenamiento de datos cuantitativos de la interacción con la Lámpara-robot.....	48
8. Experimento: Interacción humano-robot en ambiente controlado	49
9. Resultados.....	54

9.1. Resultados Cualitativos: cuestionarios sobre la Experiencia de Usuario.....	55
9.2. Resultados Cuantitativos: datos guardados por la Lámpara-robot	60
9.3. Correlación de resultados cualitativos y cuantitativos	70
10. Conclusiones	74
11. Trabajo a futuro	76
12. Referencias.....	77
Apéndice A: Traducción cuestionario UX “Diseño Ciber-Empático”	81
Apéndice B: Materiales y Herramientas	87
Apéndice C: Fabricación de la Lámpara-robot.....	88
Apéndice D: Caracterización de los sensores de fuerza.....	92
Apéndice E: Cuadernillo para participantes.....	94
Apéndice F: Dibujos y modelos 3D de Lámpara robot.....	102
Apéndice G: Fotografías fabricación luminaria	106
Apéndice H: Fotos de fabricación Cabezal de iluminación	109
Apéndice I: Artículo SOMIM 2019.....	114
Apéndice J: Artículo SOMIM 2020	125

Agradecimientos

Este trabajo de investigación se realizó gracias a la inmensa ayuda y compañía de Angelvs, mi esposa, quien siempre ilumina el camino con la palabra correcta.

El doctorado se lo dedico a mi madre y a mi padre, quienes incansablemente me acompañan, motivan y enseñan.

Agradezco a mi sobrino, a mis hermanas y a mi hermano por ser un gran equipo y siempre apoyar.

Estoy profundamente agradecido con mi tutor y profesor, Dr. Vicente Borja, por la confianza e incontables horas invertidas en mi formación y en el desarrollo de esta investigación doctoral. Es un verdadero orgullo ser su alumno.

Con el mismo candor, agradezco al Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich por generar un espacio de trabajo de libre pensamiento y de trabajo duro, así como de saber empujar los proyectos a los más altos niveles de calidad.

Hago especial mención al sínodo, Dra. Pilar Corona, Dr. Víctor González y Dra. Adriana Lira, les agradezco haber estado presentes desde el inicio del doctorado y haberme ayudado a dar forma a esta investigación, así como de las muchas horas invertidas en los procesos de formación y evaluación.

También, destaco el trabajo realizado por el Ing. Israel Pérez, quien colaboró en las pruebas con usuarios y el procesamiento de los datos experimentales.

Por último, agradezco a CONAHCYT por la beca para estudios de tiempo completo a nivel doctorado y a la Universidad Nacional Autónoma de México que a través de los proyectos DGAPA-PAPIIT IT103320 e IT101718 permitió la compra de material para la elaboración de la Lámpara-robot.

Resumen de tesis

Es un hecho que los robots permean cada vez más en los diferentes ámbitos de la vida cotidiana, por lo que desarrollar estrategias y metodologías para evaluar y modelar las interacciones entre personas y robots es fundamental. El campo multidisciplinario de la Interacción Humano-Robot explota los escenarios donde se generan datos cualitativos y datos cuantitativos durante la interacción humano-robot. La herramienta más utilizada en el Diseño Mecánico para generar y evaluar datos cualitativos es el concepto de -Experiencia de usuario- (UX), en específico en este trabajo de tesis utilicé la definición de UX presente en el ISO 9241-210 "*Interaction principles: ergonomics of human-system interaction*".

Usualmente la experiencia del usuario la evalúa el usuario por medio de cuestionarios escritos. Una dificultad es que, los cuestionarios escritos para evaluar la Experiencia de Usuario en el campo de investigación de la Interacción Humano-Robot demandan contestar múltiples reactivos, por lo que realizar evaluaciones de la Experiencia de Usuario se convierte en una carga de trabajo para los investigadores. Por ejemplo, el cuestionario presentado por Ghosh et al., en 2016, tiene un total de 133 preguntas para la evaluación de Experiencia de Usuario; el cuestionario de Bartneck et al. de 2008 que tiene 25 preguntas; el cuestionario de Koumpouros et al. de 2016 que tiene 20 preguntas. Por ello, propuse evaluar la Experiencia de Usuario con una sola pregunta durante pruebas experimentales con voluntarios.

La idea central de este trabajo de investigación es correlacionar evaluaciones cualitativas de la Experiencia de Usuarios con datos recolectados a través de los sensores del robot durante la interacción humano-robot. En las pruebas experimentales, los participantes interactuaron con una lámpara de mesa robotizada de cinco grados de libertad (diseñada para actuar errores de funcionamiento). El reto técnico fue emparejar el cuestionario escrito de un solo reactivo con un protocolo *data-driven*; dada la complejidad que representa estudiar interacciones humano-robot donde varias características del robot se pueden personalizar al gusto del usuario. Una complejidad extra fue que el tiempo que le toma a cada participante terminar la actividad (lectura y preguntas de comprensión) varía de persona a persona.

Al proceso experimental asistieron 20 participantes en la etapa preliminar y 46 participantes en la etapa principal. En el experimento, los participantes utilizaron la Lámpara-robot durante 6 Pruebas, en cada prueba la Lámpara-robot "actuó" diferente número de "errores", y casi al término de cada prueba los participantes evaluaron su UX contestando un reactivo de 7 puntos en escala Likert. En la etapa principal se recabaron 276 evaluaciones cualitativas y 17,870,630 datos cuantitativos. De dicho experimento, resultaron correlaciones significativas entre datos cualitativos y cuantitativos; por ejemplo, el número de errores de robot (veces que el robot falla durante la prueba) muestra una correlación lineal con la evaluación de experiencia del usuario. En promedio por cada 14 "errores" de robot los participantes redujeron su evaluación en 0.6 puntos, mientras que por 43 "errores" de robot la evaluación promedio de experiencia del usuario se redujo en 1.2 puntos sobre evaluaciones base (pruebas donde el robot no cometió errores).

1. Introducción

En esta tesis comparto los resultados de mi investigación doctoral, en la cual apliqué el concepto de **Experiencia de Usuario** al estudio de la **Interacción Humano-Robot**. La Experiencia de Usuario es una variable experimental en la que se valora la opinión (o reacción emocional) de las personas al usar un robot o herramienta. Usualmente la Experiencia del Usuario se recaba por medio de cuestionarios escritos después de haber interactuado con el robot u objeto. Con el avance tecnológico, la adopción masiva de dispositivos inteligentes y robotizados, así como la creciente interconectividad entre dispositivos, se ha comenzado a desarrollar técnicas para que los robots evalúen la experiencia del usuario, migrando de la evaluación subjetiva del usuario (por medio de encuestas escritas) al análisis cuantitativo de la interacción humano-robot (de los datos recabados por el robot del usuario durante la interacción).

El objetivo principal de mi investigación fue determinar si utilizar protocolos *data-driven* durante interacciones entre humanos y robot (IHR) permite evaluar la Experiencia del Usuario (UX) con una sola pregunta; al correlacionar el resultado de las encuestas de evaluación de la Experiencia de Usuario con la información cuantitativa adquirida por el robot durante la interacción. Esto en contraste con los cuestionarios de experiencia de usuario actualmente disponibles que demandan contestar 20 o más reactivos (Koumpouros et al., 2016; Bartneck et al., 2009; Ghosh et al., 2017). Para comprobar la viabilidad del cuestionario de experiencia de usuario de una sola pregunta, realicé pruebas experimentales con usuarios. En las pruebas experimentales, los participantes interactuaron con una lámpara de mesa robotizada de cinco grados de libertad y dotada de botones capaces de sensor la fuerza con la que son apretados. Se les solicitó a los participantes: (1) ajustar a su gusto la altura, el ángulo, el brillo y la intensidad luminosa de la lámpara robotizada, (2) realizar lecturas de comprensión y preguntas relacionadas al texto, y (3) evaluar su experiencia de usuario dentro de una escala Likert de 7 puntos.

Generar metodologías para evaluar características del robot por medio del análisis de la experiencia de usuario contribuye a la repetibilidad de experimentos en el área de la interacción humano-robot, por lo que el uso de un cuestionario robusto, sencillo y rápido para evaluar la experiencia del usuario es un paso adelante en el desarrollo de robots capaces de producir interacciones más eficientes y con un impacto positivo en el usuario. Dado que no es trivial asegurar qué característica del robot o de la IHR motiva al usuario a evaluar su experiencia de usuario como -buena- o -mala-, o -positiva- o -negativa-, en esta tesis propongo que, si durante una interacción humano-robot se generan y almacenan gran número de datos provenientes de sensor al usuario (marco *data-driven*), se encontrarán correlaciones entre las calificaciones cualitativas de la experiencia del usuario y los datos cuantitativos adquiridos por el robot. Adelanto que, los resultados experimentales de esta investigación sí muestran una correlación significativa entre cómo los participantes apretaron los botones de la Lámpara-robot y cómo evaluaron su experiencia de usuario después de interactuar con la Lámpara-robot.

La investigación fue motivada por dos factores principales, uno es la definición de Experiencia de Usuario (UX) publicada en el ISO-9421-210 (ISO, 2019) y la otra es la tendencia actual en la que los aparatos de uso cotidiano cuentan con sensores que adquieren muchos datos durante la interacción

(Campbell et al., 2008; Mortier et al., 2015). Este constante incremento en el uso de objetos *inteligentes* y la automatización de espacios humanos ha llevado al aumento de la interacción humano-máquina o humano-robot (IHR). Por lo tanto, es de gran importancia estudiar a fondo dicho fenómeno, con tal de mejorar la experiencia del usuario al estar en contacto con dispositivos autómatas. La investigación actual de la Interacción Humano-Robot ha alcanzado un alto grado de madurez tecnológica, por ejemplo, los protocolos *data-driven* se basan en recolectar y analizar un gran volumen de datos provenientes de sensores a los usuarios (Konstan et al., 2012; Mortier et al., 2015). Aún más, la inteligencia artificial se ha vuelto una realidad; se desarrollan sistemas capaces de mejorar por sí mismos, que reconocen a los usuarios y generan nuevas propuestas de solución, mediante el aprendizaje de máquina, las redes neuronales u otras estrategias matemáticas (Xu, 2011).

Todos los objetos y espacios que presentan algún tipo de automatización requieren de una interfaz de usuario con la que se le presentan al usuario las posibilidades de manipulación e interacción. La experiencia del usuario al interactuar con un robot en gran medida depende de la interfaz de usuario.

Para evaluar la calidad de experiencia que una persona tiene al interactuar con un robot, es necesario tomar en cuenta la complejidad y variedad (física y psicológica) del humano. Asimismo, es necesario considerar que entre mayor sea el grado de automatización de un espacio u objeto, es más complejo, por lo que establecer parámetros de confort para la interacción humano-robot no es trivial. En ecosistemas altamente automatizados y robotizados (Wen Shen et al., 2017), existe el peligro de generar espacios con tantas opciones para su personalización que resulten en la distracción del usuario, al tener la -oportunidad- (libertad) de controlar muchas variables aumenta su carga cognitiva pudiendo resultar en decremento de la experiencia de usuario.

Parte de la motivación actual de robotizar los diferentes escenarios humanos (como lo son: escuelas, oficinas, hospitales, hogares, y fábricas) se debe a que estos espacios son compartidos por muchas personas, por lo que hay mucho valor en desarrollar interfaces capaces de adaptarse y aprender del usuario directo, así como de sus datos históricos, antropológicos y ergonómicos, para modificar la forma y contenido de los controles del robot, ya sean físicos o virtuales para generar la mejor experiencia posible (Nakagaki, 2019).

Con esto en mente, en este proyecto de investigación me enfoqué en evaluar la experiencia del usuario con una pregunta escrita de 7 puntos en escala Likert, esto mediante tres puntos: (1) analizar el uso de cuestionarios escritos para evaluar la experiencia del usuario aplicado la interacción humano robot, (2) diseñar y fabricar una bancada de pruebas robotizada, y (3) validar el uso de cuestionarios escritos para analizar la interacción humano-robot por medio de un estudio con usuarios.

Parte considerable de esta investigación fue realizar la bancada de prueba esencial para realizar el estudio con usuarios. Diseñé y fabriqué una Lámpara robotizada de mesa con 5 grados de libertad (altura, brillo, ángulo de proyección, sensibilidad de la interfaz, e iluminación de habitáculo), ver

Figura. 7.5.2, cuyo reto fue fabricar una lámpara robotizada que ‘actuara’ errores de funcionamiento.

Uno de los retos técnicos fue desarrollar una interfaz de usuario muy sensible a la vez que robusta. Para alcanzar este objetivo implementé amplificadores de instrumentación de alta ganancia y bajo ruido, así como sensores de fuerza de alta sensibilidad y repetibilidad (HoneyWell FSG15N). Estos botones instrumentados permiten sensar y almacenar el número de veces que los usuarios apretaron los botones, así como el tiempo que los apretaron y la fuerza. En la Figura 1.1 presento un muestrario de las diferentes características de los perfiles de fuerza resultantes de apretar un botón.

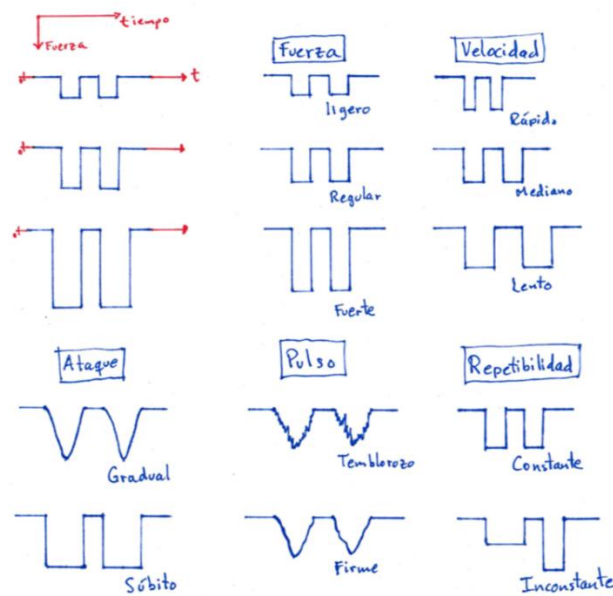


Figura 1.1. Características de un apretón: Características que definen el perfil de fuerza al presionar un botón.

En esta investigación doctoral implementé una metodología experimental; diseñé un experimento y un robot (lámpara de mesa robotizada de 5 grados de libertad) especialmente para evaluar el cuestionario de una sola pregunta como herramienta de valoración de experiencia de usuario, lo que es una novedad, debido a que lo usual es desarrollar cuestionarios escritos para evaluar a robots o escenarios preexistentes. El -cuestionario de experiencia del usuario de una sola pregunta- es una de las propuestas y contribuciones de mi investigación doctoral. Mi propuesta es utilizar un solo reactivo para evaluar la experiencia cualitativa del usuario en una escala de Likert de siete puntos. Ello como alternativa de medición de la experiencia de usuario durante la interacción humano-robot, siempre y cuando el robot opere en un protocolo “*data-driven*” (en los protocolos “*data-driven*” el robot genera mucha información sobre el usuario mediante sensores y almacena dicha información).

En esta tesis también presento los resultados experimentales de las pruebas con usuarios. Realicé dos etapas de pruebas experimentales en las que los participantes interactuaron con la Lámpara-robot y evaluaron su experiencia (calificando entre 1 y 7, donde 1 es lo más negativo y 7

lo más positivo). En la etapa preliminar asistieron 20 participantes; en esta etapa ajusté la programación de Lámpara-robot y corregí errores en el muestreo y almacenamiento de datos, y en la etapa principal asistieron 46 participantes, de los cuales se recabaron 276 evaluaciones cualitativas y 17,870,630 datos cuantitativos. Concluyo la tesis correlacionando las evaluaciones cualitativas (de cuestionario escrito por participantes) con los datos cuantitativos (adquiridos y almacenados por el robot).

A continuación, presento la sección de Antecedentes como marco de referencia; doy un panorama general del concepto de Experiencia de Usuario y del campo de investigación de la interacción humano-robot.

2. Antecedentes

La flexibilidad inherente al concepto -Experiencia de Usuario- se plasma en la definición formal de UX presentada por la Organización Internacional de Estándares, y publicado dentro del ISO 9241-210 *“Ergonomics of human-system interaction: Human-centred design for interactive systems”* (ISO, 2019). En esta norma se presenta la siguiente definición:

“Combination of user's perceptions and responses that result from the use and/or anticipated use of a system, product or service.”

Además, se complementa dicha definición por medio de notas. En la nota 1 se lee:

“Users' perceptions and responses include the users' emotions, beliefs, preferences, perceptions, comfort, behaviors, and accomplishments that occur before, during and after use.”

Gracias a esta flexibilidad el concepto de UX se ha utilizado exitosamente en múltiples áreas de la investigación en interacción humano-robot. Dentro de estas nuevas áreas de investigación convergen múltiples profesiones y visiones. Disciplinas como medicina, psicología, neurología, arquitectura y sociología, se mezclan con mecatrónica, diseño mecánico, ciencias de la computación, electrónica, metrología y otras áreas comúnmente asociadas al desarrollo robótico. Menciono algunos ejemplos de conceptos relacionados a la investigación de aspectos subjetivos de la interacción humano-robot: experiencia (Roto, 2006), *mindfulness* (Sliwinski et al., 2015), presencia (Lee & Nass, 2003), computación afectiva (Picard, 1995), preferencias personales (Bhattacharjee et al., 2020), bienestar (Jaques et al., 2015), interfaces computadora-cerebro, ergonomía cognitiva, navegación social (Höök et al., 2002), predicción de estados de salud (Taylor, 2020), robótica social (Paetzel et al., 2020), computación ubicua, interfaces hápticas, y robótica epigenética (Prince & Gogate, 2007).

Cada una de estas áreas utiliza y desarrolla métodos para evaluar la experiencia del usuario acorde a sus intereses y objetivos. Naturalmente, esto ha resultado en la existencia de una gran diversidad de metodologías y cuestionarios para la evaluación de la experiencia del usuario, aun siendo todos parte de la investigación interacción humano-robot. Algunos ejemplos de cuestionarios especializados en UX e Interacción Humano-Robot son: (1) *“Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire”* propuesto por Laugwitz et al. en 2008, (2) *“Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots”* publicado por Bartneck et al. en 2009, y (3) *“PYTHEIA: A Scale for Assessing Rehabilitation and Assistive Robotics”* por Koumpouros et al. en 2016. Para tener un panorama extenso y actual de la variedad de métodos utilizados en la IHR hay que referirse al trabajo presentado por Prati et al., recientemente publicada en 2022, en el que ofrecen una revisión bibliográfica extensiva y profunda de las escalas de evaluación para colaboración humano-robot.

Ahora, menciono un par de metodologías relevantes para la investigación de la Interacción Humano-Robot utilizando el concepto de Experiencia del Usuario: (1) *“The USUS Evaluation Framework for Human-Robot Interaction”* por Weiss et al. publicado en 2009, y (2) *“Design Methodology for the UX of HRI”* por Tonkin, et al. en 2018. En general, los cuestionarios

mencionados tienen más de 10 reactivos, mientras que la mayoría de las metodologías se enfocan en robots sociales y médicos. Además, en dichas metodologías la Experiencia del Usuario no se utiliza como un concepto único e indivisible, más bien utilizan la experiencia del usuario como descripción general para otros conceptos subjetivos que se desprenden de características humanas (por ejemplo, *Embodiment*, *Human-oriented perception*, *Feeling of security*, *Emotion*, y *Co-experience*) (Weiss et al., 2009).

A continuación, presento tres tipos de evaluaciones de la experiencia del usuario aplicados a la experimentación sobre Interacción Humano-Robot, que relacionan pruebas con usuarios y evaluaciones cualitativas. La división en tres tipos la hice con respecto a la siguiente pregunta: ¿Quién realiza la evaluación de la experiencia del usuario?

- Tipo 1. **El usuario** evalúa su propia experiencia. El mismo usuario: Cuestionarios UX en IHR.
- Tipo 2. **El robot** o sistema, con el cual el usuario interactúa directamente, pronostica una posible experiencia del usuario, apoyándose en datos obtenidos por sensores.
- Tipo 3. **Un observador externo**. La experiencia del usuario es asignada por un investigador que observa la interacción humano-robot.

Podría parecer que solo el usuario mismo es capaz de evaluar su propia experiencia (Tipo 1) (Ghosh et al., 2017; Alenljung et al., 2017). Sin embargo, encontramos ejemplos en la literatura donde un -tercero-, sistemas automatizados (Tipo 2) (Haeley et al., 1998; Song et al., 2021; Hernandez et al., 2021) o investigadores (Tipo 3) (Dautenhahn & Werry, 2002), otorgan una calificación a la experiencia de los participantes al clasificar y cuantificar gestos faciales, lenguaje corporal, así como analizar sus expresiones verbales. Dado el avance tecnológico y el gran interés en evaluar la experiencia del usuario durante interacciones humano-robot, se han realizado experimentos donde los robots evalúan la experiencia del usuario, y en otros experimentos se ha probado que los robots pueden, incluso, moldear la experiencia del usuario (Xu et al. 2011).

Para las evaluaciones de Tipo 1 la forma más utilizada es el cuestionario escrito, parecido a las encuestas de satisfacción, pero tiene el fin de evaluar las características de diseño del producto (o robot). Este tipo de cuestionarios escritos son una evaluación de la UX que se hace después del hecho, es decir, el usuario interactúa con el robot y después emite su evaluación al contestar las preguntas escritas. Por ejemplo, en la evaluación de la experiencia de usuario presentada en 2008 por Laugwitz et al., los autores diferenciaron y clasificaron las correlaciones entre calificativos cualitativos utilizados por personas al reaccionar a una interacción con un robot. En la práctica, esto significa que la selección de palabras para formular los reactivos, así como las respuestas de los participantes es parte fundamental para generar la métrica, por mencionar un par de escalas y sus adjetivos contrapuestos propuestos por Laugwitz et al.: "*Attractiveness*" tiene adjetivos "*annoying*" y "*enjoyable*"; la escala de "*Stimulation*" tiene el par "*boring*" y "*exciting*". Tengo que aclarar que utilicé los términos en inglés debido a que este tipo de cuestionarios y escalas tienen que ser evaluadas, adaptadas y avaladas para cada idioma y región donde se quiera aplicar el experimento. Además, el propósito de la interacción humano-robot puede cambiar las necesidades metodológicas; no se tendrán los mismos requerimientos si se trata de un robot de ayuda médica,

o de un robot industrial en línea de producción. El uso del concepto de Experiencia del Usuario (UX) aplicado a la Interacción Humano-Robot como herramienta de evaluación es extenso y variado, como lo plasmé en el artículo *“Recomendaciones para la experimentación en el área de interacción entre humano y robot utilizando el concepto de Experiencia del Usuario”* publicado en 2019 (Gomez-Monroy et al., 2019) (ver Apéndice I).

Investigar la Interacción Humano-Robot ofrece muchas ventajas en un futuro donde la computación y la robótica serán ubicuas en la vida humana. Por ejemplo, en salud, se están desarrollando robots que cuidan a los adultos mayores (Sawik et al., 2023), robots enfocados en enseñar niños autistas (Alabdulkareem et al., 2022) y robots acompañantes para personas con Alzheimer (Koutentakis et al., 2020). Otra ventaja de estar en espacios altamente robotizados es la alta adaptabilidad de las interfaces. Por ejemplo, en espacios de trabajo industrializados el trabajo colaborativo entre humano y robot (Bonin et al., 2016) se ambiciona disminuir la carga física de los trabajadores al lograr que el robot tome en consideración su anatomía y genere rutas de movimiento que minimicen el esfuerzo del trabajador. No obstante, también existen peligros y contradicciones de vivir en un mundo repleto de sensores, micrófonos y cámaras; como lo es la pérdida de privacidad (Mackay, 1995).

Es importante tomar en cuenta la privacidad del usuario para realizar experimentos sobre la Interacción Humano-Robot. Debido a que **la privacidad del usuario impacta en su experiencia** (Solove, 2005; Tonkin et al., 2017; Wood et al., 2014). Múltiples publicaciones resaltan la importancia que tiene la percepción de privacidad que tienen los participantes durante las interacciones entre humano y robot (Vitale et al., 2018). También, se han explorado los efectos de la privacidad en robots interactivos, como es el caso del trabajo presentado por Tonkin et al.; en dicho trabajo los autores realizaron un experimento en un aeropuerto donde voluntarios interactuaron con un robot asistente (el robot contestaba preguntas sobre el horario de llegada y salida de los vuelos), el interés de dicho experimento era la reacción de las personas cuando: (1) el robot les solicitaba permiso para tomar su foto (usar la cámara), (2) el robot les solicitaba cuenta de correo electrónico, y (3) el robot les solicitaba la contraseña de su cuenta de Facebook (Tonkin et al., 2018). Un claro ejemplo de cómo la tecnología reduce nuestra privacidad es el uso de tecnologías de reconocimiento facial que permiten identificar a una persona y sus datos personales únicamente al procesar una fotografía (Kanade, 1973). Estos sistemas de reconocimiento facial son de uso generalizado en los gobiernos y grandes industrias, pero también se ha puesto a disposición del público en general de manera gratuita con librerías como OpenCV y OpenFace (Amos et al., 2016).

Con estos antecedentes, he descrito la problemática que representa la selección e implementación de cuestionarios escritos para la evaluación de la Experiencia de Usuario en experimentos sobre la Interacción Humano-Robot. Dicha problemática deja ver las ventajas de desarrollar un cuestionario breve (idealmente una sola pregunta) que pueda ser aplicado en diversos escenarios de Interacción Humano-Robot y a diversos tipos de robots.

Por lo anterior, la propuesta central de esta investigación doctoral se diferencia del estado del arte al considerar como indivisible el concepto de Experiencia del Usuario (conforme se define en el ISO 9241-210). Esto lo hago patente al proponer una evaluación cualitativa de la experiencia del

usuario (encuesta escrita), pero con la peculiaridad de contener únicamente **una pregunta de 7 puntos en escala Likert** (muestro la pregunta y cómo se utilizó durante las pruebas con usuarios en el Apéndice E), en vez de dividir la encuesta en múltiples reactivos y múltiples subconceptos, como es el caso de los 133 reactivos en el cuestionario implementado por Ghosh et al. (presento una traducción de tales reactivos en el Apéndice A).

Otra diferencia relevante entre los antecedentes y mi investigación doctoral es que decidí no implementar micrófonos ni cámaras en la bancada de pruebas (Lámpara-robot), al considerar la privacidad del usuario como característica medular en el diseño de la Lámpara robot, así como en el diseño experimental. En cambio, mi investigación ofrece una alternativa tecnológica, al explorar la posibilidad de robots capaces de reconocer la calidad de experiencia que está teniendo el usuario durante la interacción y adaptarse para mejorar dicha experiencia, utilizando únicamente información obtenida en los botones de la interfaz del robot (es decir, procurando mantener el anonimato del usuario).

A continuación, presento el Objetivo de la investigación, seguido de las Preguntas de investigación e Hipótesis antes de dar paso a las secciones de Metodología y Resultados.

3. Objetivo: Correlación entre la UX y datos cuantitativos de la IHR

Determinar si utilizar protocolos *data-driven* durante interacciones entre humanos y robot permite evaluar la Experiencia del Usuario (UX) con una sola pregunta, al correlacionar el resultado de las encuestas de evaluación de la Experiencia de Usuario con la información cuantitativa adquirida por el robot durante la interacción.

4. Preguntas de investigación

Pregunta general de investigación:

¿Existe correlación entre los datos generados por el robot (información cuantitativa) durante la Interacción Humano-Robot y la Experiencia de Usuario (información cualitativa)?

Preguntas específicas de investigación:

- (1) ¿Es significativa la evaluación cualitativa de la Experiencia de Usuario a través de una sola pregunta escrita (en escala Likert de 7 puntos) conforme a datos cuantitativos obtenidos durante la interacción humano-robot?
- (2) ¿La evaluación de Experiencia de Usuario reportada por los participantes mostrará una respuesta proporcional al desempeño del robot (número de errores de robot durante la interacción)?
- (3) ¿Los participantes son capaces de distinguir entre un error de robot y un cambio de modo de operación de robot?

5. Hipótesis

Aquí presento las hipótesis iniciales que motivaron el diseño experimental utilizado en esta investigación, donde la Experiencia de Usuario resultante de interactuar con un robot varía con respecto al tiempo de la interacción, a la energía utilizada en la interacción y al modo de operación del robot. Ver Figura 5.1.

1. Hay una correlación entre la experiencia reportada por el usuario después del hecho, en un cuestionario escrito, y la información obtenida por sensores durante la interacción con un robot.
2. Entre menos tiempo pasan los usuarios apretando botones mejor será la experiencia de usuario reportada (interactuar y personalizar son incidentales, no parte del objetivo de uso).
3. Entre más energía invierta el usuario apretando botones resultará en una peor evaluación de su Experiencia de Usuario; mientras que, a menos energía utilizada resultará en una mejor evaluación UX.
4. El movimiento autónomo del robot puede ser evaluado negativamente (no todo lo "Smart" tiene un impacto positivo en la experiencia de usuario).
5. Los usuarios evaluarán de forma más negativa su experiencia mientras más errores cometa el robot (menos errores, mejor evaluación; más errores, menor evaluación cualitativa). Los errores son malfuncionamientos del robot.

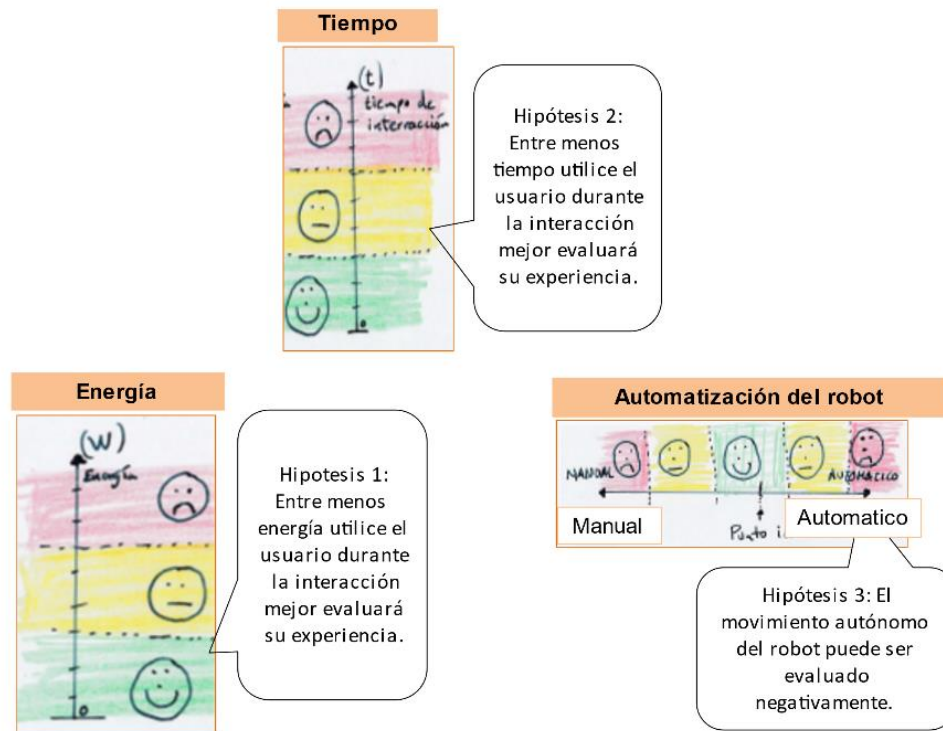


Figura 5.1. Hipótesis iniciales de la investigación en las que se relaciona la Experiencia de usuario con variables cuantitativas.

6. Contribuciones

1. Metodología para la investigación empírica de las interacciones humano-robot dentro de un marco tecnológico “*data-driven*” y cuestionario escrito de una sola pregunta de 7 puntos en escala Likert.
2. Diseño de experimento tomando en cuenta las necesidades y características de los usuarios como: privacidad, seguridad, bienestar del usuario, experiencia del usuario y eficiencia energética.
3. Fabricación de bancada de pruebas: Lámpara robotizada con 5 grados de libertad de alta precisión.
4. Herramienta metodológica para delimitar los alcances de la interacción humano-robot contemplando el nivel de privacidad de los usuarios.
5. Representación gráfica de variables cuantitativas y cualitativas de la interacción entre humano y robot como medio de evaluación de la experiencia del usuario.
6. Correlación entre las evaluaciones cualitativas de la experiencia de usuario y los datos adquiridos y almacenados por la lámpara robot.

7. Metodología: Una Lámpara diseñada para “cometer errores”

En esta sección describo el planteamiento y el desarrollo de la investigación, así como los puntos rectores que seguí a lo largo de los diferentes procesos y etapas de estudio de antecedentes, diseño, fabricación, experimentación y análisis de resultados.

La idea central de este trabajo de investigación es correlacionar evaluaciones cualitativas de la experiencia de usuarios con datos recolectados a través de sensores durante la interacción humano-robot. Se toma como referencia metodológica el trabajo de Ghosh et al. de 2017 en el que presentan el “Diseño Ciber-Empático”. Ghosh et al. realizaron un estudio experimental con usuarios, donde se les solicitó a los participantes utilizar un par de zapatos (que previamente habían sido instrumentados con sensores de fuerza a lo largo de la plantilla) y recorrer una ruta específica. Los participantes debían contestar tres cuestionarios escritos para plasmar sus gustos, experiencias y opiniones. El primer cuestionario antes de hacer la prueba experimental, el segundo mientras utilizaba los zapatos, y el tercero al terminar la prueba experimental. En total, por las tres pruebas cada participante contestó 133 preguntas. Ghosh et al. correlacionaron los valores obtenidos por los sensores de fuerza dentro de los zapatos con los resultados de los cuestionarios escritos (Ghosh et al., 2017).

Así mismo, la metodología de Ghosh et al. utiliza el uso de protocolos *data-driven* como herramienta para el diseño de producto, lo que es una muestra de modernización en la evaluación subjetiva de la experiencia del usuario. Esto resalta la vigencia e importancia del concepto - **Experiencia de Usuario**- para la **ingeniería mecánica** y especialmente, para el **diseño**, punto que es remarcado por la actualización de la norma ISO 9241-210:2019 (“*Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems*”) donde se incluye una definición formal de la experiencia de usuario (UX). Por ello, enfoqué mi investigación en la interacción humano-robot, específicamente en el estudio de la instrumentación de artículos cotidianos robotizados; además, se planteó obtener y correlacionar (a) los datos cualitativos obtenidos por medio de cuestionarios escritos con (b) los datos cuantitativos obtenidos por medio de sensores. Es decir, **correlacionar información cualitativa (medible y objetiva) con información cuantitativa (evaluable pero subjetiva)** con el fin de aportar objetividad al proceso históricamente subjetivo que es la evaluación de la experiencia del usuario, a la vez de reducir el número de preguntas que los participantes tienen que responder para registrar su percepción.

Siguiendo el trabajo de Ghosh et al., utilicé un protocolo *data-driven* para complementar la evaluación de la experiencia de usuario. Me enfoqué en escenarios donde el producto diseñado es un robot, específicamente electrodomésticos para casa u oficina, y mi caso de estudio es una Lámpara de mesa robotizada.

Para mi investigación, propuse utilizar como bancada de pruebas una lámpara de mesa robotizada (en vez de zapatos con sensores como lo hicieron Ghosh et al.). Como actividad a realizar por los participantes durante las pruebas experimentales, seleccioné cinco lecturas de comprensión (en vez de recorrer a pie una ruta preestablecida como en el proyecto de Ghosh et al.). El cuestionario escrito que propongo consta de un solo reactivo con escala Likert de 7 puntos por cada

prueba experimental (al contrario de los 133 reactivos que cada participante contestó en las pruebas realizadas por Ghosh et al.). Ver Figura 7.1.

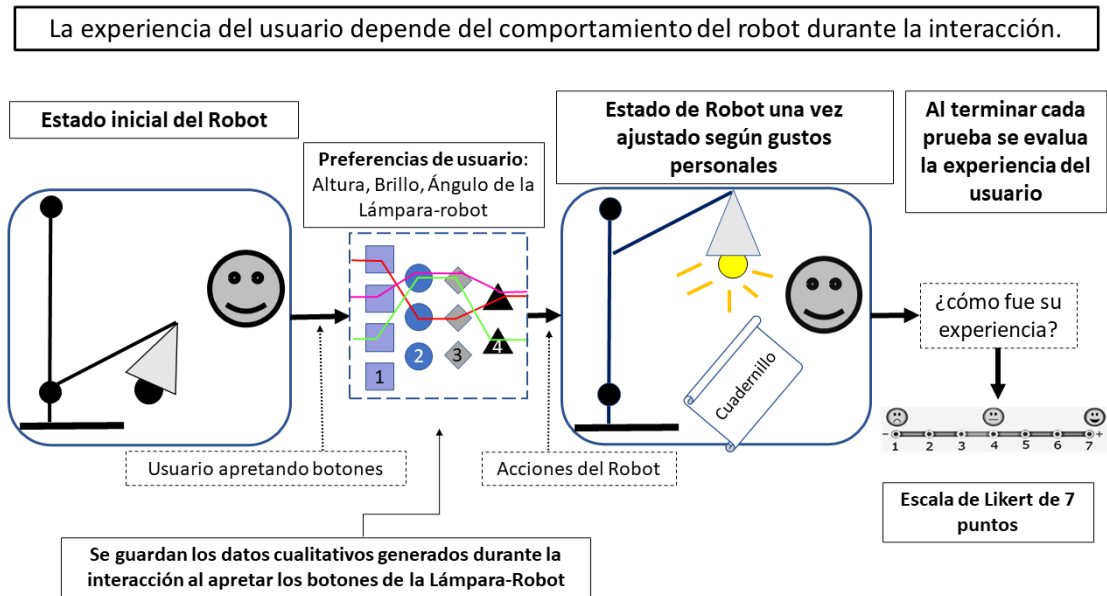


Figura 7.1. Diagrama de la secuencia de interacción humano-robot entre participante y Lámpara-robot.

Diseñé la instrumentación de la Lámpara-robot para sensar al usuario durante la interacción con los botones de la interfaz, en este caso para ajustar la altura, ángulo, y brillo de la lámpara-robot por medio del uso de botones. En la interfaz de la Lámpara-robot implementé sensores de fuerza de alta precisión como botones, para detectar la intención del usuario de cambiar las características de la lámpara y además captar información háptica en la información que se captura cada vez que se presiona uno de los botones instrumentados. Considero conveniente precisar que seleccioné un sensor de fuerza con mínima deflexión, buscando que para el usuario fuera sensorialmente imposible determinar si el sensor funciona o no. De tal manera que, únicamente mediante la reacción física de la Lámpara-robot los usuarios pudieran determinar su correcto funcionamiento.

Con esta configuración de hardware en mente, programé la Lámpara-robot para almacenar todos los datos de la interacción, incluyendo los perfiles de fuerza resultantes de presionar los botones. Desde el punto de vista de software, se programa el disparo de una acción de robot conforme a un umbral de fuerza preestablecido, ver Figura 7.2. Dentro del historial de los diferentes perfiles de fuerza, existen algunos donde los usuarios no presionan suficientemente fuerte para alcanzar el umbral, estos casos son de central importancia para mi investigación, pues planteo que el usuario expresa físicamente su intención de interacción y no obtiene respuesta, lo que afecta negativamente su experiencia de usuario, y a las que llamo “intencionalidades de usuario omitidas”. A estas “intencionalidades de usuario omitidas” las considero una oportunidad para diferenciar entre (a) un “error de robot verdadero” y (b) un “error percibido por el usuario”.

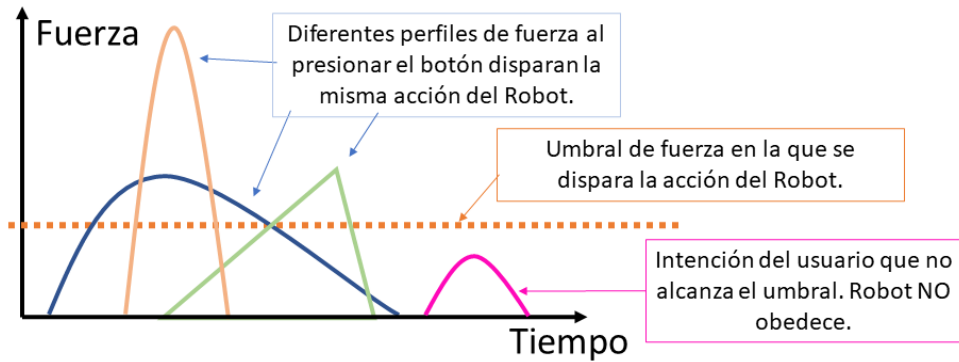


Figura 7.2. Perfil resultante de presionar un sensor de fuerza instrumentado como botón para controlar la Lámpara-robot.

Describiendo un poco más ambos términos, “**error de robot verdadero**” es aquel error donde el usuario utiliza de manera correcta la interfaz, pero el robot no realiza la acción esperada; en cambio, el “**error percibido por el usuario**” es aquel error donde el usuario no cumple los protocolos de interacción (ya sea por desconocimiento o por acción física inadecuada), por lo que el robot no actúa conforme a la expectativa del usuario. Las ocasiones en que los usuarios presionan los botones, pero no alcanzan el umbral de fuerza para disparar una reacción en el robot representan un “error percibido por el usuario” y contienen información cuantitativa de la experiencia del usuario.

Parte de mi planteamiento conceptual es que el número de apariciones de los dos tipos de errores se verán reflejados en la evaluación de experiencia de usuario que den los participantes por medio de una encuesta escrita. Mi planteamiento experimental fue diseñar y fabricar una Lámpara-robot de 5 grados de libertad con la capacidad de “actuar” “errores de robot verdaderos”, y de propiciar “errores percibidos por el usuario” al cambiar el umbral de fuerza (para las pruebas experimentales seleccioné los valores 1, 2.5 y 8 N como umbral de disparo al presionar los sensores de fuerza), ver Figura 7.3.

Los dos objetivos principales del diseño del experimento (estudio con usuarios) son:

(1) determinar si la evaluación subjetiva de la experiencia de usuario con una sola pregunta (en escala Likert de 7 puntos) es sensible a cambios incrementales en el comportamiento del robot (tanto de “error de robot verdadero”, como de “error percibido por el usuario”).

(2) correlacionar (a) los resultados de las evaluaciones de experiencia de usuario con (b) los datos referentes a la fuerza y tiempo con la que los participantes apretaron los botones de la Lámpara-robot durante el estudio con usuarios.

La razón detrás del objetivo 1 es validar el experimento en sí. Es decir, analizar estadísticamente si los resultados experimentales (evaluaciones de experiencia de usuario) están ligados al fenómeno real de interés (errores y modos del robot). Mientras que para el objetivo 2, la razón es validar las hipótesis de esta investigación, esto es: el tiempo y esfuerzo que los participantes invierten apretando botones en el robot están correlacionados a la evaluación subjetiva de su experiencia de usuario.

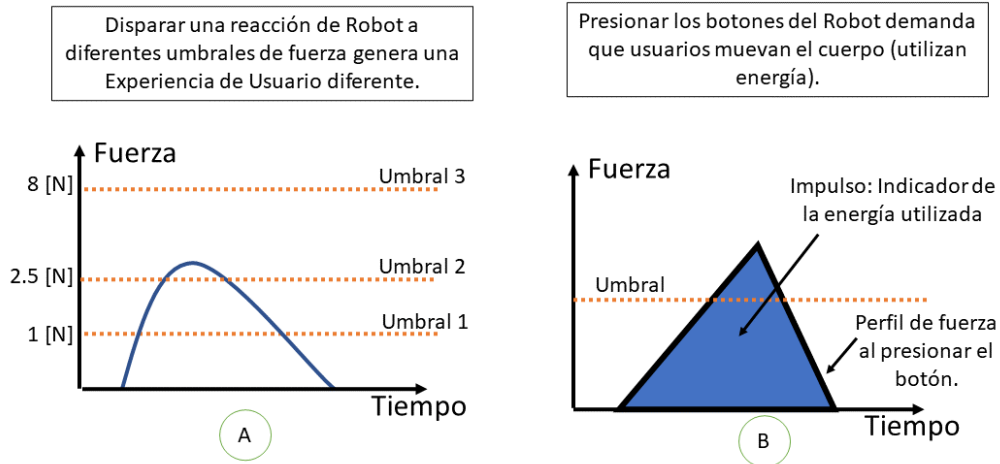


Figura 7.3. (A) Cambiar el umbral de fuerza en el que se dispara la acción de robot genera diferentes Experiencias de usuario, aun sin cambiar nada físicamente en el robot (incremento de “intencionalidades de usuario omitidas” entre mayor sea el umbral). (B) El área bajo la curva de los perfiles de fuerza son indicadores de la actividad física del usuario y, posiblemente, de la experiencia de usuario.

Implementé un diseño experimental de formato “*Split-plot*” con dos variables experimentales, uno es el comportamiento del robot, y el segundo es la altura inicial de la Lámpara-robot. Para estudiar el cambio en el comportamiento del robot, cada participante realizó 6 pruebas con la Lámpara-robot y emitió 6 evaluaciones de experiencia de usuario (una por cada prueba). Programé la Lámpara-robot para que en cada prueba se comportara diferente. A continuación, una breve descripción de las pruebas:

1. Prueba 1. Ajuste de Robot Manual, sin errores de robot programados.
2. Prueba 2. Ajuste de Robot Manual, con 25 errores programados.
3. Prueba 3. Ajuste de Robot Manual, con 75 errores programados.
4. Prueba 4. Igual que la Prueba 1, para comparar repetibilidad entre mediciones.
5. Prueba 5. Ajuste de Robot Asistido, sin errores de robot programados.
6. Prueba 6. Caso hipotético de interacción (se le pregunta al participante si cambiaría su evaluación anterior de haber sabido como operaba la Lámpara-robot en modo Asistido).

Para estudiar el impacto de la altura inicial de la Lámpara-robot, el experimento se divide en 3 grupos experimentales. Los participantes en el grupo 1 comienzan sus pruebas experimentales con la Lámpara-robot en su punto más bajo; el grupo 2 comienza sus pruebas con la Lámpara en su punto más alto; y el grupo 3 comienza en el punto medio del rango de altura de la Lámpara-robot. Ver Figura 7.4.

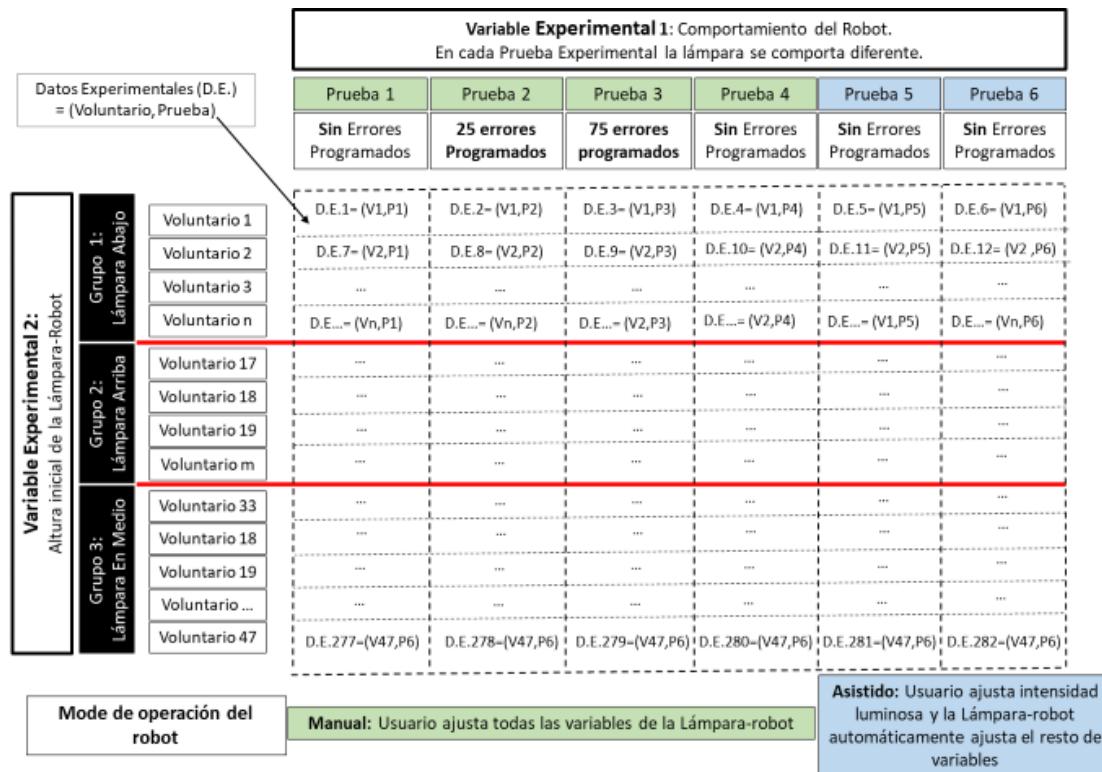


Figura 7.4. Diseño experimental. Los participantes evalúan su experiencia con respecto a diferentes comportamientos del robot (pruebas experimentales).

Dividí el planteamiento experimental en tres partes. Primero, la parte conceptual con el diseño experimental, que se refiere a establecer el escenario de implementación, las acciones a realizar en las pruebas, los datos generados durante las pruebas, entre otros. Segundo, la parte técnica o de desarrollo tecnológico, que involucra diseñar y fabricar la bancada de pruebas (la Lámpara-robot), para garantizar repetibilidad en el comportamiento del robot, así como la precisión de los datos recolectados durante las pruebas experimentales. La última parte es la herramienta metodológica para recolectar la experiencia de usuario de los participantes, en este caso la encuesta escrita. A continuación, profundizo en el desarrollo de cada una de estas partes.

7.1. Errores que “actúa” la Lámpara-robot y sus modos de operación

La Lámpara-robot, que fabricué para llevar a cabo la parte experimental de esta investigación doctoral, opera en dos modos de interacción, el Modo Manual y el Modo Asistido. En el Modo Manual, los usuarios controlan todas las características de la lámpara (altura, ángulo e intensidad luminosa), utilizando los botones “subir” y “bajar” para ajustar la característica; y el botón “cambiar función” para ciclar entre las características de la Lámpara-robot. En el Modo Asistido, los usuarios únicamente controlan la intensidad luminosa y la Lámpara-robot automáticamente ajusta su altura y ángulo para seguir el papel que el usuario está leyendo. En el estudio con usuarios, la Lámpara-

robot se mantiene en Modo Manual por las primeras cuatro pruebas, mientras que en la Prueba 5 la Lámpara opera en Modo Asistido.

Las primeras cuatro pruebas fueron en Modo Manual, donde la Lámpara-robot “actuó” errores de la siguiente manera: Prueba 1 (ningún error), Prueba 2 (pocos errores), Prueba 3 (bastantes errores) y Prueba 4 (igual que Prueba 1). La idea es probar que el número de “errores de robot” se refleja en la evaluación de la experiencia de usuario. A continuación, describo los tipos de errores que la Lámpara-robot es capaz de “actuar”:

Error 1 (Señal no reconocida): El robot no responde, aunque el usuario apriete los botones con suficiente fuerza para llegar al umbral. El robot simplemente ignora la instrucción del usuario. Se contabiliza por número de veces que se ignora el apretar botones.

Error 2 (Señal equivocada): El robot responde cuando el usuario aprieta botones, pero realiza la operación en sentido contrario a lo indicado en el botón, por ejemplo, el usuario presiona para “subir” la Lámpara-robot, pero ésta baja en vez de subir.

Error 3 (Señal atascada): El robot repite la acción correspondiente a la última vez que el usuario apretó un botón, generando la ilusión de que el botón se descompuso y se quedó pegado.

Error 4 (Señal fantasma): El robot opera sin que el usuario apriete botones.

Error 5 (Señal reducida): La Lámpara-robot cambia el umbral de fuerza para disparar una acción de robot, por lo que hay que apretar más fuerte los botones para que el robot reconozca la señal.

Cabe destacar que el cambio de modo de funcionamiento de la Lámpara-robot entre Prueba 4 (Modo Manual) y Prueba 5 (Modo Asistido) no lo considero un “error de robot”, más bien considero que el cambio de modo de operación de robot sin que al usuario se le haga saber de dicho cambio, podría representar un “error percibido por el usuario”, aun cuando el usuario podría percibir el cambio de Modo de operación como un “error de robot” ya que el robot no hace lo que “el usuario espera” .

En la siguiente sección profundizo en cómo el marco teórico, presentado en la sección de Antecedentes, me ayudó a conceptualizar el estudio con usuarios tomando en cuenta las recomendaciones más recientes en las áreas de la interacción humano-robot, diseño de producto, y evaluación de la experiencia del usuario. En ella formalizo un desglose de los elementos que conforman el diseño experimental de mi investigación (interacción entre humano y Lámpara-robot).

7.2. Diseño experimental

Realicé el diseño experimental siguiendo las cinco recomendaciones de Krol et al. de 2016, referentes al diseño de experimentos para estudios con usuarios tomando en cuenta la seguridad y privacidad de los participantes, dado que la seguridad y la privacidad de las personas que participan en experimentos debe de ser prioridad desde el inicio de la investigación y a lo largo de las diferentes etapas hasta su conclusión. A continuación, traduzco dichos principios y especifico cómo los tomé en cuenta:

1. "El usuario debe de **realizar una actividad primaria** durante el experimento (el usuario tiene que poner empeño en alcanzar un objetivo)". Este punto resalta la importancia de que los participantes de los experimentos deben de estar motivados a realizar **correctamente** una actividad que requiera esfuerzo, concentración y un claro objetivo de lo que se pretende alcanzar durante la interacción humano-robot. En mi investigación, los participantes realizan cinco lecturas de comprensión y después contestan preguntas relativas al texto.
2. "Es necesario que haya **un riesgo realista** apegado a la interacción (el usuario debe de percibir una obligación para realizar la actividad correctamente)": Como parte de las actividades que realizan los participantes durante cada prueba experimental, deben de contestar preguntas relacionadas al texto, lo que genera una responsabilidad en el participante, a diferencia de que solo tuvieran que leer sin presentar ninguna prueba de que en verdad leyeron con atención. Es una constante social que se nos juzgue por nuestras respuestas. Sin embargo, esta responsabilidad no genera ningún riesgo a la salud de los participantes.
3. "El experimentador debe **evitar influenciar la opinión del usuario**": Tomando en cuenta este punto, realicé el consentimiento informado en dos secciones, al inicio de cada participación se dio una descripción general del experimento y después del experimento se realizó una sesión donde se revelan más detalles del propósito de la investigación.
4. "Realizar experimentos **doble-ciego**": En un esfuerzo por mantener la integridad de los resultados experimentales, la Lámpara-robot está fabricada para otorgar un número identificador a cada participante, así los datos resultantes de cada prueba se guardan con un número de identificador que no se liga al nombre real del participante.
5. "Cada experimentador debe de definir: *modelo de riesgo, seguridad, privacidad, y usabilidad*": A continuación, procedo a definir los conceptos mencionados:

Modelo de riesgo: Un modelo de riesgo es el resultado del proceso de identificar situaciones en el escenario experimental que potencialmente violen la seguridad y puedan causar daño a los usuarios. En el caso de la bancada de prueba robotizada, diseñada y fabricada durante esta investigación, los riesgos son similares a operar cualquier robot que utilice corriente eléctrica a 120 volts y tenga partes móviles; por ejemplo, electrocución, golpe y machucamiento (para más detalles ver el Cuadernillo Para Experimento, en el Apéndice A).

Seguridad: Los usuarios no deben sufrir lesiones físicas durante las pruebas experimentales. Para abordar este parámetro de diseño, la bancada de pruebas, es decir, la Lámpara-robot, está equipada con tres fusibles eléctricos de valores escalonados para limitar la corriente en los módulos del robot. Además, la interfaz de usuario (panel con botones donde los usuarios interactúan con el robot) es alimentada únicamente con 5 Volts y corriente limitada a 0.75 Amper. Así mismo, mantuve los perfiles de aceleración del robot por debajo de 2 m/s, siguiendo el estándar de seguridad marcado por Haddadin et al. en 2008 para el movimiento de robots que estarán en interacción directa con humanos.

Privacidad: Los datos personales de los participantes deben de ser almacenados con gran cautela para evitar una fuga de información, por descuido o por ataque externo. En el caso específico de

esta investigación los datos personales de los participantes fueron recabados únicamente en formato físico, a puño y letra. A cada persona se le asignó un número de participante que permite correlacionar los datos cuantitativos provenientes de los sensores de la Lámpara-robot con los resultados de las evaluaciones de experiencia de usuario. No se implementaron micrófonos ni cámaras en la Lámpara-robot, así como en las pruebas experimentales, para aumentar el nivel de privacidad de los voluntarios. Sin embargo, en el Consentimiento Informado sí abordé la posibilidad de grabar algunas pruebas para documentar la investigación. Los participantes no fueron identificados en su persona (nombre personal) en ningún listado digital, para evitar la asociación entre datos adquiridos por el robot durante la interacción a través de sensores y los datos personales de los participantes.

Usabilidad: La usabilidad hace referencia a la propiedad de un objeto diseñado de ser aprovechado por un usuario, incluyendo su forma, peso, materiales, apariencia y protocolo de interacción (instrucciones de cómo opera el robot). Es por este punto que decidí que la bancada de pruebas tenía que ser la robotización de un aparato cotidiano (seleccioné una lámpara de mesa), con una interfaz clásica (botones para presionar con los dedos para controlar la altura, el ángulo y el brillo de la Lámpara-robot) y un objetivo de uso de robot instalado en el imaginario colectivo (se plantea que la gran parte de las personas están familiarizadas con el uso de una lámpara de mesa y para qué sirve).

Diseñar un robot interactivo de cinco grados de libertad requiere del subdiseño de una gran cantidad de procesos, por lo que además de haber seguido las cinco recomendaciones de Krol et al. (2016) y la idea presentada en el trabajo de Ghosh et al. de correlacionar evaluaciones cualitativas de la experiencia de usuarios por medio de encuestas escritas con datos generados durante la interacción por medio de sensores integrados en el dispositivo en cuestión, también seguí metodologías para la elaboración de circuitos y mecanismos de alta precisión, además de la lectura de incontables hojas técnicas para la selección de piezas, módulos y sus modos de control. Presenté los hallazgos de esta investigación de antecedentes en un artículo para la conferencia SOMIM 2019, que lleva por título “Recomendaciones para la experimentación en el área de interacción entre humano y robot utilizando el concepto de Experiencia del Usuario” (Gomez-Monroy et al., 2019). Presento dicho artículo en su totalidad en el Apéndice I.

Así mismo, para justificar una investigación competitiva, novedosa y válida me fue necesario identificar un área de oportunidad clara en el área de investigación de la Interacción Humano-Robot. Encontré dicha oportunidad al separarme de la tendencia actual de utilizar cámaras, micrófonos y modelos de lenguaje natural como tecnologías de interacción (dichas tecnologías requieren o permiten identificar al usuario en su persona). En cambio, me enfoqué en Interacciones Humano-Robot que permitieran al usuario permanecer anónimo y que a la vez me permitiera fabricar un robot con un comportamiento interactivo y multivariable. Aunque puede sonar trivial, este cambio de paradigma en la tecnología de sensado del usuario, fue el resultado de un análisis concienzudo del estado del arte y del cual resultó una herramienta metodológica que a continuación describo.

7.3. Herramienta metodológica para delimitar estudios con usuarios sobre las Interacciones Humano-Robot

Dada la amplitud de la definición de Experiencia de Usuario y la gran diversidad de robots (así como escenarios de uso) consideré necesario acotar mi estudio con usuarios. Para esto, identifiqué dos variables universales en la interacción humano-robot: 1) Nivel de privacidad del usuario durante la interacción humano-robot, y 2) Enfoque de la investigación (centrada en el usuario, o centrada en la tecnología). El resultado de este ejercicio es la herramienta metodológica que subdivide la investigación de la interacción humano-robot en 4 Partes fundamentales (ver Tabla 7.3.1) y 3 Tipos de Experiencia de Usuario. En esta sección describo cada una de las siete columnas presentes en la retícula de la herramienta metodológica, las preguntas asociadas a cada columna para seleccionar una casilla específica y los marcadores que denotan las características del diseño experimental (ver Tabla 7.3.2); incluyendo variable experimental , variables controladas y variables de respuesta. Esta herramienta metodológica contempla las tres etapas de un experimento sobre la Interacción Humano-Robot: (1) Previo a la IHR (Consentimiento Informado del participante), (2) durante la IHR (Características experimentales del robot), y (3) después de la IHR (Resultados experimentales). Ver Figura 7.3.2.

Consentimiento informado: Nivel de Privacidad del usuario

Tomé la Privacidad de usuario como discriminante de los tipos de interacción entre humano y robot, pues el Nivel de Privacidad del usuario repercute en los tipos de sensores que se pueden implementar en el robot (en este caso la Lámpara-robot). Por ejemplo, la información proveniente de un *push-button* por sí misma no permite identificar a la persona que lo utiliza; en cambio, si la Lámpara-robot estuviera equipada con una cámara, evidentemente, la Privacidad del usuario sería menor. Es decir, diferentes tecnologías de sensado y procesamiento de datos generan diferentes tipos de experiencias de usuario en relación con la privacidad del usuario. Considerando que la definición de -privacidad- cambia con la legislación de cada país (y de cada estado), generé un algoritmo de dos preguntas para seccionar la Privacidad de usuario en 3 niveles, independientemente de las definiciones legales, académicas, e ideológicas. Ver Figura 7.3.1. Dicho Nivel de Privacidad del usuario se debe de reflejar en los datos capturados durante las pruebas experimentales y que se conservan en los resultados experimentales.

Después de identificar que, en la investigación de antecedentes el estudio de la interacción humano-robot se genera desde dos perspectivas dominantes, una centrada en la tecnología (desarrollo de robots) y la segunda centrada en el usuario, encontré que es posible dar cabida a ambas perspectivas en una sola idea, al considerar la interacción humano-robot como un proceso de intercambio de información entre dos entes (humano y robot) aislados por una barrera informática.

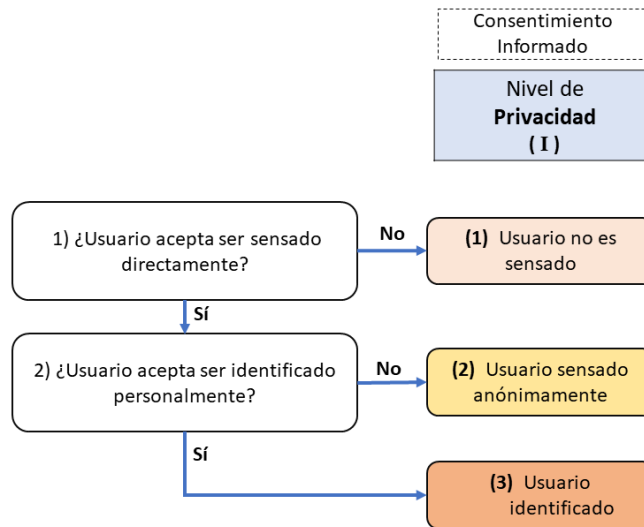


Figura 7.3.1. Preguntas sobre Privacidad: preguntas que definen el Nivel de Privacidad del usuario durante la Interacción Humano-Robot y que se debe de respetar en la captura de resultados experimentales.

Una interfaz es requerida para traspasar la barrera de la información, entendiendo por interfaz un conjunto de características compatibles (físicas y lógicas) entre humano y robot que permite el intercambio de información. Además de la interfaz es necesario un protocolo de interacción (o modo de operación) que ayuda al humano a saber cómo funciona el robot, y que a su vez está definido por el comportamiento programado del robot. Es necesario aclarar que las interfaces de robot pueden obtener información del usuario de dos maneras diferentes, una manera que requiere del consentimiento total del humano y su cooperación para otorgar información al robot (por ejemplo, un teclado de computadora en el que el humano escribe explícitamente información); y otra manera que no requiere el consentimiento explícito del usuario, ni su cooperación; por ejemplo, cámaras o micrófonos escondidos, mediante los cuales el robot extrae información del usuario, con la posibilidad de hacerlo sin que el usuario se dé cuenta. La primera manera es análoga al concepto de *-interrogación-*, mientras que la segunda es análoga al concepto de *-vigilancia-*; ambos conceptos descritos por el Dr. Solove en 2005 en su Taxonomía de la Privacidad (Solove, 2005).

En un caso donde, en términos prácticos, un usuario no puede estar seguro del tipo de información que el robot está adquiriendo del usuario durante la interacción, es necesario establecer un **acuerdo de interacción** en el que se estipule explícitamente el Nivel de Privacidad del usuario. Dicho acuerdo se conoce en la academia como “Consentimiento Informado”. En éste se estipula cómo será sentido el usuario y qué información será recolectada durante las pruebas experimentales. Este acuerdo de interacción se pacta antes de participar en el experimento, es decir, el acuerdo de interacción es previo a la interacción, pero tiene consecuencias que delimitan el comportamiento del robot durante las pruebas experimentales, así como delimitar el tipo de información generada y almacenada por el robot durante la IHR que será preservada después de la interacción.

Subdividí la Interacción Humano-Robot (IHR) en 4 Partes fundamentales que se deben tomar en cuenta cuando se diseña un robot, para generar interacciones humano-robot útiles y seguras. Las 4 Partes de la IHR responden a los siguientes cuatro imperativos: (A) el robot tiene un objetivo específico de uso, (B) el robot necesita una interfaz para permitir la interacción con el humano, (C) el diseñador del robot (investigador) debe considerar la prevención de lesiones en el usuario durante la interacción con el robot, y (D) el diseñador del robot debe considerar las repercusiones en el bienestar del usuario derivadas de la interacción a largo plazo con el robot. A continuación, presento la Tabla 7.3.1 donde especifico el tipo de variables de desarrollo tecnológico que corresponde a cada Parte de la IHR.

Partes de la Interacción Humano-Robot	Competencia de cada una de las 4 Partes de la Interacción Humano-Robot
(A) Operación del Robot	<p>Cómo el robot cumple su función prevista. Variables de desarrollo tecnológico centradas en el robot (Ingeniería de robots: eficiencia de operación, etc.)</p>
(B) Interfaz del Robot	<p>Cómo el robot se acopla al usuario. Variables de desarrollo tecnológico centradas en el usuario (Factores humanos y ergonómicos: preferencias personales, etc.)</p>
(C) Seguridad del Usuario	<p>Cómo el robot previene accidentes y daños al usuario durante la Interacción Humano-Robot. Variables de desarrollo tecnológico enfocadas a la seguridad del consumidor y la seguridad en el área de trabajo (Prevención de colisiones, etc.)</p>
(D) Bienestar del Usuario	<p>Cómo el robot evalúa/influye en la salud física y/o mental del usuario a largo plazo (o a través de múltiples interacciones). Variables de desarrollo tecnológico enfocadas en las repercusiones a la sociedad y a la salud individual derivadas del uso de robots (Influencia sobre comportamiento humano, etc.)</p>

Tabla 7.3.1. Competencias de las 4 Partes de la Interacción Humano-Robot.

Al subdividir la interacción entre humano y robot en 4 Partes fundamentales y 3 Tipos de Experiencia de Usuario generé una retícula coordinada como herramienta metodológica que enmarca el nivel de madurez tecnológica del robot al momento de realizar los estudios con usuarios. En dicha retícula se identifican 12 subdivisiones con nomenclatura [Columna-Fila] que corresponde a [Parte-Tipo]. Ver Figura 7.3.2.

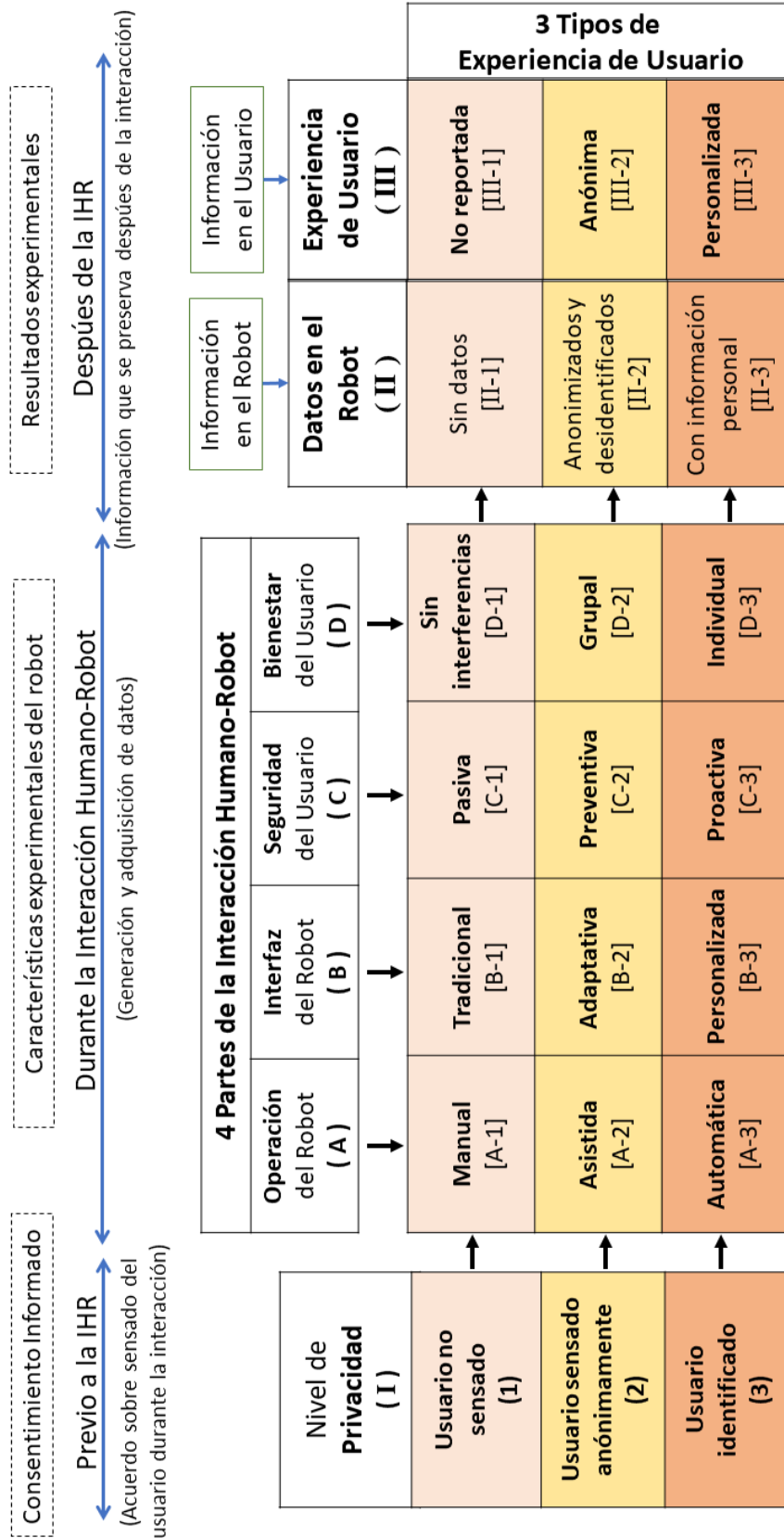


Figura 7.3.2 .Herramienta metodológica para delimitar estudios con usuarios en el área de la Interacción Humano-Robot

A continuación, describo los tres niveles de privacidad del usuario, así como las 4 Partes de la interacción humano-robot que conforman la herramienta metodológica; así como un par de preguntas asociadas a cada columna de la herramienta metodológica que permiten ubicar dentro de la retícula los marcadores de las Partes de la IHR que permanecerán constantes durante las pruebas con usuarios, los Estados Experimentales del Robot (variable experimental), y los resultados experimentales (haciendo la distinción entre datos almacenados en la memoria del robot y la Experiencia de Usuario reportada por el usuario).

Los tres niveles de privacidad del usuario son:

1. **Usuario no sentido** (User not sensed): El usuario no es sentido de ninguna manera por el robot, ni por *interrogatorio* ni por *vigilancia* durante la interacción humano-robot.
2. **Usuario sentido anónimamente** (User anonymously sensed): El usuario permanece anónimo a lo largo de la interacción, ya sea porque es sentido en anonimato o por medio de un proceso a posteriori que borre la información personal del participante (para evitar la relación entre datos experimentales y la información personal de los participantes).
3. **Usuario identificado** (User personally identified): el robot conoce la identidad personal del usuario, los usuarios reconocen y aceptan ser sentidos, y que los datos experimentales contienen su información personal.

Características experimentales del robot: 4 Partes de la Interacción Humano-Robot

(A) Operación del Robot

Operación del Robot se refiere a la cualidad de un robot de actuar independientemente y el papel del humano en la IHR. Como mencioné antes, la funcionalidad de un robot está ligada a sus sensores y actuadores. Por ello, es necesario tener en mente que, la información obtenida a través de los sensores puede contener información personal del usuario. Los 3 niveles de privacidad del usuario impactan en la adaptabilidad y agencia del robot al restringir la cantidad y calidad de información proveniente del usuario que se utiliza en los sistemas de retroalimentación del robot. A continuación, describo los tres tipos de Operación del Robot y en la Figura 7.3.3 presento las preguntas para seleccionar el tipo de operación del robot.

1. **Manual** (Usuario no sentido): El humano es responsable de controlar al robot, a la vez que no se genera ni utiliza información personal en los sistemas de retroalimentación del robot; por lo que el humano es responsable de controlar todas las variables del robot. El robot transforma las acciones del usuario sin tomar decisiones independientes.
2. **Asistida** (Usuario sentido anónimamente): El humano controla algunas variables del robot y el robot controla otras variables; el robot puede ofrecer recomendaciones al usuario además de tomar acciones complementarias a las acciones directas del usuario. El usuario colabora con el robot para alcanzar el objetivo de diseño del robot.
3. **Automática** (Usuario identificado personalmente): El robot busca alcanzar su objetivo de diseño independientemente de las habilidades del usuario. El humano no controla ninguna variable operacional del robot; el robot controla todas las variables, mientras que el usuario supervisa el funcionamiento del robot.

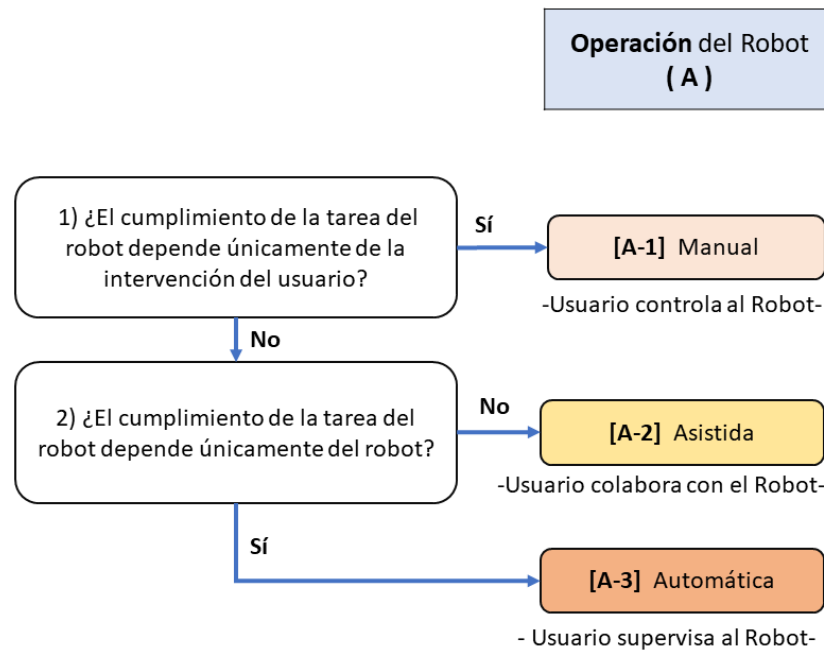


Figura 7.3.3. Preguntas asociadas a Columna (A): Preguntas para seleccionar el modo de Operación del Robot.

(B) Interfaz del Robot

La interfaz de robot representa la capacidad de evaluar las preferencias del usuario en aspectos ergonómicos y estéticos, y es diferente a las características que se refieren al objetivo de uso, así como de su desempeño. A continuación, describo los tres tipos de Interfaz del Robot y en la Figura 7.3.4 presento las preguntas para seleccionar el tipo de interfaz del robot.

1. **Tradicional** (Usuario no sensado): el robot no aprende del usuario durante la interacción. El robot siempre se comporta igual que la primera vez que el usuario la utilizó y no toma en cuenta las características (anatómicas o de preferencias) del usuario. Es decir, el robot no cuenta con sensores ni procesos dedicados a la ergonomía ni a la ergonomía cognitiva.
2. **Adaptativa** (Usuario sensado anónimamente): Si el robot adquiere una gran cantidad de información de sus usuarios (aunque sea anónima), el robot puede implementar técnicas de aprendizaje de máquina para mejorar la Experiencia de Usuario conforme se dan las interacciones. El robot cuenta con sensores y/o procesos dedicados a la ergonomía y/o ergonomía cognitiva, pero sin guardar un historial de uso individual.
3. **Personalizada** (Usuario identificado personalmente): el robot reconoce características específicas de cada usuario, así como sus necesidades específicas y preferencias personales. Siendo que el robot puede identificar al usuario en su persona, reduce la necesidad de grandes volúmenes de datos e, idealmente, el robot podrá reconocer las necesidades del usuario en tiempo real con el objetivo de generar una experiencia de usuario lo más cercana

posible a la “perfección”¹. Para esto, el robot cuenta con sensores y/o procesos dedicados a la ergonomía y/o ergonomía cognitiva, además de generar y utilizar un historial de uso individual.

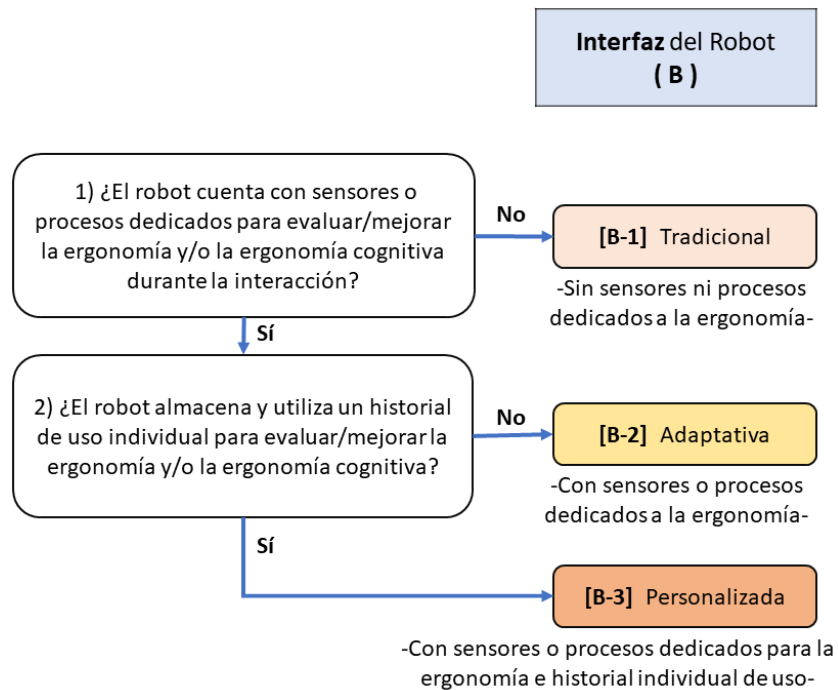


Figura 7.3.4. Preguntas asociadas a la Columna (B): Preguntas para seleccionar el tipo de interfaz del robot.

(C) Seguridad del Usuario

La seguridad del usuario se refiere a las medidas que los diseñadores implementan en el robot para prevenir daños o lesiones al usuario durante la interacción humano-robot. Aunque la Seguridad del Usuario y su bienestar van de la mano, éstas se diferencian en su proyección temporal. El Bienestar del Usuario se centra en la salud del usuario a largo plazo, mientras que la Seguridad del Usuario se enfoca en el momento preciso de la interacción humano-robot. Esto concuerda con DeSantis et al. (2008), quienes definen *safety* (seguridad) como “*la ausencia de consecuencias catastróficas para el usuario y el ambiente*”. Por ello, las técnicas que un robot puede implementar para generar interacciones seguras están limitadas por el nivel de privacidad del usuario y se subdividen conforme a los tres niveles de privacidad de usuario, quedando de la siguiente manera:

1. **Pasiva** (Usuario no sentido): El robot puede utilizar información referente a su propia posición y estado para implementar metodologías que detecten errores de funcionamiento, pero sin utilizar técnicas o tecnologías que requieren de sensar al usuario directamente para mantenerle a salvo. Por ejemplo, recomendaciones industriales como la reportada por Haddadin et al. en 2007, quienes determinaron que la velocidad máxima que debe

¹ Considerando como experiencia de usuario “perfecta” aquella en la que el usuario siempre reporta tener una experiencia positiva, sin necesidad de ajustes manuales.

desarrollar un robot que opera cerca de humanos es de 2 m/s (los autores utilizaron un método de análisis de “choque” parecido al utilizado en la industria automotriz).⁵

2. **Preventiva** (Usuario sensado anónimamente): En este caso, el usuario puede ser sensado por el robot como objeto. Cuando el robot es capaz de determinar la posición del usuario es posible utilizar metodologías de evasión de colisiones (De Luca & Flacco, 2012; Lin et al., 2017); es decir, el robot detecta que va a chocar con “algo” y se detiene antes de la colisión; el robot introduce al usuario en su sistema de retroalimentación como un objeto anónimo pero direccionable. Otra técnica es el control de impedancia en los motores y manejo de colisiones con objetos “extraños” (pudiendo ser el usuario interpretado como un objeto, y no como un humano) descrito por Bajcsy et al. en el 2017, es decir, cuando el robot choca con “algo”, éste se detiene.
3. **Proactiva** (Usuario identificado personalmente): El robot utiliza técnicas y/o tecnologías que requieren identificar al usuario con información personal; entonces, el robot puede utilizar datos biométricos para ser capaz de distinguir entre un comportamiento errático del usuario (p. ej., dormirse al manejar un vehículo por sueño) y una condición de salud del usuario (p. ej., autismo). De esta manera el robot es capaz de modificar su comportamiento con respecto a condiciones médicas específicas del usuario (Fosch Villaronga & Albo Canals, 2018; Karabegović & Doleček, 2017).

Las características de Seguridad del Usuario se establecen y miden directamente por el robot durante la interacción (o externamente en un ambiente controlado); por ejemplo, Deuse et al. en 2016 estudiaron la aplicación de información antropométrica como retroalimentación en robots en líneas de ensamble industrial con el fin de aumentar la seguridad y eficiencia colaborativa. Al contrario, el Bienestar del Usuario (*wellbeing*) se mide indirectamente debido a su naturaleza cualitativa y componentes que generalmente, son reconocibles a largo plazo (Wood et al., 2014). A continuación, presento la Figura 7.3.5. con las preguntas para seleccionar el nivel de madurez tecnológica implementada en el robot.

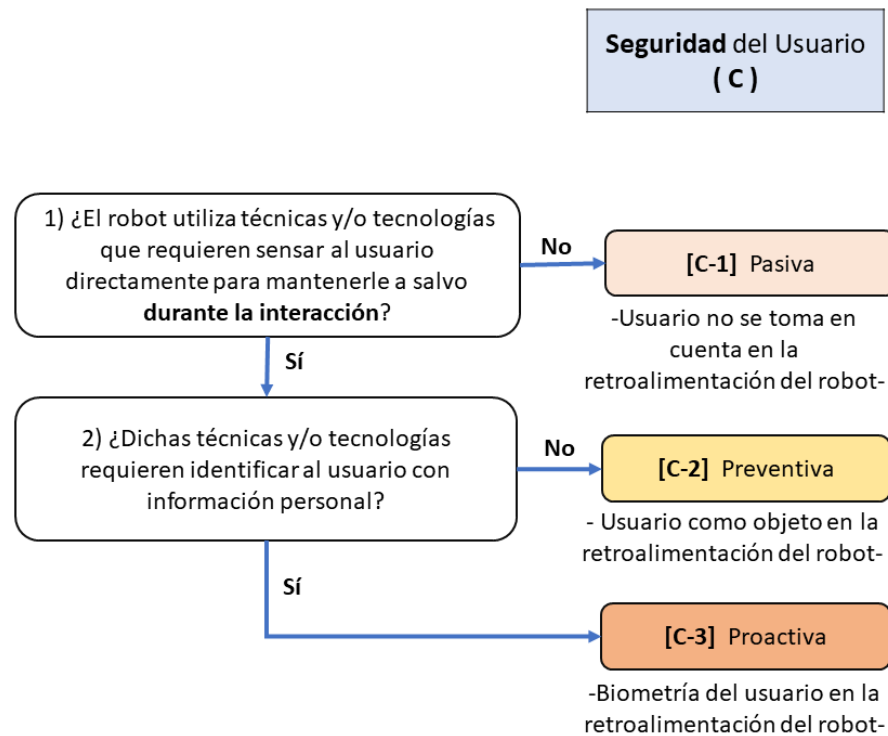


Figura 7.3.5 Preguntas Columna (C): Preguntas para seleccionar el tipo de técnicas y tecnologías implementadas en el robot para mantener a salvo al usuario durante la interacción.

(D) Bienestar del Usuario

El Bienestar del Usuario es un término ampliamente utilizado en el área de investigación de la Interacción Humano-Robot. En 2019, Nelles et al. enunciaron que diferentes equipos de investigadores abordan el concepto de bienestar humano (*human wellbeing*) en sus propios términos. Por otro lado, la definición en el diccionario en línea Merriam-Webster define *wellbeing* como: “*el estado de ser feliz, saludable, o próspero*”. Conuerdo con ella en términos generales, pero considero necesario ofrecer mi propia definición en la que divido la responsabilidad de la interacción humano-robot entre los usuarios y los diseñadores de robots:

Bienestar del usuario (*Wellbeing*): Es un ideal a ser perseguido tanto por usuarios como diseñadores de robots en el que se facilitan interacciones que inducen estados de felicidad y nutren la salud humana (social, psicológica, y físicamente), tanto a corto como a largo plazo.

Ahora, presento sus tres subdivisiones centradas en los efectos a largo plazo (o a través de múltiples interacciones), seguidas de las preguntas para seleccionar el tipo de estrategia implementada en el robot durante la IHR presentada en la Figura 7.3.6:

1. **Sin intervenciones** (Usuario no sentido): En casos donde los robots no pueden sensar al usuario, el robot puede utilizar información ambiental para seguir metodologías de confort humano tradicionales; por ejemplo, los edificios inteligentes que miden temperatura, humedad, flujo de aire, etc. para ajustar automáticamente características del edificio y

- mantener sus parámetros dentro de valores preestablecidos según factores humanos en tablas (Marche et al., 2017). Sin embargo, los efectos de la IHR a largo plazo no son medidos.
2. **Grupal** (Usuario sensado anónimamente): Si el robot obtiene información sobre el usuario; por ejemplo, su postura física (manteniendo el anonimato), el robot puede implementar procedimientos de adaptación siguiendo datos antropométricos estadísticos (Deuse et al. 2016), así como técnicas de simulaciones por computadora donde se utilizan “modelos digitales humanos” para generar aproximaciones del estrés musculoesquelético, fatiga y cálculos metabólicos de ciertos escenarios de aplicación (Bonin et al., 2016; Thomas et al., 2016). Los efectos a largo plazo de la IHR se evalúan por grupo de usuarios, es decir, de manera estadística y no personal.
 3. **Individual** (Usuario identificado personalmente): El robot es capaz de atender necesidades específicas como condiciones médicas de Alzheimer y autismo (Fosch Villaronga & Albo Canals, 2018; Karabegović & Doleček, 2017). En este caso, el usuario acepta ser identificado en su persona y hasta influenciado (o motivado) por el robot. Los efectos a largo plazo de la IHR se evalúan por persona.

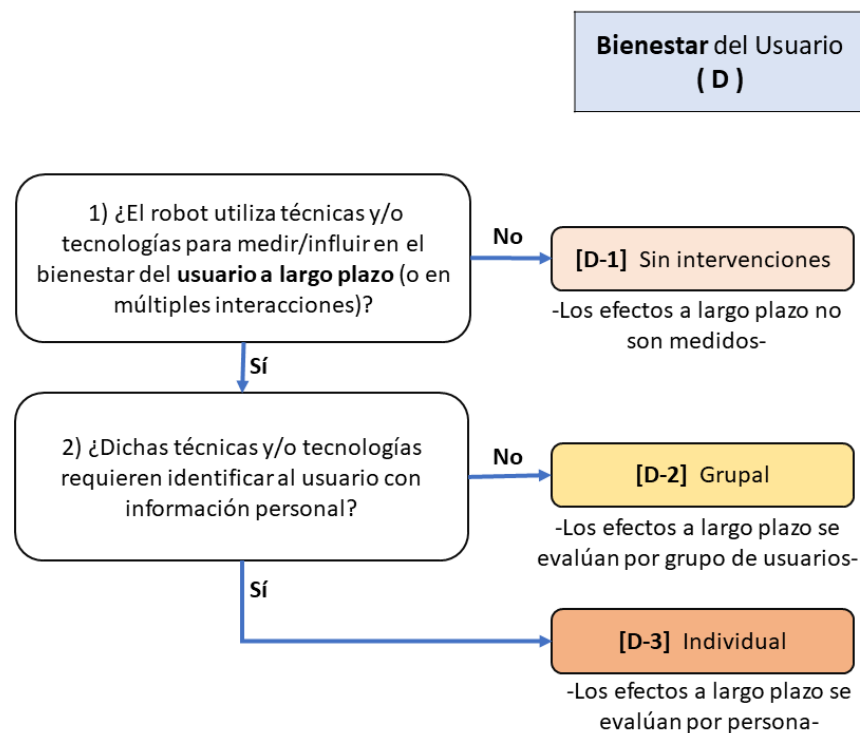


Figura 7.3.6 Preguntas Columna (D): Preguntas para seleccionar el tipo de estrategia implementada en el robot para medir/influir en el bienestar del usuario a largo plazo.

Así quedan descritas las 12 subdivisiones de las 4 Partes de la herramienta metodológica. A continuación, defino los dos espacios para Resultados Experimentales y su subsecuente subdivisión en tres niveles paralelos al Nivel de Privacidad del usuario.

Tipos de Resultados Experimentales en estudios sobre IHR

Cuando se realiza un estudio con usuarios en el área de investigación de la Interacción Humano-Robot, existen dos formas en las que el investigador puede recabar información de las pruebas con usuarios. Una forma es por medio de los sensores instalados en el robot y la otra es preguntarle directamente al usuario. Estas dos formas de recolección de datos están presentes en la herramienta metodológica que presento en esta sección de Resultados Experimentales, ver Figura 7.3.2. El primer espacio para Resultados Experimentales corresponde a los Datos almacenados en el Robot, Columna (II); y el segundo corresponde a la Experiencia de Usuario, Columna (III).

(II) Datos en el Robot

Cuando se realizan pruebas con usuarios utilizando objetos no-robotizados, los investigadores recurren a la observación directa y/o a la instalación de equipo de sensado en el espacio donde se hacen las pruebas para recolectar información que perdure en el tiempo (después de que la interacción entre participante y objeto de interés ocurre). Dicha información sirve para estudiar, analizar y respaldar las conclusiones del experimento. Sin embargo, cuando se hacen pruebas con usuarios y el objeto de interés es un robot, es posible y deseable que el robot genere datos durante la interacción y los almacene para ser usados por los investigadores como Resultados Experimentales. Cabe destacar que, dado el caso en que los investigadores utilicen sensores externos al robot, los datos que éstos adquieran se deben de contemplar como si fueran parte de los datos adquiridos por el robot. A continuación, presento los tres casos posibles de la recolección de datos experimentales, así como el par de preguntas asociadas a esta Columna (II) en la Figura 7.3.7.

1. **Sin datos** (Usuario no sensado): El robot no almacena datos durante la Interacción Humano-Robot.
2. **Anonimizados y desidentificados** (Usuario sensado anónimamente): El robot almacena información de sus actuadores, pero no de la interfaz de usuario u otros sensores que obtengan información del usuario.
3. **Con información personal** (Usuario identificado personalmente): El robot almacena información de sensores, actuadores, interfaz de usuario y de cualquier sensor enfocado al usuario.

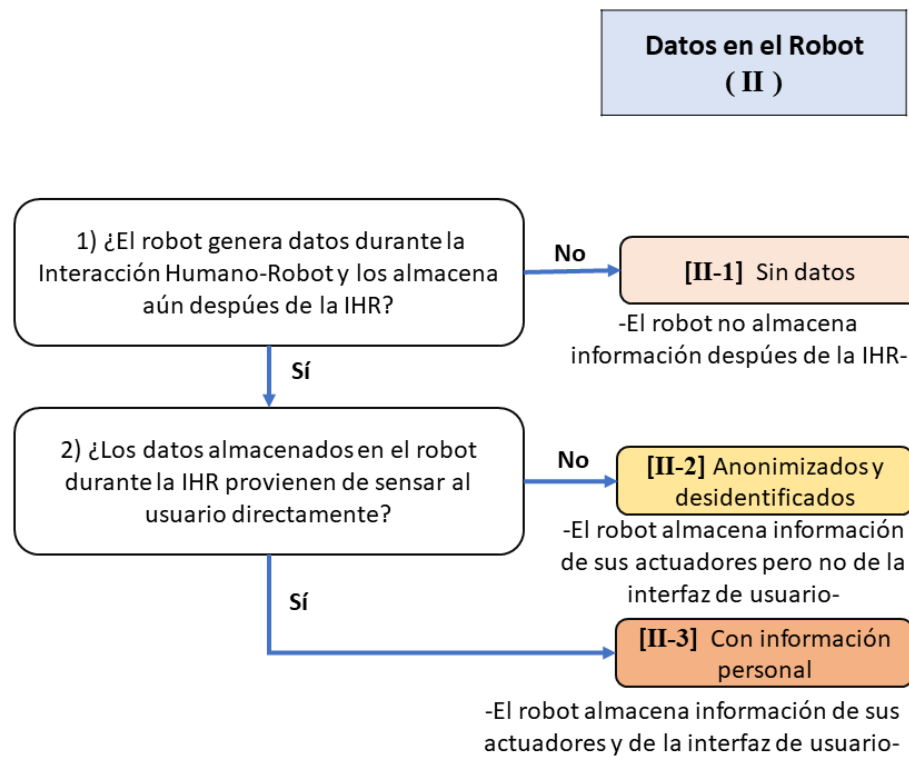


Figura 7.3.7 Preguntas Columna (II): Preguntas para seleccionar el tipo de Resultados Experimentales almacenados en la memoria del robot.

(III) Experiencia de Usuario: 3 Tipos de UX

El tipo de Experiencia de Usuario está definido por el contenido de información que el usuario reporta por sí mismo (sin interpretaciones de terceros ni de investigadores ni de sistemas automatizados) conforme a su memoria de la IHR en las pruebas experimentales. La información que puede proporcionar un participante puede ser cualitativa o cuantitativa, con preguntas cerradas o abiertas y con un amplio rango de posibilidades (desde cuestiones como gustos personales, hasta datos técnicos específicos de la operación del robot). Lo anterior basado en la definición de Experiencia de Usuario estipulada en el ISO 9241-210 "*Ergonomics of human-system interaction: Human-centred design for interactive systems*", y provista en este trabajo en la Sección de Antecedentes. De igual manera que en el resto de las Columnas de la retícula (Figura 7.3.2), presento un par de preguntas asociadas a la Experiencia de Usuario en la Figura. 7.3.8.

1. **No reportada** (Usuario no sensado): El nivel de interactividad del robot es bajo, por lo que el usuario puede no reconocer al robot como tal (sino considerarlo como una herramienta electromecánica convencional). No se evalúa la Experiencia de Usuario, ni con preguntas orales, ni con cuestionarios escritos.
2. **Anónima** (Usuario sensado anónimamente): La Experiencia de Usuario se analiza por grupo experimental; es decir, se realizan preguntas (cualitativas y/o cuantitativas) orales o con cuestionarios escritos a los participantes de las pruebas con usuarios, pero las respuestas del usuario no son asociadas a un participante en específico, sino que tienen un valor estadístico conforme al grupo experimental en el que participa cada persona.

3. **Personalizada** (Usuario identificado personalmente): La Experiencia de Usuario se obtiene y analiza por persona, a través de preguntas (cualitativas y/o cuantitativas) orales o con cuestionarios escritos.

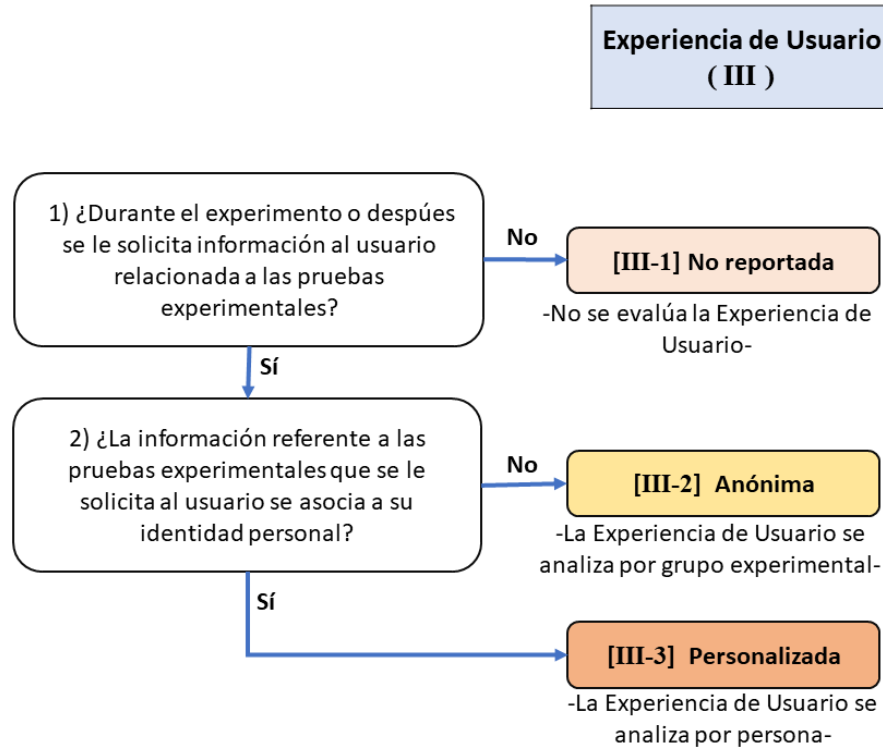


Figura 7.3.8 Preguntas Columna (III). Preguntas para seleccionar el tipo de Resultados Experimentales proporcionados directamente por el usuario (Experiencia de Usuario).

Marcadores de la herramienta metodológica para delimitar estudios con usuarios sobre la IHR.

Para mantener un registro de las decisiones tomadas en las preguntas asociadas a cada columna de la herramienta metodológica, en la Tabla 7.3.2 presento cinco tipos de marcadores que ayudan a diferenciar entre variables experimentales, variables controladas y variables de respuesta (resultados experimentales), así como el Nivel de Privacidad. Al colocar estos cinco marcadores sobre la retícula, Figura 7.3.2, se establece claramente qué características del robot permanecerán **sin cambios** durante las pruebas con usuarios, así como qué características del robot **sí serán variadas** (lo que representa la variable experimental). Cada variación de *software* o *hardware* en el robot que sea utilizada en el experimento representa un **Estado Experimental del Robot**, cada Estado Experimental del Robot requiere un marcador individual y a éste se le asociarán dos marcadores de Resultados Experimentales (uno por información almacenada en el robot y otro por la Experiencia de Usuario).

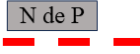




Características del Experimento	Descripción	Símbolos de los marcadores en PaK-UX	Número de marcadores por diseño experimental
Nivel de Privacidad	Relación entre los sensores del robot, la información personal del usuario y los resultados experimentales. La caja con "N de P" se coloca sobre Columna (I), mientras que la línea roja se extiende a lo largo de todas las columnas hasta cubrir las Columnas (II) y (III).		1
VARIABLES controladas	VARIABLES del robot que no cambian durante el experimento. Marcadores sobre Columnas A, B, C, o D (no se puede compartir columna con marcadores de Estado Experimental del Robot).		3
VARIABLE independiente (Variable experimental)	Cada variación de software o hardware en el Robot corresponde a un Estado Experimental del Robot que será evaluada en las pruebas con usuarios. Todos los Estados Experimentales del Robot deben de estar en la misma columna (A, B, C, o D), aunque pueden estar en diferente fila.		Uno por cada prueba experimental.
VARIABLES dependientes (Robot) (Variables de respuesta guardadas en la memoria del robot)	Resultados experimentales guardados en el Robot con los que se quiere medir el efecto de la variable independiente. Columna (II)		Uno por cada prueba experimental.
VARIABLES dependientes (Usuario) (Variables de respuesta que dependen de la Experiencia de Usuario)	Resultados experimentales que dependen de la Experiencia de Usuario (reportada por el mismo usuario) con los que se quiere medir el efecto de la variable independiente. Columna (III)		Uno por cada prueba experimental.

Tabla 7.3.2. Marcadores para delimitar el estudio con usuarios durante la IHR

Como **primer paso** para utilizar la herramienta metodológica, hay que elegir una de las 4 Partes (columnas A, B, C o D) de la IHR como área de interés del experimento, conforme las definiciones presentadas en la Tabla 7.3.1. En la columna de interés se deben de colocar todos los Estados Experimentales del Robot (EER) que serán estudiados durante las pruebas con usuarios, aunque pueden estar en diferente fila (nivel de madurez tecnológica) según se contesten las preguntas asociadas a la columna de interés conforme a cada Estado Experimental del Robot. En los casos en que el mismo EER sea utilizado en múltiples pruebas experimentales, es necesario diferenciarlos agregando una letra minúscula al marcador del EER después del número.

El **segundo paso** es marcar una casilla como variable controlada en cada una de las tres Partes de la IHR (columnas A, B, C, o D) que no fue elegida en el paso anterior, al contestar las preguntas asociadas a cada columna.

El **tercer paso** es determinar los tipos de resultados experimentales que se plantea obtener en la memoria del robot, al marcar una casilla en la Columna (II) con respecto a las preguntas asociadas a dicha columna; y de igual manera, hay que marcar una casilla en la Columna (III) referente a la Experiencia de Usuario utilizando las preguntas asociadas. Además, se tienen que contestar preguntas por cada Estado Experimental del Robot, es decir, se deben de contestar las preguntas de los Resultados Experimentales conforme a cada caso (puede darse el caso de que estén en diferentes filas).

El **cuarto paso** es demarcar el Nivel de Privacidad durante la IHR contestando las preguntas asociadas a la Columna (I). La línea punteada del marcador del Nivel de Privacidad debe de quedar en la parte inferior de la fila de la casilla seleccionada y se extenderá a lo largo de todas las columnas.

Estos pasos pueden ser seguidos en cualquier orden, siempre y cuando se cumpla que tres Partes de la IHR permanezcan constantes y solo una tenga Estados Experimentales del Robot, y que no haya marcadores por debajo del Nivel de Privacidad seleccionado. Considero pertinente aclarar que en escenarios de pruebas con usuarios (estudio experimental en ambiente controlado) el Nivel de Privacidad estará en el nivel 2 o 3, pues en un experimento se requiere la captura de datos, ya sea que se guarden en la memoria del robot o se proporcionen como Experiencia de Usuario. Sin embargo, en interacciones humano-robot en escenarios de uso comercial, es posible visualizar desarrollo tecnológico para robots con características del Nivel de Privacidad 1 (donde no se guarda información del usuario o de la IHR). Otro detalle importante es reconocer que el Nivel de Privacidad de la IHR se refiere a la privacidad del usuario conforme al nivel de madurez tecnológica del robot y al “escenario de uso del robot”, y **no** al nivel de privacidad del participante durante las pruebas experimentales (ya que, para firmar el formato de Consentimiento Informado, los participantes dan su nombre y algunos otros datos personales).

Aquí concluye la descripción de la herramienta metodológica para delimitar estudios con usuarios sobre IHR. A continuación, abordaré brevemente cómo utilicé dicha herramienta metodológica en el planteamiento y desarrollo de mi estudio con usuarios.

Aplicación de la herramienta metodológica al experimento con Lámpara-robot

En esta sección reporto cómo fue de utilidad la herramienta metodológica en mi investigación. Puntualmente, me sirvió para identificar que los participantes se enfrentarían a dos tipos diferentes de experiencias de usuario, provocadas por dos tipos de Operación del Robot (Lámpara-robot): Manual y Asistido. En el modo Manual, los usuarios son responsables de controlar todas las variables de la Lámpara-robot (altura del cabezal, brillo, intensidad luminosa, y ángulo de proyección); mientras que en el modo Asistido los usuarios son responsables de controlar únicamente la intensidad luminosa y la Lámpara-robot complementa las acciones del usuario controlando la altura del cabezal y el ángulo de proyección.

Así mismo, me ayudó a plantear los Estados Experimentales del Robot (EER) dentro de dos condiciones de prueba: (1) cambios en el desempeño del robot, y (2) cambios en el modo de Operación del Robot.

Siendo así, en las pruebas con usuarios referentes a la **condición de prueba (1)** (en las que me interesaba analizar el impacto del desempeño de la Lámpara-robot en la Experiencia de Usuario) la Lámpara-robot mantuvo el mismo modo de Operación. Esto quiere decir que, en las primeras cuatro pruebas experimentales, la Lámpara-robot mantuvo un modo de operación Manual; o sea, que los primeros cuatro Estados Experimentales de la Lámpara-robot pertenecen a la casilla [A-1].

En contraste, en las pruebas con usuarios referentes a la **condición de prueba (2)** (en las que me interesaba analizar el impacto del cambio de operación de la Lámpara-robot en la Experiencia de Usuario) fue necesario que la Lámpara-robot alternara de modo de operación, pasando de Manual a Asistido. En otras palabras, los Estados Experimentales de la Lámpara-robot para las pruebas 5 y 6 pertenecen a la casilla [A-2] (de esta manera se completa la condición al tener EER en [A-1] y [A-2]). A continuación, enlisto los EER con respecto a las seis pruebas con usuarios que se realizaron con la Lámpara-robot:

- Prueba 1. (EER 1): Ajuste de Robot Manual, Sin errores de robot programados.
- Prueba 2. (EER 2): Ajuste de Robot Manual, con 25 errores programados.
- Prueba 3. (EER 3): Ajuste de Robot Manual, con 75 errores programados
- Prueba 4. (EER 1b): Igual que la Prueba 1, para comparar repetibilidad entre mediciones.
- Prueba 5. (EER 4): Ajuste de Robot Asistido, sin errores de robot programados.
- Prueba 6. (EER 4b): Caso hipotético de interacción (se le pregunta al participante si cambiaría su evaluación anterior de haber sabido como operaba la Lámpara-robot en modo Asistido).

De esta lista se destaca que los EER de la Prueba 1 y Prueba 4 (EER 1 = EER 1b) son equivalentes, por lo que los diferencio con la letra “b”, pues en cada prueba experimental se generan resultados experimentales independientes. Ocurre la misma situación entre las Pruebas 5 y 6 (EER 4 = EER4b) que también generaron resultados experimentales independientes. La razón de diferenciar entre EER similares es que la Experiencia de Usuario puede variar cuando el participante se enfrenta a la misma situación en múltiples ocasiones.

También me ayudó a entender que utilizar la evaluación de experiencia de usuario no significa, necesariamente, que sea un estudio centrado en el usuario, pues la variable experimental utilizada es de carácter operativo, es decir, dado que la Lámpara-robot “actúa” errores, los Estados Experimentales del Robot varían conforme al desempeño de la Lámpara-robot (donde menos errores representan un mejor desempeño de la Lámpara-robot, y más errores representan un menor desempeño). Aún más, me fue posible enmarcar la metodología del estudio con usuarios, tomando en cuenta la Privacidad del usuario durante las pruebas experimentales, la Experiencia de Usuario y el tipo de datos que serían capturados por el robot durante las mismas, así como determinar el procesamiento posterior de los datos experimentales (análisis de resultados por grupo experimental y no individualmente).

A su vez, el Nivel de Privacidad del usuario para las pruebas con usuarios con la Lámpara-robot pertenece al Nivel 2 (usuario sentido anónimamente). Por lo que la información experimental recolectada por el robot, así como los cuestionarios de experiencia de usuario fueron almacenados con un número de participante. De tal suerte que los datos personales de los participantes y los datos experimentales nunca se vaciaron en una sola lista, haciendo imposible relacionar el nombre del participante con los datos experimentales resultantes (evitando así pasar al Nivel 3 donde se identifica al usuario en su persona). Abajo presento la retícula de la herramienta metodológica con los marcadores que delimitaron las pruebas con usuarios durante el experimento con la Lámpara-robot (Figura 7.3.9).

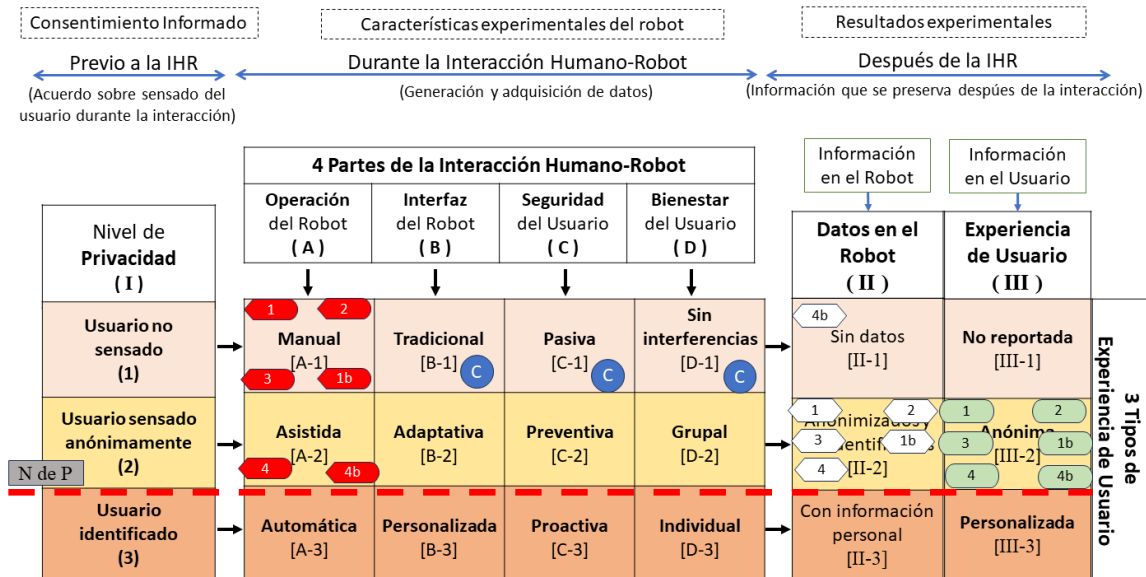


Figura 7.3.9. Herramienta metodológica aplicada al experimento sobre la Interacción Humano-Robot con la Lámpara-Robot.

Otro punto a destacar, es que en la Prueba 6 (EER 4b) se recolectó la Experiencia de Usuario de la misma forma que en las cinco pruebas anteriores, pero no se almacenaron datos en la Lámpara-robot, por lo que el marcador de resultados experimentales correspondiente a la Prueba 6 (4b) sobre la Columna (II), Datos en el Robot, está en la Casilla [II-1]. En contraste, los seis resultados experimentales correspondientes a la Experiencia de usuario, Columna (III), están ubicados en la Casilla [III-2].

En las siguientes secciones (*Diseño de cuestionario para evaluar la experiencia de usuario*, así como *Diseño y fabricación de Lámpara-robot*) comparto, respectivamente, los pasos que tomé para confiar en los resultados experimentales. Primero, para confiar en los datos que arroje el robot (priorizando la transparencia en la creación y manejo de datos provenientes de sensor directamente al usuario), así como para poder confiar en los datos que arroje la encuesta (un cuestionario de una sola pregunta minimiza la interpretación subjetiva de la experiencia de usuario).

7.4. Diseño de cuestionario para evaluar la experiencia del usuario

Dado que el producto en cuestión (un robot) captura una gran cantidad de datos resultantes de su uso (protocolo de interacción *data-driven*), permite reducir el número de preguntas que los participantes deben contestar para evaluar su experiencia de usuario. Así mismo, contestar menos preguntas disminuye el tiempo requerido para evaluar la experiencia de usuario. Por estas razones, **en este trabajo de investigación propongo evaluar la experiencia de usuario por medio de una sola pregunta (en escala Likert de 7 puntos)**; en contraste con el cuestionario presentado por Ghosh et al., el cual tiene un total de 133 preguntas para la evaluación de experiencia de usuario, el cuestionario de Bartneck et al. de 2008 que tiene 25 preguntas o el cuestionario de Koumpouros et al. de 2016 que tiene 20 preguntas.

La intención fue recolectar la experiencia del usuario con la mínima cantidad de reactivos, dado que parte de mi planteamiento de escenario de aplicación es el uso cotidiano de electrodomésticos robotizados capaces de llevar a cabo la evaluación de la experiencia de usuario por medio de información obtenida con sus sensores. Sigo el ejemplo de prácticas industriales, en las que grandes compañías (por ejemplo, Amazon, Meta, y YouTube) evalúan la experiencia del usuario por medio de un solo reactivo donde **el usuario califica su experiencia** (usualmente dentro de una escala de 5 estrellas) **o clasifica** su experiencia como positiva o negativa (por medio de “like”, “pulgar arriba” o “pulgar abajo”). Por esta razón, decidí realizar una sola pregunta cualitativa y en un espacio de respuesta cerrado (escala Likert de 7 puntos) para evitar complicaciones con el uso del vocabulario en respuestas abiertas.

7.5. Diseño y fabricación de la Lámpara-robot:

Los datos experimentales resultantes de las pruebas con usuarios corresponden a la evaluación de experiencia de usuario por medio de encuesta escrita (cualitativo) y al historial de valores de fuerza del participante apretando los botones en la interfaz de la Lámpara-robot (cuantitativo). En esta sección apunto lo más destacable del diseño y la fabricación de la bancada de pruebas robotizada en forma de lámpara de mesa, capaz de medir la fuerza con la que los usuarios aprietan sus botones y de guardar un historial de dichas mediciones. Además, la Lámpara-robot controla sus propias características de iluminación y posición, pero también controla la lámpara de techo del habitáculo y una lámpara de mesa auxiliar. Todo ello con la intención de que la Lámpara-robot pudiera llevar a cabo todo el experimento sin intervención del investigador.

Considero de central importancia la transparencia en la creación y manejo de datos experimentales (tanto cuantitativos como cualitativos), por lo que decidí fabricar el robot y el sistema de adquisición de datos, en lugar de comprar un robot prefabricado en el cual los detalles del procesamiento de señales son eclipsados por restricciones causadas por derechos de autor y secretos industriales. Para el diseño y fabricación de la Lámpara-robot prioricé la repetibilidad de eventos y la precisión de los datos generados.

El reto técnico más complicado del diseño fue crear un robot que realmente fuera interactivo (responder en tiempo real), dando total libertad a los participantes de adaptar las características del robot conforme a su gusto personal, además de tener un objetivo funcional (iluminar las lecturas de

comprensión). Otra gran complicación es que dejó a consideración de los participantes la duración de cada interacción (prueba experimental). Este detalle es muy importante, pues cada persona requiere diferente tiempo para terminar las lecturas de comprensión y contestar las preguntas. El primer paso fue definir *-robot realmente interactivo-* con las siguientes especificaciones: grados de libertad (5), precisión en mecanismos (99.5%), error en circuitos (< 0.5%), latencia máxima (100ms), adquisición y procesamiento de información (integrados en robot, sin necesidad de computación externa), automatización de pruebas experimentales (ser capaz de realizar todas las pruebas experimentales sin requerir intervención del investigador), peso máximo (<25kg), sensibilidad en botones instrumentados con sensores de fuerza (<1g).

El reto de fabricar un robot que responda en tiempo real se traduce en manejar múltiples procesos simultáneamente. Es decir, es necesario utilizar programación paralela, permitiendo que el proceso de sensar al usuario, al ambiente y a sí mismo(robot) sea ininterrumpido por las acciones del robot. En otras palabras, en un proceso de computación lineal, si al robot le toma 1 segundo subir el cabezal de iluminación al siguiente nivel, durante ese tiempo el robot no puede hacer otra cosa (ni ejecutar otra acción, ni recibir información de los sensores), el robot no sabría si el usuario dejó el dedo apretando el botón o si lo soltó. Por ello, utilicé tres microprocesadores: (1) Arduino Uno, (2) Arduino Primo y (3) Arduino Mega. Con esta configuración de procesamiento paralelo la Lámpara-robot es capaz de capturar la información de los sensores de fuerza aun cuando el robot esté en movimiento, tanto en casos donde el usuario mantiene apretado el botón, tanto en los casos donde se aprieta el botón en rápida sucesión. Ver Figura 7.5.1.

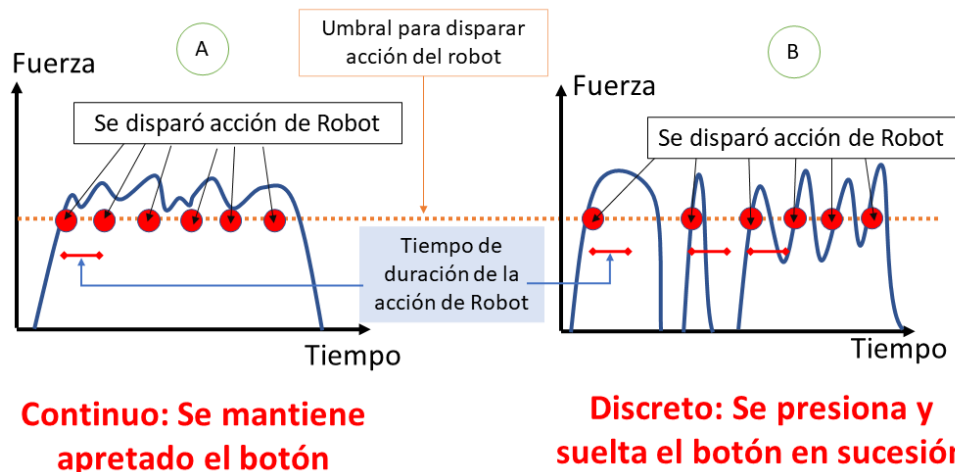


Figura 7.5.1. Comparación entre respuestas de un robot ante dos comportamientos de usuario al apretar un botón: (A) presionar el botón sin soltarlo y (B) presionar el botón intermitentemente.

Dividí la Lámpara-robot en seis sistemas (módulos) independientes para controlar el ruido y manejo de precisión; a continuación, los enlisto: (a) Procesamiento de información, (b) Mecanismos y soportes, (c) Instrumentación de interfaz de usuario, (d) Control de luminarias de habitáculo, (e) Cabezal de iluminación variable, (f) Fuentes de energía estables. Ver Figura 7.5.2.

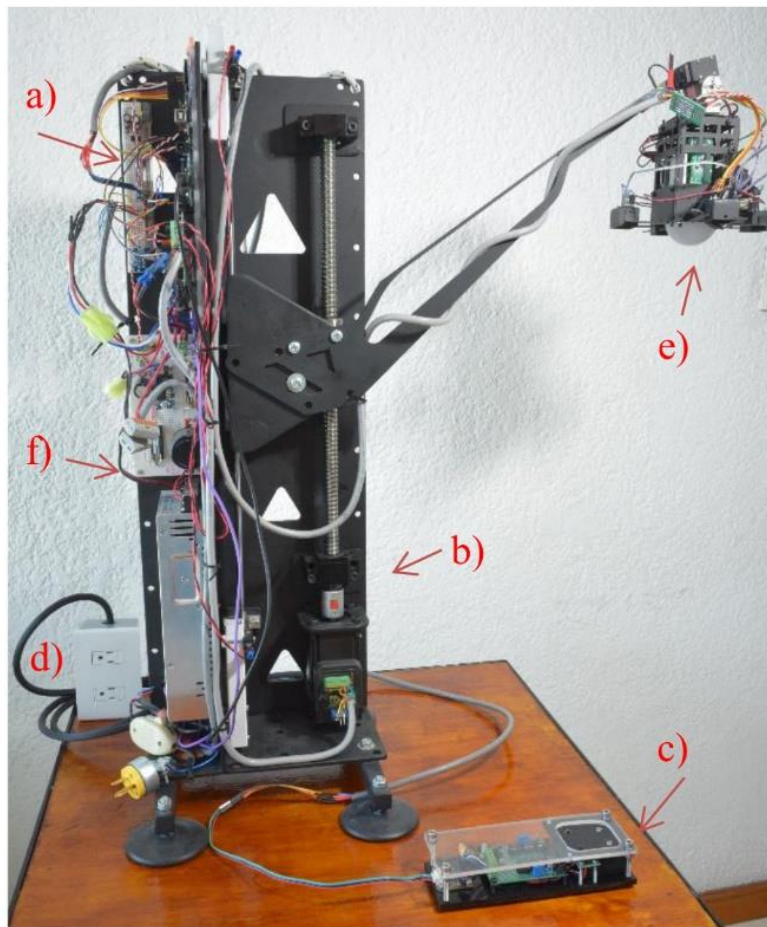


Figura 7.5.2. Toma general de la Lámpara-robot con señalización de los módulos que la componen.

(a) Procesamiento de información: Utilicé tres microprocesadores en el diseño de la Lámpara-robot para mantener la latencia menor a 100ms: (1) Arduino Uno: dedicado a controlar la altura del cabezal por medio del tornillo sin fin, (2) Arduino Primo: dedicado a controlar las cuatro luminarias de voltaje domiciliario (110Volts, corriente alterna), (3) Arduino Mega: Microprocesador central que maneja la adquisición de datos y controla el resto de las variables. Ver Figura 7.5.3.

(b) Mecanismos y soportes: El cuerpo de la Lámpara-robot está hecho de placa de metal de 5mm, el cabezal de iluminación de lámina de metal de calibre 16, elegí un tornillo sin fin y tuerca con rodamientos recirculantes impulsado por un servomotor a pasos NEMA 23, el ángulo de la lámpara y el atenuador de iluminación mecánico se manejan con servomotores de 6volts.

(c) Instrumentación de interfaz de usuario: Para medir la fuerza con la que los participantes aprietan los botones seleccioné sensores de fuerza de tipo piezoeléctrico con mínima deflexión (Honeywell FSG15), agregué tres etapas de amplificación de señal analógica (con circuitos integrados AD705, AD620 y INA122P) y para cada salida analógica coloqué un convertidor analógico digital de 16-bits, la señal digital llega al Arduino por medio de i2c.

(d) Control de luminarias de habitación: Implementé un *shell* con cuatro *relays* (@110 volts AC) conectado al Arduino Primo, cada *relay* controla una luminaria de uso domiciliario (-1- lámpara de techo, -2- lámpara auxiliar, -3- y -4- controlan las luminarias LED en el cabezal de la Lámpara-Robot).

(e) Cabezal de iluminación variable: Puse mucho empeño en generar una fuente de luz variable que fuera confiable además de que permitiera un amplio margen de control de intensidad (desde poco brillo hasta muy brillante), así que el cabezal de iluminación está compuesto por dos sistemas para variar la intensidad luminosa; el primer sistema está compuesto por tres bombillas (módulos) LED de uso doméstico modificadas para que ocupen el espacio de una sola bombilla, de esta manera se tienen 3 niveles de intensidad; el segundo sistema es un mecanismo de pequeñas persianas de metal (actuadas con servomotor) que regula la cantidad de luz que pasa de los módulos LED hacia el difusor (y finalmente al usuario) de manera mucho más gradual, con 50 niveles de atenuación. Entonces, el usuario elige el número de módulos LED encendidos, para después realizar un ajuste fino del brillo de la Lámpara-robot seleccionando el nivel de atenuación.

(f) Fuentes de energía estable: Dado que en los circuitos electrónicos la calidad de las mediciones depende de la estabilidad del voltaje de alimentación, utilicé filtrado y regulación independientes para tres líneas de voltaje de alimentación (5 volts @1amp para nivel lógico, 6 volts @2amps para alimentar servomotores, y 24 volts @8amps para motor NEMA a pasos).

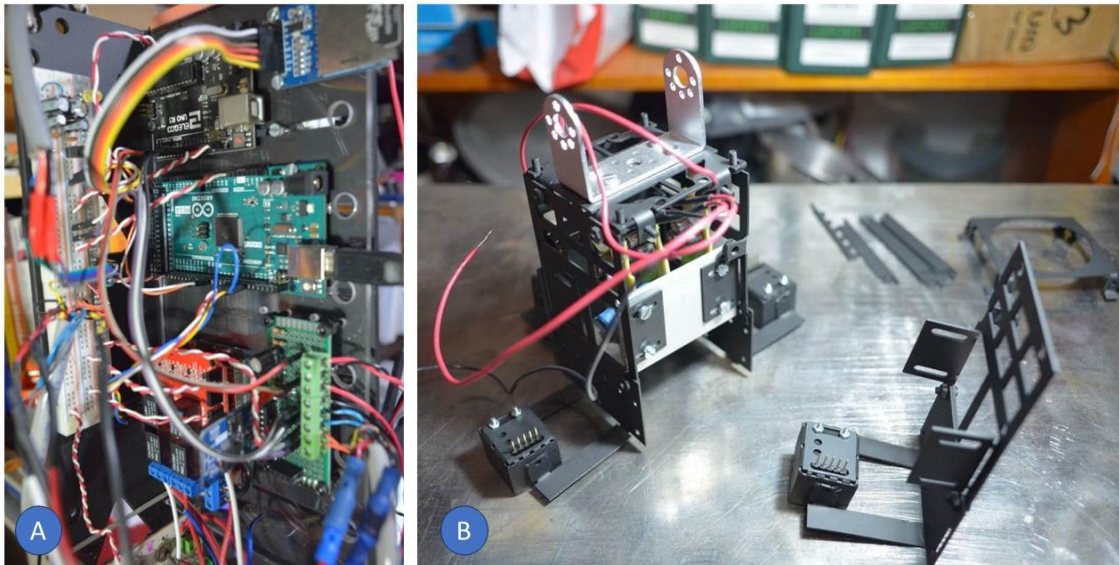


Figura 7.5.3. (A) Microprocesadores y (B) cabezal de iluminación abierto.

Para más detalle sobre la fabricación y caracterización de la Lámpara-robot, ver: (a) Apéndice B: Materiales y Herramientas, (b) Apéndice C: Fabricación de la Lámpara-Robot, (c) Apéndice D: Caracterización de la Lámpara-Robot, y (d) Apéndice J: Artículo SOMIM 2020.

Almacenamiento de datos cuantitativos de la interacción con la Lámpara-robot

Mi marco *data-driven* está definido por la capacidad de generar y almacenar datos cuantitativos provenientes de sensores y sistemas de servo-posición en el robot. La Lámpara-robot adquiere y almacena alrededor de 15,000 datos por minuto de interacción, ya que actualiza y guarda 9 veces por segundo las 28 variables enlistadas a continuación:

1. Estampa de tiempo real: con hora, minutos y segundos
2. Valor Ángulo cabezal [Función 1]
3. Valor Último Altura [Función 2]
4. Valor Último Luminaria [Función 3]
5. Valor Último Persianas [Función 4]
6. Iluminación del habitáculo (Luminaria de techo y lámpara de mesa secundaria)
7. Sensor de luz frontal
8. Sensor de luz trasero
9. Sensibilidad de los sensores de fuerza (botones “Bajar” y “Subir”) para accionar robot
10. Valor *Push* (número de veces que se han apretado los botones)
11. Valor Error (número de errores que realmente ocurrieron durante las pruebas)
12. Error por botón (cuantos de los errores fueron disparados después de apretar un botón)
13. Tiempo apretando botón “Característica” (cambia la función a controlar)
14. Número de *-pushes-* en botón “función”
15. Tiempo apretando botón “Bajar” (total)
16. Tiempo Útil apretando “Bajar” (parcial)
17. Fuerza total en botón “Bajar”
18. Energía Útil “Bajar”
19. Número de *-pushes-* en botón “Bajar”
20. Tiempo apretando botón “Subir” (total)
21. Tiempo Útil apretando “Subir” (parcial)
22. Fuerza total en botón “Subir”
23. Energía Útil “derecho”
24. Número de *-pushes-* en botón “derecho”
25. Estado de la comunicación paralela entre Arduinos (*Flag* para interrupción)
26. Número de Participante
27. Número de Prueba
28. Altura inicial de la Lámpara-robot

Ver el Apéndice J para más detalles sobre la adquisición y almacenamiento de datos, así como de la arquitectura de la Lámpara-robot.

8. Experimento: Interacción humano-robot en ambiente controlado

Fue necesario acondicionar un “cuarto oscuro” para las pruebas con usuarios. Gracias a la coordinación de Posgrado de Ingeniería en Diseño Mecánico y a la Administración del Centro de Investigación Avanzada de la Universidad Nacional Autónoma de México, se otorgó permiso para utilizar la sala de teleconferencias, pues en dicho espacio no hay ventanas y solo entra luz exterior por la puerta (la cual oscurecí para las pruebas). En este cuarto oscuro la Lámpara-robot controlaba dos luminarias más, dispuestas como parte del mobiliario del cuarto (una es la lámpara de techo y la otra la lámpara auxiliar), ver Figura 8.1. Se les dio la instrucción a los participantes de no colocar el cuadernillo (lecturas y cuestionarios) sobre la mesa, el cuadernillo debía ser detenido en una mano o colocado sobre las rodillas. Esta instrucción tiene la intención de que las características de la Lámpara-robot estuvieran relacionadas con las características de los participantes y no del mobiliario, pues cada persona sostiene las hojas a diferente altura, ángulo y distancia de su cuerpo, en cambio, la mesa siempre es igual para cualquier persona.

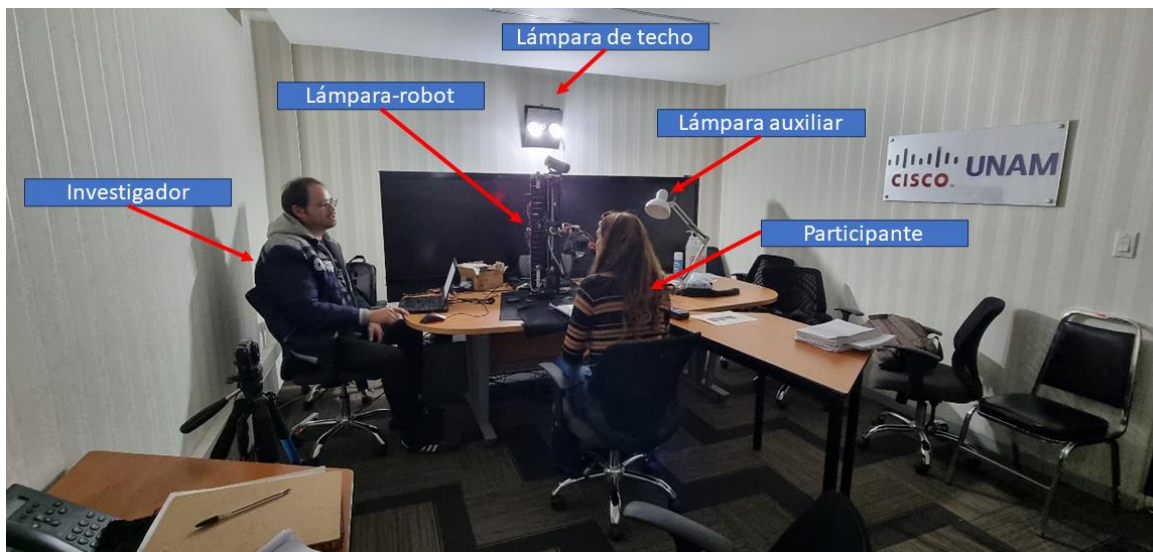


Figura 8.1. Inicio de pruebas con usuarios. Luz ambiental- lámpara de techo prendida. Lámpara-robot ‘apagada’, lámpara de mesa secundaria apagada. Con esta iluminación empezó y finalizó la participación de los voluntarios.

El protocolo experimental, desde el punto de vista del aplicador, siguió los siguientes pasos:

- (1) Saludar y agradecer al voluntario por participar.
- (2) Señalar un espacio donde dejar objetos personales que pudieran interferir en la prueba.
- (3) Otorgar cuadernillo para leer formato de Consentimiento Informado.
- (4) Señalar que, de querer participar, deben llenar sección de Datos Personales.
- (5) Solicitar que lean las instrucciones escritas sobre el proceso del experimento.
- (6) Instruir que deben apretar botón “On/Off” para comenzar a interactuar con la Lámpara-robot cuando así lo deseen.

- (7) Observar a cada voluntario realizar cinco lecturas de comprensión y contestar preguntas relacionadas, además de evaluar su experiencia de usuario.
- (8) Revelar al participante el modo de operación Asistido y preguntarle ¿con esta nueva información evaluarías tu experiencia de forma diferente? al término de la Prueba 5.
- (9) Agradecer al voluntario por su participación, dar una breve descripción del proyecto de investigación y contestar las preguntas de los participantes. Ver el Cuadernillo para participantes en el Apéndice E .

Durante las pruebas con usuarios, como estado inicial para comenzar las pruebas, la lámpara de techo del habitáculo se encontraba prendida, mientras que la Lámpara-robot se mostraba apagada, al igual que la lámpara auxiliar. Se le daba la instrucción al participante (por escrito en el cuadernillo) de apretar el botón “On/Off” para prender la Lámpara-robot cuando deseara comenzar la prueba; en cuanto el participante apretaba dicho botón, la lámpara de techo se apagaba y la Lámpara-robot se prendía (la lámpara auxiliar permanecía apagada). Después de ajustar las características de la Lámpara-robot conforme al gusto personal, de haber realizado las lecturas de comprensión, de contestar las preguntas relacionadas y de evaluar su experiencia de usuario (marcando un valor entre 1 y 7 en la escala Likert), los usuarios tenían que apagar la Lámpara-robot para terminar la prueba apretando nuevamente el botón “On/Off”. Esta vez, la lámpara auxiliar se encendía, mientras que la lámpara de techo y la Lámpara-robot quedaban apagadas. Se les instruyó a los participantes que contaran del 1 al 20 para permitir que la Lámpara-robot se reiniciara y pasara a su siguiente programación (Estado Experimental del Robot). Al terminar la cuenta, los participantes volvían a encender la Lámpara-robot (presionando “On/Off”). Una vez que cada participante realizaba las seis pruebas la Lámpara-robot se apagaba, la lámpara de techo se prendía (la lámpara auxiliar permanecía apagada), dando por terminada la participación de esa persona, y quedando el habitáculo listo para recibir al siguiente participante.

Durante la ejecución de las pruebas, el investigador únicamente observaba y verificaba que la Lámpara-robot funcionara correctamente. Ver Figura 8.2. A continuación, comparto un par de observaciones que me sorprendieron. La primera fue ver que algunos participantes trataron de usar los botones como si fueran otro tipo de interfaz. Por ejemplo, hubo quien intentó usarlos como *joysticks* empujando los botones con las uñas hacia un lado y el otro; alguien más como si fueran sensores capacitivos capaces de reconocer “gestos” de mano (en específico “*swipe*”). La segunda fue que cada participante reacciona diferente ante la frustración de que el robot falle, sin embargo, todo mundo lo expresa mediante lenguaje corporal, por ejemplo, bastantes participantes volteaban a ver la interfaz (pareciera que verificaban si le estaban atinando al botón, o si la Lámpara-robot seguía prendida), otros participantes volteaban a ver el cuerpo/cabecal de la Lámpara-robot, o también hacían ruidos con la boca y gestos faciales como “torcer la boca” o “cara de extrañeza”, hasta se dieron casos en los que participantes verbalizaron su sentir “*Qué frustrante*”, “*Creo que ya se descompuso*”, “*Creo que ya la rompí*”. Me quedó el aprendizaje de que no es necesario ser un experto en lenguaje corporal o psicoanálisis para apreciar la reacción inmediata de una persona cuando se enfrenta a un robot que no actúa conforme a lo esperado. A la vez, me sirvió para validar lo leído en la literatura respecto a la medición de la experiencia de usuario a través de observación directa de la interacción humano-robot.

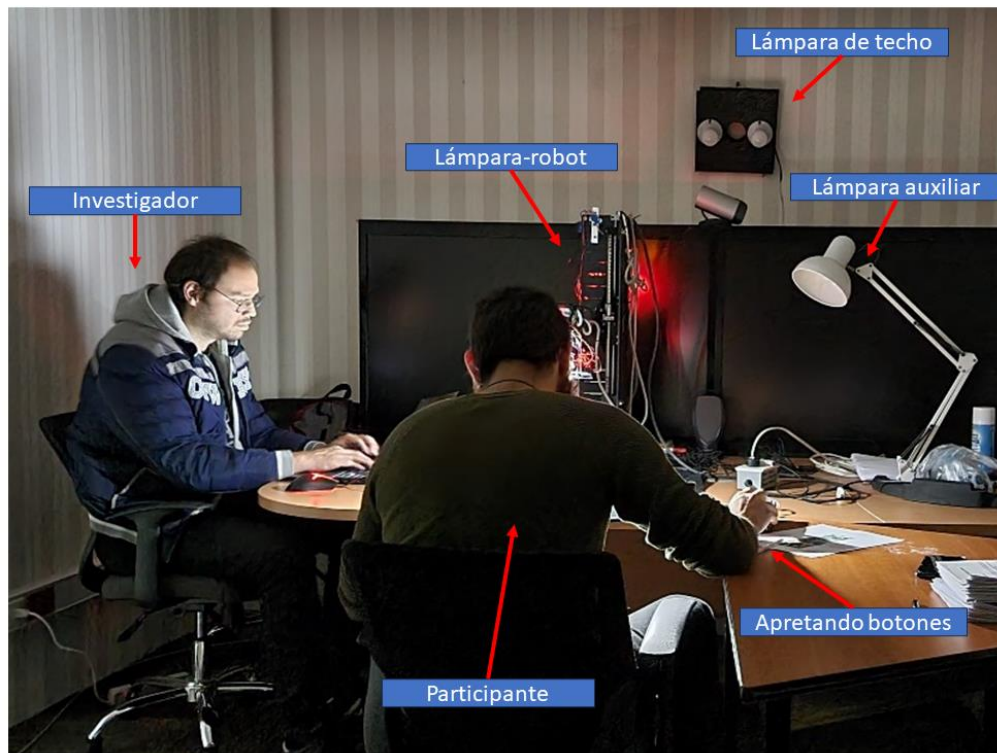


Figura 8.2. Prueba con participante en ejecución. Vista general del experimento. La Luz Ambiental y la Lámpara Secundaria están apagadas; La Lámpara-robot es la única fuente de luz.

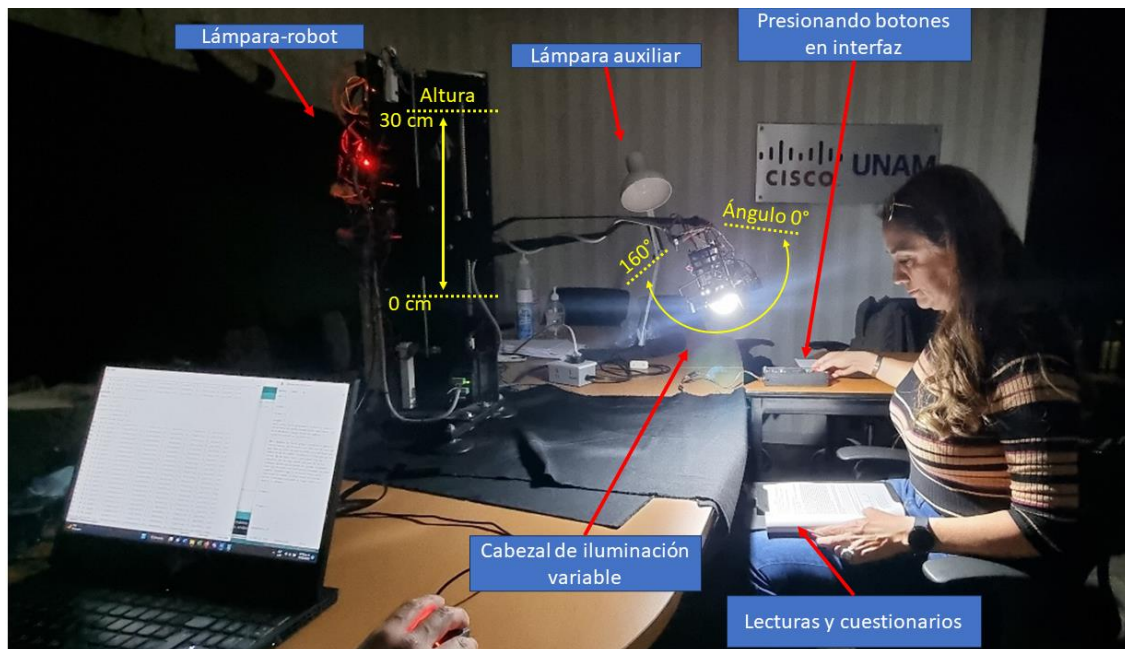


Figura 8.3. Punto de vista del aplicador. La Lámpara-robot controla también dos luminarias más en el habitáculo: una segunda lámpara de mesa y la luminaria del techo, que generan un ambiente robotizado durante todo el experimento, pasando por las 6 pruebas experimentales.

Los participantes podían ajustar:

- (1) la Altura de la Lámpara-robot en un rango de 30 cm.
- (2) el Ángulo del cabezal en un rango de 160°.
- (3) la Intensidad luminosa en un rango de 330 (de 90 a 420 luxes).

Con estos rangos de operación **la Lámpara-robot ofrece aproximadamente un millón y medio de configuraciones**, entre las cuales los usuarios eligen de manera interactiva; además, se guarda el historial del comportamiento de la Lámpara-robot y los perfiles de fuerza con la que los participantes presionan los sensores de la interfaz.

Elegí esos rangos de movimiento de forma que la altura máxima de la Lámpara-robot sobrepasara la altura de la cabeza de los participantes, y en su altura mínima el Cabezal debe de quedar por debajo de la cabeza del participante. En su ángulo máximo, 0°, el Cabezal queda horizontal, en esa orientación la luz proyecta directamente en la cara del participante (asumí que esta posición otorga una mala experiencia al usuario), en su ángulo mínimo, 160°, el Cabezal alumbraba a la base de la Lámpara-robot (de igual manera, asumo que esta orientación del Cabezal otorga una mala experiencia). La idea es que entre esos dos polos de incomodidad los participantes eligen el ángulo que encuentren más cómodo. Ver Figura 8.3.

Trabajo con esta idea de polos de incomodidad en las tres variables que los participantes debían ajustar conforme a su gusto personal. En la Altura es *muy arriba* o *muy abajo*. En el Ángulo puede ser *muy frontal* o *muy indirecto*. En la Intensidad Luminosa puede ser *demasiado tenue* o *demasiado brillante*. Concluyo que, **entre polos de incomodidad los usuarios encuentran un estado de comodidad**. Y presento como conjetura que, entre más variables y más grados de libertad tenga el robot, los usuarios tardarán más en encontrar un estado de máximo confort o mínima incomodidad, pues pasan más tiempo navegando por el control de cada variable.

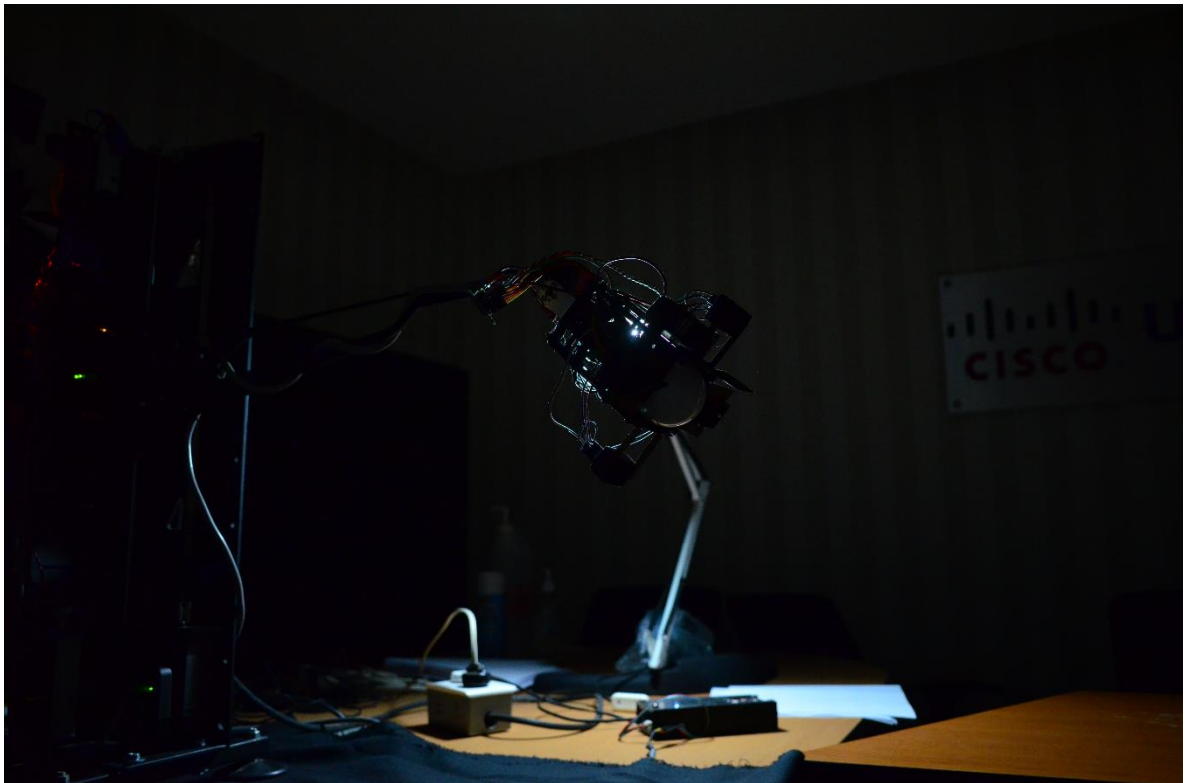


Figura 8.4. Periodo de transición entre Pruebas. La lámpara secundaria se prendía al ‘apagar’ la Lámpara-robot (lo que significaba el fin de la prueba experimental) y se apagaba al ‘prender’ nuevamente la Lámpara-robot (inicio de la siguiente prueba experimental). Este periodo entre pruebas experimentales tiene el propósito de reestablecer la vista de las personas a un estado inicial de control antes de enfrentarse al siguiente comportamiento del robot. Como se aprecia en esta imagen, la luz de transición es tenue en comparación con la de la Lámpara-robot.

9. Resultados

En esta sección presento los resultados experimentales de las pruebas con usuarios. Como mencioné en la sección de la Metodología, el experimento estuvo dividido en 3 grupos experimentales. La diferencia entre grupos fue la altura inicial de la Lámpara-robot. El Grupo 1 comenzó el experimento con el cabezal de la Lámpara robotizada en su menor altura. El Grupo 2 inició con la Lámpara en lo más alto. Mientras que el Grupo 3 empezó la prueba con el cabezal de iluminación a la altura media. En esta etapa de la experimentación participaron 46 personas voluntarias en un rango de edad entre 18 y 72 años; de las cuales 14 fueron mujeres y 32 fueron hombres, con un promedio de edad de 27.2 años (en ambos casos) y una desviación estándar de 12.6.

Presento los resultados del experimento en dos secciones. **La primera sección engloba la parte cualitativa del experimento**, correspondiente a las evaluaciones cualitativas que cada participante asignó durante las pruebas, es decir la evaluación de la Experiencia de Usuario (UX). **La segunda sección engloba los datos cuantitativos generados durante la interacción humano-robot de participantes en las pruebas experimentales**; es decir, los datos cuantitativos adquiridos por la Lámpara-robot a través de los botones de la interfaz (sensores de fuerza de alta precisión), así como de variables de estado que representan los movimientos y acciones que realizó la Lámpara en cada una de las pruebas en respuesta a las acciones de los participantes.

Cada participante evaluó cualitativamente seis pruebas diferentes, dado que participaron 46 voluntarios resultaron 276 puntos de medición de la Experiencia del Usuario. A continuación, presento el vaciado de todos los resultados cualitativos en una tabla con los 3 grupos experimentales (Tabla 9.1.1): Grupo 1 (participante 1 al 17), Grupo 2 (participante 18 al 34), y Grupo 3 (participante 35 al 46). El comportamiento esperado de los resultados experimentales era que, en promedio, la Prueba 1 fuera mejor evaluada que la Prueba 2, mientras que la Prueba 2 a su vez fuera mejor evaluada que la Prueba 3, que la Prueba 1 y la Prueba 4 fueran iguales (ya que es el mismo Estado Experimental del Robot) y que la Prueba 5 fuera peor evaluada que la Prueba 6. De hecho, vemos en la Tabla 9.1.1 que se cumplieron todas las expectativas comparativas por dupla (al observar los promedios por grupo), lo que permite concluir que el experimento comprueba la relación entre la variable experimental (comportamiento de la Lámpara-robot) y la variable de respuesta (Experiencia de Usuario reportada por el usuario mismo). Aún más destacable, se comprueba la viabilidad de evaluar eficientemente la Experiencia de Usuario con una sola pregunta cualitativa de 7 puntos en la escala de Likert, cuando se interactúa con un robot interactivo y multivariable.

A continuación, la primera sección de resultados (cualitativos).

9.1. Resultados Cualitativos: cuestionarios sobre la Experiencia de Usuario

Participante	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	
Grupo 1	1	6	3	2	6	6	
	2	5	1	2	7	5	
	3	4	1	3	5	4	
	4	4	4	5	4	3	
	5	6	4	4	7	2	
	6	7	7	6	7	5	
	7	7	7	7	7	7	
	8	7	7	7	7	7	
	9	6	6	4	6	3	
	10	5	5	2	4	3	
	11	5	6	6	7	6	
	12	7	6	6	7	4	
	13	7	6	6	6	6	
	14	7	6	7	7	5	
	15	6	4	3	7	5	
	16	5	6	5	7	3	
	17	7	7	4	7	5	
	Grupo 2	18	5	6	5	6	6
19		7	6	6	7	6	
20		4	4	3	5	5	
21		4	3	2	6	2	
22		3	4	6	7	2	
23		7	7	7	7	7	
24		6	6	6	6	6	
25		6	5	6	7	5	
26		7	5	2	7	6	
27		4	5	2	5	3	
28		6	4	5	5	6	
29		6	4	2	4	1	
30		5	4	5	6	5	
31		5	4	3	3	4	
32		6	7	6	7	6	
33		6	6	5	5	4	
34		7	7	6	7	4	
Grupo 3		35	5	5	5	6	6
	36	5	5	4	6	6	
	37	6	7	4	5	2	
	38	6	6	6	4	6	
	39	7	7	4	7	4	
	40	6	5	4	6	4	
	41	6	5	1	6	6	
	42	6	6	7	7	6	
	43	7	7	7	7	1	
	44	6	2	1	5	4	
	45	6	7	7	7	7	
	46	5	4	4	6	6	
	Promedio	5.78	5.20	4.57	6.09	4.67	6.30
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6

Tabla 9.1.1 Resultados Cualitativos. Compilado de respuestas a la encuesta cualitativa para la evaluación de la experiencia del usuario. Los colores en las columnas de las pruebas corresponden al gradiente de colores de evaluación a la pregunta de 7 puntos en escala Likert. El número 1 corresponde a una pésima experiencia (en rojo), mientras que el número 7 representa una excelente experiencia (en verde).

Los factores que considero más importantes para determinar la validez o fracaso de mi propuesta de evaluación cualitativa a la hora de analizar los resultados experimentales son: 1) consistencia interna de la evaluación, 2) evaluación "test-retest", y 3) correlación entre variables independiente y dependiente (en este caso cualitativo y cuantitativo que es la hipótesis principal de esta investigación).

Hablar de la consistencia interna de un cuestionario se refiere a analizar estadísticamente el comportamiento de las evaluaciones cualitativas de manera independiente (prueba por prueba) y también en la evaluación por grupo. De este análisis se contestan tres preguntas:

1. ¿Los resultados cualitativos obtenidos del experimento pudieron ser resultado del azar?
2. ¿Los resultados cualitativos muestran una tendencia clara? (¿La tendencia se alinea con el diseño experimental?)
3. ¿Hay diferencia significativa entre los diferentes grupos experimentales?

Para contestar la primera y segunda pregunta me apoyo en la siguiente gráfica, Figura 9.1.1, del tipo *Box and Whiskers*, que nos permite visualizar el comportamiento estadístico de cada una de las pruebas en una sola gráfica (una barra por cada prueba) y el promedio por Prueba experimental mostrado en la Tabla 9.1.1 (provenientes de los participantes). En esta gráfica se aprecia que, en promedio, los participantes evaluaron su experiencia de usuario conforme a la hipótesis del experimento, que es -Entre menos errores cometa el robot mayor será la evaluación de la experiencia del usuario-. En Prueba 1 el robot estaba programado para NO fallar, en la Prueba 2 el robot 'actuaría' un máximo de 25 errores, en la Prueba 3 'actuaría' máximo 75 errores, mientras que en la Prueba 4 el robot repetía la programación de la Prueba 1. En la Prueba 5 se evaluó el cambio de comportamiento en lámpara robot y en la Prueba 6 se probó evaluar experiencias hipotéticas.

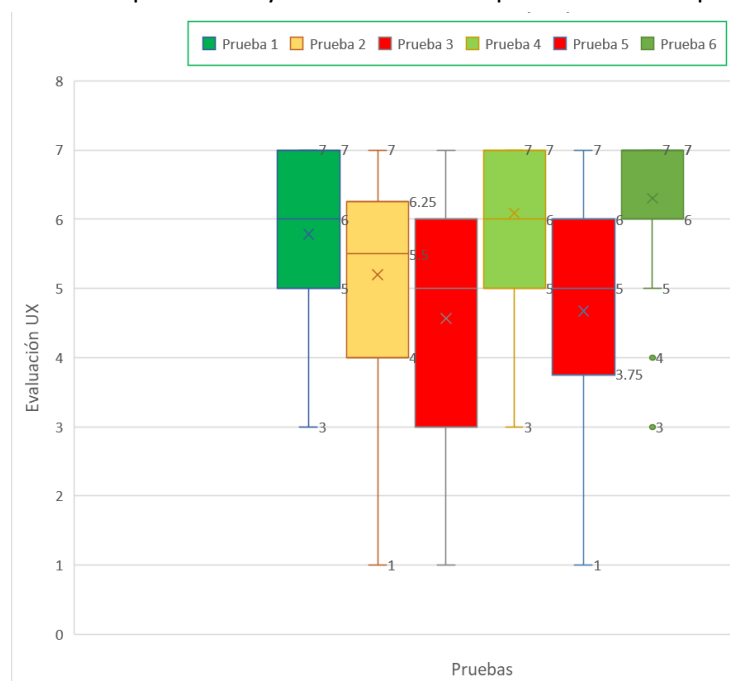


Figura 9.1.1. Gráfica *Box & Whiskers* dividido por prueba. El color de la barra corresponde al promedio de evaluaciones cualitativas por prueba (verde es positivo y rojo es negativo).

La altura de la caja (*Box*) representa la dispersión de los resultados, entre mayor sea la altura de la caja hay más variación entre los resultados. Entre menos altas sean las cajas menos variación de resultados. En la Figura 9.1.1 se muestra la dispersión de los datos cualitativos, contestando a la pregunta ¿al enfrentarse con la misma situación los participantes evalúan diferente su experiencia? Se destaca la similitud entre la Prueba 1 y la Prueba 4, lo cual indica que la prueba *test-retest* tuvo una excelente respuesta entre la variable independiente (evaluación de la Experiencia de Usuario) y las variables dependientes (Estado Experimental de la Lámpara-robot). Por ello, en la prueba *test-retest* resultó un alto grado de repetibilidad entre las evaluaciones de Experiencia de Usuario que reportaron los participantes al evaluar en diferentes ocasiones el mismo estado experimental.

Ahora pasaré a analizar si existe una diferencia significativa entre los resultados en promedio por grupo experimental, con ayuda de los promedios divididos por grupo presentes en la Tabla 9.1.2.

	Promedio de evaluación UX por prueba por grupo experimental					
Grupo experimental	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Grupo 1: Lámpara abajo	5.94	5.06	4.65	6.35	4.65	6.29
Grupo 2: Lámpara arriba	5.53	5.12	4.53	5.88	4.59	6.06
Grupo 3: Lámpara en medio	5.92	5.50	4.50	6.00	4.83	6.67
Promedios	5.80	5.23	4.56	6.08	4.69	6.34

Tabla 9.1.2. Promedios Por Grupo Experimental. Evaluación del impacto que tuvo la altura inicial del cabezal de la Lámpara en las experiencias reportadas entre prueba y prueba (filas); comparado con el impacto que tuvieron los cambios de Estados Experimentales de la Lámpara-robot entre pruebas (columnas).

La Tabla 9.1.2 permite inspeccionar de manera rápida el comportamiento de la evaluación cualitativa en respuesta al comportamiento de la Lámpara-robot (Pruebas) y a la altura inicial del cabezal (Grupos). En esta tabla se aprecia que los tres grupos comparten una tendencia clara en las evaluaciones cualitativas de las diferentes pruebas. La similitud entre valores de la misma prueba en los diferentes grupos experimentales deja de manifiesto que **el -Número de errores del robot- sí tiene un impacto significativo y directo en la evaluación cualitativa de la Experiencia de Usuario, mientras que la altura inicial de la lámpara no.**

Como siguiente paso en la validación del cuestionario de experiencia de usuario, realicé una medida de dispersión al restar el promedio general con el promedio por grupo; a continuación, presento dichos resultados en la Tabla 9.1.3.

Dado que los promedios por grupo experimental son muy parecidos entre sí, significa que la variable experimental de la altura inicial de la lámpara no tuvo repercusión en la evaluación UX. Su impacto en los resultados experimentales no es significativo estadísticamente. Por ello, es posible analizar la totalidad del experimento sin tomar en cuenta la división por grupos experimentales. De aquí en adelante me refiero a las tres muestras (tres grupos experimentales) como una sola, donde los promedios y comportamientos estadísticos se conservan casi invariantes.

	Diferencia entre promedio general y promedio por grupo						Promedios
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	
Gru. 1	3%	3%	2%	5%	1%	1%	2.3%
Gru. 2	5%	2%	1%	3%	2%	4%	2.9%
Gru. 3	2%	5%	1%	1%	3%	5%	3.0%
Promedios	3.1%	3.5%	1.3%	3.0%	2.0%	3.4%	2.7%

Tabla 9.1.3. Diferencia entre promedios. Diferencias entre promedios generales y por grupo, separadas por prueba; **la variación por grupo y por prueba se encuentran por debajo del 3%** con un promedio de promedios de 2.7% de variación tomando en cuenta el resultado de los 46 participantes.

Aún más, en la Figura 9.1.2, grafico las tendencias de evaluaciones de la experiencia del usuario por Grupo experimental. Dicha gráfica resalta la cercanía que tienen las líneas de respuesta de los tres Grupos a las seis Pruebas experimentales. Este hecho valida el correcto diseño experimental, el funcionamiento correcto de la bancada de pruebas robotizada, así como la sensibilidad satisfactoria del cuestionario escrito utilizado en esta investigación. En pocas palabras, los resultados experimentales muestran una clara relación entre variable dependiente (comportamiento de la Lámpara-robot) e independiente (Experiencia de Usuario reportada por el usuario mismo).

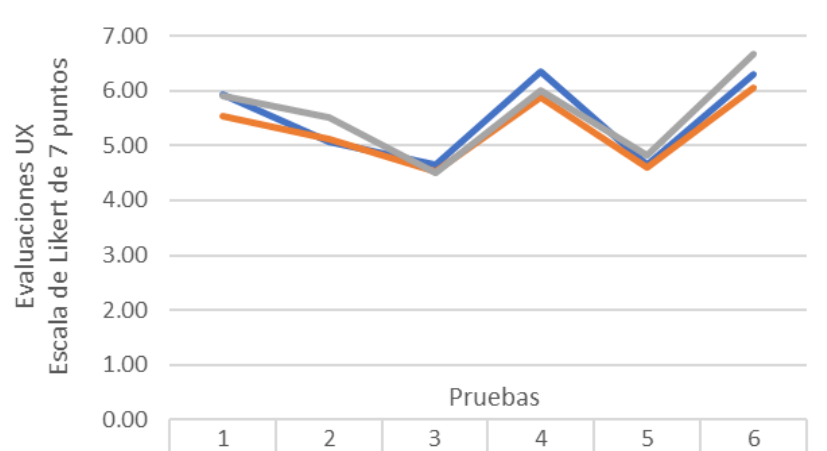


Figura 9.1.2. Comparativa de tendencias en las evaluaciones de la Experiencia de Usuario en cada prueba por grupo experimental.

Complementando el análisis de tendencias por duplas de Pruebas experimentales, comparto la Tabla 9.1.4, donde correlaciono el valor de la Experiencia de Usuario con respecto al resto de las Pruebas.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Prueba 1	1					
Prueba 2	0.598503	1				
Prueba 3	0.366977	0.668422	1			
Prueba 4	0.422978	0.374843	0.455179	1		
Prueba 5	0.304343	0.220552	0.322005	0.287919	1	
Prueba 6	0.355044	0.163998	0.237884	0.463231	0.518838	1

Tabla 9.1.4 Matriz de correlación de Pearson-r por prueba experimental.

Los valores en la escala de correlación de *Pearson-r* van de -1 a +1. Dependiendo del área científica de aplicación, la interpretación de los valores *Pearson-r* cambia. Para este trabajo de investigación consideré lo siguiente. *Pearson-r=0* significa que NO hay asociación entre los elementos, *Pearson-r=0.2* indica una correlación débil, *Pearson-r=0.5* significa una relación moderada, *Pearson-r=0.8* una correlación fuerte y *Pearson-r=1* significa una correlación perfecta. Los valores negativos significarían una correlación inversa.

Las correlaciones entre pruebas consecutivas, 1, 2, 3, y 4, apoyan la conclusión de que el - cuestionario de experiencia de usuario de una sola pregunta- tiene la capacidad de capturar eficazmente variaciones lineales en el comportamiento del robot, como fue el caso con el número de errores 'actuados' por el robot durante el experimento con participantes. Cabe recordar el número de errores que la lámpara robotizada actuó en promedio por prueba: Prueba 1=No errores, Prueba 2=25 errores, Prueba 3=75 errores, Prueba 4=Prueba 1=No errores), siendo la correlación entre la Prueba 2 y la Prueba 3 la más fuerte con *Pearson-r=0.668*.

Con estos argumentos estadísticos validé el cuestionario y el experimento. Considero necesario resaltar que las evaluaciones cualitativas de la experiencia del usuario muestran una tendencia clara y que ésta se alinea con el diseño experimental. A continuación, presento los datos cualitativos comparados y correlacionados con los datos cuantitativos obtenidos durante las pruebas con usuarios.

9.2. Resultados Cuantitativos: datos guardados por la Lámpara-robot

En respuesta a la hipótesis 1 de esta tesis, en esta sección me enfoco en correlacionar la experiencia reportada por usuarios (en cuestionarios escritos) con la información obtenida por sensores durante la interacción con la Lámpara robot. En la sección previa, Resultados Cualitativos, presenté las 276 evaluaciones cualitativas resultantes de la participación de 46 personas. Complementariamente, en esta sección, Resultados Cuantitativos, presento 17,860,630 datos cuantitativos que la Lámpara robotizada adquirió y guardó durante dichas pruebas con los 46 participantes.

El gran volumen de datos generados y almacenados es congruente con el protocolo tecnológico “*data-driven*”, cuya estrategia apliqué a la investigación de la interacción entre humano y robot. El objetivo de esta sección es describir el volumen de datos resultantes de la medición directa de los participantes a través de los sensores de la Lámpara robotizada, así como contestar las siguientes preguntas:

1. ¿Cuánto duró en promedio cada prueba?
2. ¿Cuántos datos generó y guardó la Lámpara robot?
3. ¿Es posible cuantificar la fuerza ejercida por cada participante en los botones de la interfaz?
4. ¿El número de errores que la Lámpara-robot ‘actuó’ está correlacionado con la Experiencia de Usuario?
5. ¿La altura final de la Lámpara-robot está relacionada con la evaluación UX?
6. ¿Cuál es la precisión con la que los usuarios evalúan cualitativamente dos escenarios cuantitativamente similares? (*test-retest*)
7. ¿Cuál es la precisión de los participantes al ajustar la altura de la Lámpara según su preferencia personal en una segunda ocasión?
8. ¿Cuál es el desempeño del uso de variables cuantitativas booleanas (como la que corresponde al *push-button* que solo tiene estados: -falso- o -verdadero-) con respecto al uso de variables cuantitativas escalares (como lo son los sensores de fuerza que arrojan valores enteros dentro de un rango de valores) como predictores de la evaluación cualitativa?

A continuación, presento la cantidad de exacta de datos recopilados en cada prueba experimental por participante en forma de tabla (ver Tabla 9.2.1). Es necesario denotar que, en el experimento, la Prueba 6 corresponde a una interacción hipotética, es decir, se le preguntó al participante ¿hubiera evaluado diferente su Experiencia de Usuario de haber sabido más sobre el modo de operación del robot? Es decir, se generaron datos cuantitativos para las primeras cinco pruebas, pero no para la sexta, por dicha razón aparece en ceros la columna de la Prueba 6 en la Tabla 9.2.1. Sin embargo, en las seis pruebas experimentales se generaron datos cualitativos producto de la evaluación de la Experiencia de Usuario.

Número de datos capturados y almacenados por la Lámpara_robot							
Participante	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Suma
1	50,083	50,199	40,136	46,197	55,593	0	448,282
2	32,422	80,243	65,888	68,643	61,596	0	251,227
3	93,467	107,648	82,215	54,230	84,999	0	556,829
4	53,621	63,568	52,287	45,443	17,255	0	226,055
5	51,823	51,823	52,287	45,443	17,255	0	242,208
6	61,335	51,823	58,783	58,580	66,932	0	308,792
7	51,823	45,269	52,287	65,569	21,547	0	422,559
8	54,143	45,269	83,636	77,662	81,577	0	232,174
9	69,658	79,199	102,776	98,426	81,780	0	218,631
10	53,824	48,372	72,471	88,131	85,405	0	297,453
11	44,776	54,491	68,643	37,497	41,209	0	236,495
12	41,064	41,731	39,730	41,470	48,198	0	342,287
13	45,965	41,035	50,054	52,142	65,018	0	431,839
14	43,703	34,568	39,179	42,427	48,981	0	348,203
15	36,656	46,081	50,982	64,786	89,407	0	246,616
16	61,132	49,271	88,131	86,971	87,435	0	212,193
17	53,592	59,479	80,794	66,236	53,128	0	254,214
18	78,851	58,145	72,210	58,435	51,127	0	208,858
19	43,993	62,785	86,130	68,788	70,209	0	287,912
20	72,761	61,596	91,698	80,156	63,220	0	372,940
21	68,411	43,790	74,617	36,801	50,228	0	313,229
22	50,373	65,511	42,717	58,493	62,785	0	318,768
23	49,039	56,492	60,610	45,037	54,375	0	331,905
24	99,470	46,400	65,685	59,363	78,590	0	369,431
25	44,718	60,581	55,854	69,194	65,859	0	273,847
26	54,897	41,789	51,417	59,334	50,721	0	279,879
27	70,673	57,971	68,875	54,665	69,774	0	265,553
28	42,601	28,014	33,785	51,910	43,442	0	349,508
29	63,800	59,653	66,700	49,126	62,234	0	296,206
30	80,968	72,181	62,611	64,003	55,622	0	258,158
31	73,341	72,181	114,086	121,336	100,775	0	321,958
32	94,703	102,457	114,086	121,336	100,775	0	199,752
33	63,945	97,904	105,096	126,063	101,674	0	301,513
34	80,040	55,042	74,182	47,792	59,276	0	335,385
35	81,867	66,149	51,359	65,801	77,778	0	481,719
36	41,731	96,860	110,548	75,487	96,570	0	533,357
37	66,207	69,223	103,878	96,454	69,339	0	494,682
38	76,212	55,071	75,603	89,436	57,971	0	316,332
39	81,055	103,646	131,167	139,200	109,533	0	342,954
40	47,183	47,096	51,156	53,128	93,931	0	421,196
41	57,130	51,968	53,012	43,964	69,078	0	405,101
42	93,409	65,888	105,995	78,155	74,356	0	354,293
43	46,951	42,108	46,226	37,207	44,051	0	564,601
44	59,711	34,945	72,413	52,548	61,828	0	292,494
45	88,711	116,609	105,357	101,239	38,976	0	275,152
46	57,826	51,417	79,402	45,037	89,349	0	417,803
Sumas	3,338,759	3,365,595	3,917,378	3,662,091	3,586,807	0	17,870,630
Promedios	61,514	60,729	71,886	67,160	65,886	0	331,751

Suma Total de datos capturados en el experimento

Promedio de datos capturados por participante

Tabla 9.2.1 Resultados Cuantitativos. pruebas con usuarios. El gran volumen de datos se debe a la naturaleza de la interacción humano-robot bajo un régimen *data-driven*. La Prueba 6 no genera datos al ser una evaluación de tipo hipotético.

Durante las pruebas con usuarios, la Lámpara robotizada capturó y almacenó 28 variables a la vez, 9 veces por segundo. Dando como resultado 15,120 datos por cada minuto de interacción humano-robot durante las pruebas con usuarios. Hay que destacar que el número total de datos cuantitativos adquiridos es diferente entre cada participante y entre cada prueba, pues el tiempo para realizar la lectura y preguntas de comprensión (además del tiempo en ajustar la Lámpara-robot conforme a su preferencia personal) dependía de las cualidades personales de cada participante. En promedio, los datos almacenados por cada participante fueron 331,751. Tomando en cuenta los 46 participantes, se generó un total de 17,870,630 datos resultantes de todo el experimento. A continuación, presento una gráfica del tipo *Box and Whiskers*, que nos permite visualizar el comportamiento estadístico de cada una de las pruebas mostradas en una sola gráfica (una barra por cada prueba), y así interpretar los resultados cuantitativos (provenientes del robot).

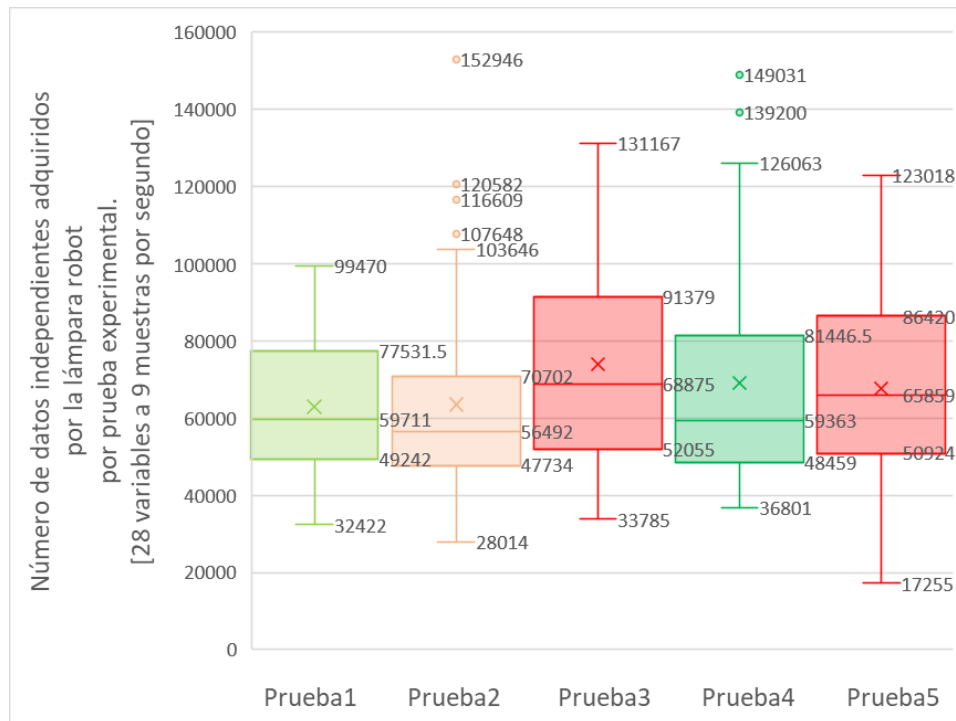


Figura 9.2.1. Número de Datos Cuantitativos. El tiempo que a cada participante le tomó terminar la lectura y preguntas de comprensión, además del tiempo en ajustar la Lámpara-robot a su preferencia se refleja en el volumen de datos generados y adquiridos durante las pruebas experimentales. Los colores corresponden a la evaluación cualitativa utilizada en figuras previas.

Lo primero que quiero hacer notar de la Figura 9.2.1 es el parecido estadístico entre las Pruebas 1 y 4, correspondiente al análisis *test-retest* que trata de dar respuesta a la pregunta ¿cómo se comportan los usuarios al enfrentarse a la misma situación experimental? En la sección anterior vimos que los participantes fueron muy precisos evaluando su experiencia de usuario en los casos donde la Lámpara-robot tuvo el mismo comportamiento (Prueba 1 y 4). Ahora vemos que la caja de la Prueba 1 y 4 son del mismo alto y se encuentran dentro de las mismas magnitudes, es decir, que en promedio se generaron el mismo número de datos en dichas pruebas. A su vez, dado que el número de datos depende del tiempo de duración de las pruebas, al graficar estos valores se evidencia un comportamiento similar, ver Figura 9.2.2, en donde se distingue que la duración

promedio de las pruebas fue de tres minutos y medio. Cabe señalar que la Prueba 6 no generó datos cuantitativos al ser una evaluación de tipo hipotética (se les preguntó a los participantes ¿evaluaría diferente su Experiencia de Usuario de haber sabido más información sobre el modo de operación del robot?).

Otra observación respecto a la Figura 9.2.2 es que, en general se cumple la hipótesis dos: “Entre menos tiempo tome al usuario completar su actividad mejor será la evaluación cualitativa que reporte”; excepto en la Prueba 2, en la cual se tiene un promedio de tiempo de interacción menor que la Prueba 1 y 4. Sin embargo, la Prueba 2 recibió una evaluación cualitativa menor en vez de ser mayor, aun siendo que en las Pruebas 1 y 4 el robot estaba programado para NO cometer errores mientras que en la Prueba 2 si cometió errores.

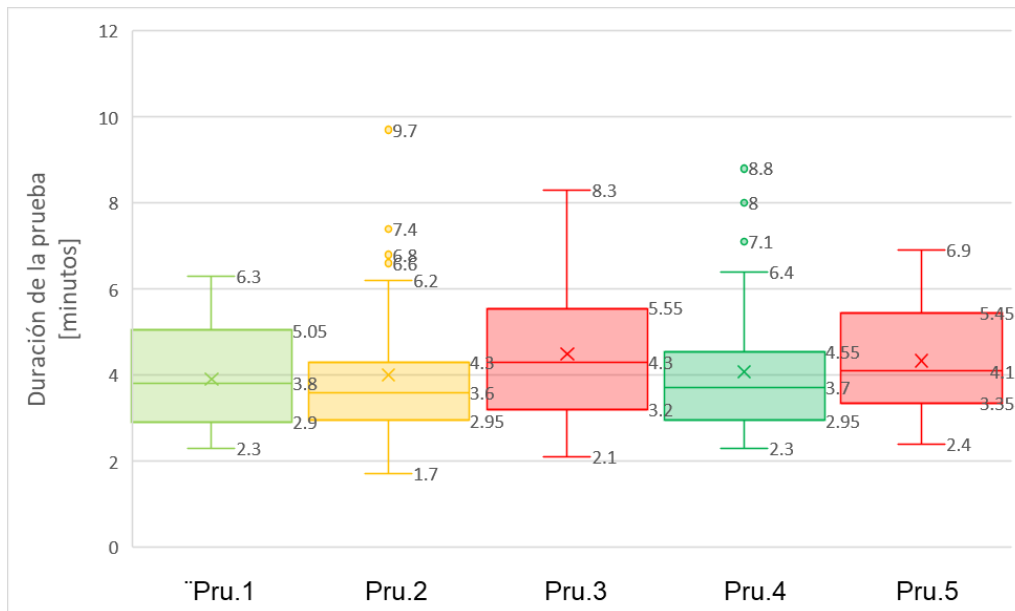


Figura 9.2.2 Duración de Prueba. El verde es buena evaluación cualitativa y el rojo corresponde a una mala evaluación.

Al analizar el número de errores del robot por prueba se encuentra una correlación fuerte con la evaluación cualitativa de los participantes, ver Figura 9.2.3. En promedio, por cada 14.5 errores de robot los participantes redujeron su evaluación en 0.9 puntos sobre la escala de 7 puntos, mientras que por 42.7 errores de robot la evaluación promedio de experiencia del usuario se redujo en 1.7 puntos sobre evaluaciones base (las evaluaciones base corresponden a las Pruebas 4, donde el robot no cometió errores y el participante ya conocía la interfaz). Lo anterior apoya la hipótesis cinco: “Entre más errores cometa la Lámpara-robot durante las pruebas, menor será la evaluación cualitativa”. Esto valida la capacidad del cuestionario escrito de una sola pregunta para evaluar errores técnicos (aleatorios y breves), siempre y cuando sea bajo un marco de interacción humano-robot *data-driven*.

La importancia de emparejar el cuestionario escrito de una sola pregunta con un protocolo *data-driven* se deriva de la complejidad que representa estudiar interacciones humano-robot donde

varias características del robot se pueden personalizar al gusto del usuario. Una complejidad extra es que el tiempo que le toma a cada participante terminar la actividad (lectura y preguntas de comprensión) es diferente, de igual manera la ruta que toma cada quien para personalizar las características de la Lámpara-robot es diferente de persona a persona.

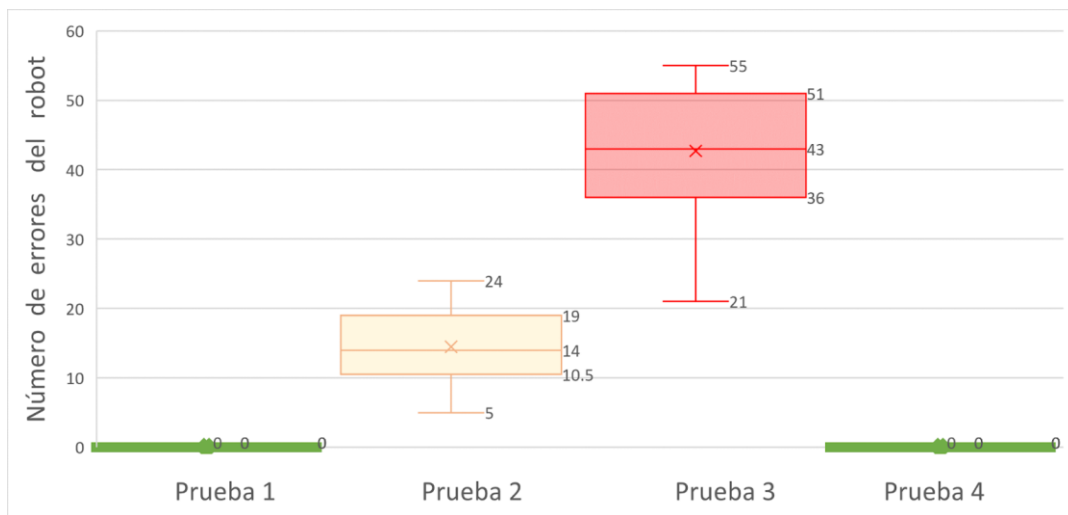


Figura 9.2.3 Número de Errores del Robot. Los colores de las barras representan la evaluación cualitativa promedio de la experiencia de usuario. En las Pruebas 1 y 4 el robot estaba programado para no cometer ningún error, en la Prueba 2 el robot podía cometer hasta 25 errores, mientras que en la Prueba 3 tenía programados 75 errores. Se cumple que entre menos errores comete el robot menor es la evaluación de experiencia del usuario. En la Prueba 5 cambia la programación del robot, pero no se cometen errores de robot, por lo que no se considera en esta figura.

Por ejemplo, algunos participantes primero ajustaron la altura de la Lámpara-robot mientras que otros el brillo o el ángulo de la misma. Esta libertad que se le dio al usuario resulta en que cada interacción fuera única, incluyendo el número de errores que el robot ‘actuó’ durante cada prueba; pues existió siempre la posibilidad de que algún voluntario decidiera apretar pocas veces los botones, lo que significa que la Lámpara-robot cometería menos errores. Es aquí donde cobra relevancia el protocolo *data-driven*, pues es necesario analizar participante por participante y prueba por prueba, lo cual solo es posible si contamos con una base de datos extensa y precisa de los eventos físicos que fueron sentidos durante la interacción humano-robot.

Dentro del protocolo *data-driven* que utilicé en la Lámpara-robot, podemos correlacionar las evaluaciones de la experiencia del usuario con dos tipos de variables almacenadas en el robot. Primero, con variables de estado del robot (describen las acciones reales que realizó el robot, ya sea iniciados por cuenta propia o en reacción a los comandos del usuario) y segundo con variables de interacción (cuántas veces, cuándo, y qué tan fuerte el participante apretó los botones de la interfaz de la Lámpara-robot). Anteriormente, en la Figura 9.2.3, he dado un ejemplo del primer tipo de correlación, emparejando las evaluaciones de la experiencia del usuario con el número de errores que ‘actuó’ la Lámpara-robot en cada prueba, mientras que a continuación, proporciono un ejemplo del segundo tipo de correlación, ver Figura 9.2.4, en la que se muestra la relación entre la cantidad de energía equivalente utilizada por los participantes al apretar los botones de la Lámpara-robot y la Experiencia de Usuario reportada por los participantes.

Lo anterior responde la hipótesis tres: “Entre más energía invierta el usuario apretando botones resultará en una peor evaluación de su Experiencia de Usuario; mientras que, a menos energía utilizada resultará en una mejor evaluación UX”. En la Figura 9.2.4 se puede apreciar que las Pruebas 1, 3, y 4 sí siguen esta hipótesis, mientras que las Pruebas 2 y 5, no. También, se aprecia que la caja de la Prueba 3 tiene los rangos de Impulso Equivalente más elevados, en promedio 206 N*s (lo que significa que se utilizó más energía apretando botones); mientras que en la Prueba 4 la caja es muy pequeña, en promedio 60 N*s (lo que significa que se utilizó menos energía apretando botones).

Es buen momento para precisar que en los cálculos de Impulso Equivalentes utilicé una medición indirecta de la energía utilizada por los participantes para apretar los botones. Formalmente, el impulso generado se trata de la sumatoria de fuerzas en intervalos de tiempo conocidos (información de los sensores de fuerza a nueve muestras por segundo). Más adelante, en la Sección 9.3 se grafican estos datos con relación al número de veces que se apretaron los botones. Es necesario destacar que la cantidad exacta de energía utilizada por los participantes no puede ser calculada por medio de sensores de fuerza, debido a que la forma en la que cada usuario generó los movimientos necesarios para apretar los botones depende de las características de cada persona. Por ejemplo, si la persona estaba tensa, o relajada, si estaba cerca o lejos de los botones. Estos factores impactan en la energía necesaria para mover el brazo y apretar los botones. Sin embargo, los movimientos corporales de los participantes resultaron en ejercer fuerza sobre los botones de la interfaz y dichos movimientos corporales utilizan energía.

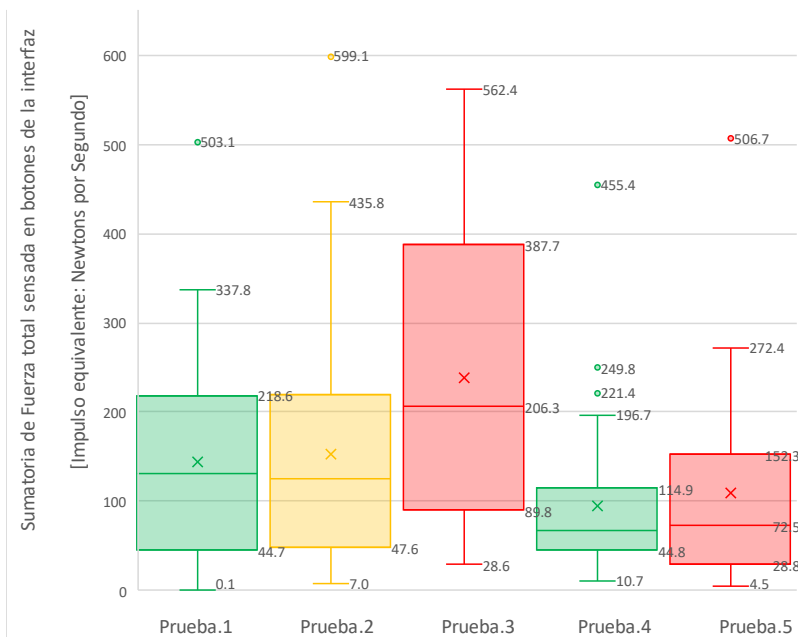


Figura 9.2.4. Sumatoria de Fuerza en Botones de Interfaz. La gráfica muestra en el eje vertical la variable de interacción -Impulso Equivalente-, éste se refiere a la suma de fuerzas utilizadas apretando botones durante la prueba experimental, lo que se representa como una única fuerza equivalente aplicada durante un segundo. Esta parametrización ayuda a estimar la energía utilizada por los participantes durante la interacción humano-robot.

A continuación, doy tres relaciones más entre datos cualitativos y datos cuantitativos de las pruebas con usuarios. La primera, en relación con la variable de estado del robot -Altura final de la luminaria- (Figura 9.2.5), la segunda, la variable de interacción -Número de veces que los sensores de fuerza fueron presionados- (Figura 9.2.6) y la tercera, -Número de veces que el botón “Cambio de función” fue presionado-(Figura 9.2.7). Estas relaciones muestran dos caras del mismo fenómeno, vemos tendencias similares en las tres, pues las Pruebas 3 y 5 se comportan de manera contrastante en comparación con las Pruebas 1, 2 y 4.

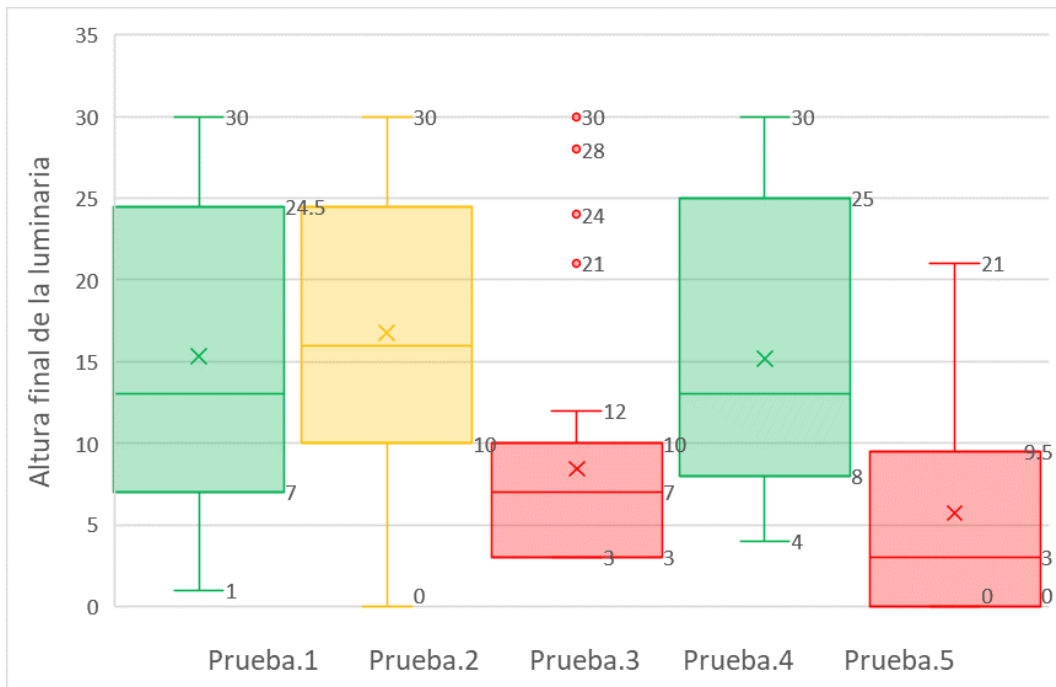


Figura 9.2.5. Altura Final de la Luminaria. El nivel de Altura más bajo, cero, corresponde a 16cm sobre el nivel de la mesa; mientras que el nivel más alto, treinta, son 46cm. La Lámpara-robot está programada para variar su altura en 30 pasos.

Durante las pruebas experimentales, los participantes podían seleccionar, según su preferencia personal, la altura de la luminaria. La Lámpara-robot se programó para tener 30 niveles de altura (1 cm cada nivel). La altura mínima de la mesa a la luminaria es de 16 cm, y en el nivel 30 se encuentra la altura máxima con 46 cm. En la Figura 9.2.5 se aprecia que la zona de confort de los participantes en condiciones donde el robot no falla, es decir en las Pruebas 1 y 4, los participantes colocaron en promedio la luminaria a 30 cm de altura con respecto de la mesa y evaluaron su experiencia como positiva. En contraste, en las Pruebas 3 y 5, la Lámpara-robot se movió por sí sola a otra altura diferente a la seleccionada por los participantes, terminando las pruebas a una altura en promedio de 20 cm sobre el nivel de la mesa; en este caso, los participantes evaluaron su experiencia como negativa.

Uno de los principales objetivos de fabricar una bancada de pruebas robotizada era investigar la reacción de los participantes a los cambios de comportamiento de un robot interactivo. En el párrafo anterior describí una de las diferencias en el comportamiento del robot en las diferentes pruebas

experimentales, y cómo dichas diferencias se reflejan en las evaluaciones de experiencia de usuario (colores de las cajas). A continuación, presento cómo esa diferencia de comportamiento de la Lámpara-robot también se refleja en los valores cuantitativos de la interacción obtenidos en la interfaz del robot (botones). En específico, el número de veces que los sensores de fuerza (variables escalares) fueron apretados durante cada prueba muestra una correlación fuerte pero inversa con respecto a la Experiencia de Usuario; es decir, entre menos veces se apretaron dichos sensores de fuerza, mejor fue la evaluación de la Experiencia de Usuario, ver Figura 9.2.6.

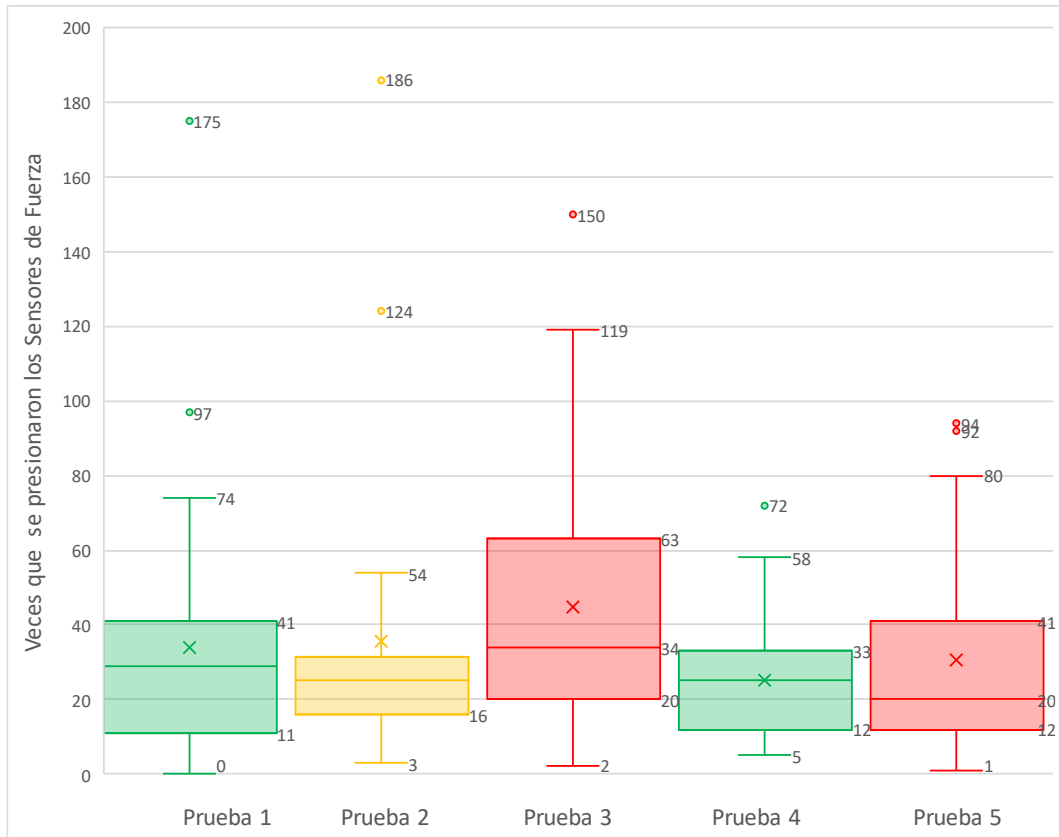


Figura 9.2.6. Número de veces que se presionaron los Sensores de Fuerza. Existe una correlación inversa entre el número de veces que se presionaron los Sensores de Fuerza y la evaluación cualitativa reportada por los participantes (Experiencia de Usuario).

Algo que es muy interesante, es el hecho de que el número de veces que se apretó el botón “Cambiar función” (variable booleana), también muestra la misma correlación con respecto a la evaluación de la Experiencia de Usuario, ver Figura 9.2.7. Esto es relevante si tomamos en cuenta la diferencia de complejidad y costo de equipar la Lámpara-robot con botones *push-button* (económicos y sencillos de implementar) en contraste con los sensores de fuerza (costosos y complejos de implementar).

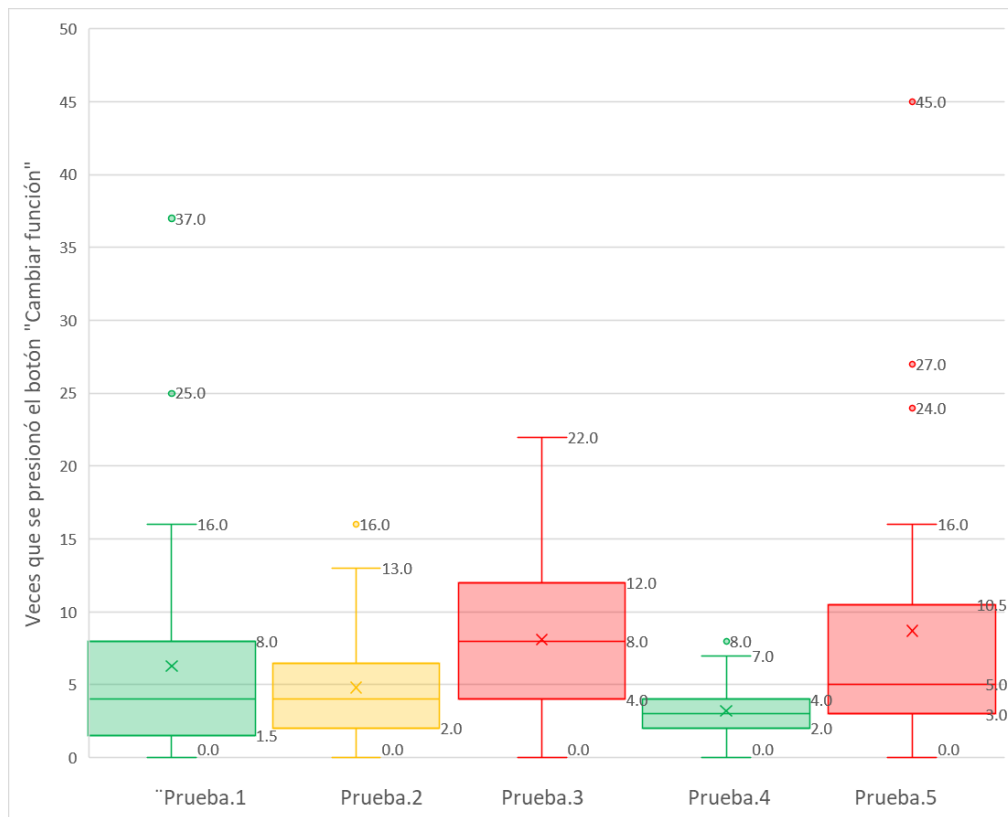


Figura 9.2.7. Cuento “Cambio de función”. El color de las barras representa la evaluación de la experiencia de usuario promedio por prueba. Existe correlación entre el número de veces que se apretó el botón “Cambiar función” y la evaluación cualitativa reportada por los participantes.

Hasta este momento he presentado relaciones entre datos cuantitativos y datos cualitativos; ahora, presento una relación entre dos variables cuantitativas, sin tomar en cuenta los resultados cualitativos. Con esto demuestro la variedad de aplicaciones que tiene sensor (con gran exactitud) al usuario, el ambiente y al robot mismo durante la interacción humano-robot, como es el caso de la Lámpara-robot que opera con un error menor al 0.1% dentro de las 28 variables que genera, procesa y almacena durante cada interacción.

A continuación, comparto una gráfica de tipo “pay” tras analizar la precisión de los participantes al seleccionar la altura de la luminaria acorde a sus preferencias personales en dos pruebas iguales y sin errores, Prueba 1 y Prueba 4, ver Figura 9.2.8; es decir, la evaluación de ¿cuál es la precisión de los participantes al ajustar la altura de la Lámpara-robot según su preferencia personal en una segunda ocasión? Para esto, calculé la diferencia entre ambas alturas (preferencias personales) y determiné un rango de similitud entre ambas. De los 46 participantes, el 68% acertó la misma preferencia en la altura de la luminaria con un rango de error menor a 3 cm, lo cual demuestra la capacidad humana de gestionar su propio confort de manera precisa. Otro 24% de los participantes tuvo un rango de variación de 10 cm en su preferencia de altura entre pruebas, es decir escasa precisión. El restante 9% mostró una nula repetibilidad entre selecciones (variación de 15cm entre las alturas seleccionadas en las Pruebas 1 y 4).

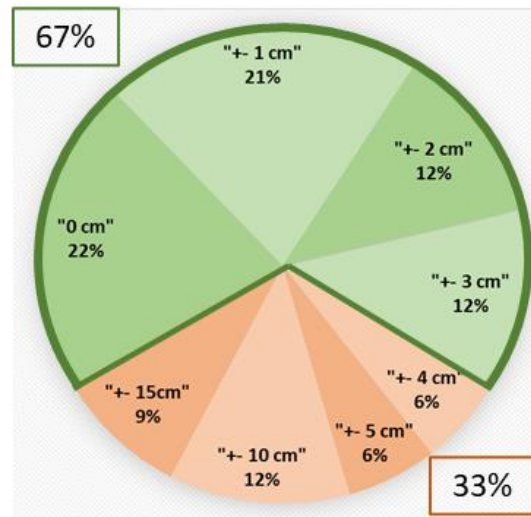


Figura 9.2.8. Repetibilidad de preferencias personales -Altura del cabezal de iluminación-. 67% de los participantes repitieron su preferencia personal con 3cm o menos de variación. Se compara la altura de la luminaria elegida por los participantes en las Pruebas 1 y 4.

Comparar la preferencia personal de dos estados de confort recae en el área de Factores Humanos y Ergonomía, donde el elemento a ser investigado son las personas en sí y no el robot o la interacción. Sin embargo, el hecho de poder extraer más información de un solo experimento justifica el esfuerzo y recursos puestos en diseñar y fabricar una bancada de pruebas 100% robotizada y funcional, pues al tener una base de datos extensa y confiable es posible investigar aspectos poco convencionales de la interacción humano-robot, como lo es la experiencia humana (datos cualitativos). Además, permite aprovechar los mismos resultados experimentales para investigar aspectos técnicos y metodológicos (datos cuantitativos). Lo que, a su vez, permite generar métricas comparativas entre cualitativo y cuantitativo, como lo hago en la siguiente sección y última parte de los Resultados del experimento sobre la interacción de usuarios con la Lámpara-robot.

9.3. *Correlación de resultados cualitativos y cuantitativos*

El objetivo principal de esta investigación doctoral fue determinar si es posible ligar (y en dado caso hasta inferir) la evaluación subjetiva de los participantes (Experiencia de Usuario: UX) a mediciones directas y objetivas de la Interacción Humano-Robot (IHR), con el fin de tener una métrica que nos permita transportar la opinión del usuario a fenómenos medibles de la IHR. Específicamente, variables de la IHR que son aplicables a distintos escenarios de uso (hogar, oficina, industria, etc.) y a diversos tipos de robot (humanoides, brazos robóticos, electrodomésticos, vehículos, etc.).

En esta sección abordo el análisis multidimensional de la IHR, tomando en cuenta las hipótesis iniciales: (hip.2) a menor tiempo apretando botones mejor UX e (hip.3) a menor energía utilizada durante la IHR mejor UX. Dicho análisis multidimensional es el culmen de este trabajo de tesis y queda plasmado en la Figura 9.3.1, Tabla 9.3.1, Tabla 9.3.2 y Tabla 9.3.3.

La Figura 9.3.1 es una gráfica de tres dimensiones: dos dimensiones representadas en los ejes coordenados ("X" => Tiempo y "Y" => Sumatoria de Fuerza) y la tercera dimensión representada con escala de colores (UX). La manera de interpretar dicha gráfica conforme a las hipótesis es la siguiente: entre más a la derecha (más Tiempo) y más arriba (mayor Sumatoria de Fuerza) esté un punto de información, es más probable que dicho punto esté corrido al rojo. Por el contrario, entre más a la izquierda (menor Tiempo) y más abajo (menor Sumatoria de Fuerza) esté un punto de información, es más probable que dicho punto esté corrido al verde.

El representar los puntos de información con escalas lineales en los ejes coordenados nos permite visualizar que, a pesar de las diferentes características personales de cada individuo, la mayoría de las interacciones se aglomeran cerca del origen, ver Figura 9.3.1 (A). Por el contrario, el representar los mismos puntos de información, pero con escalas logarítmicas en los ejes coordenados, ver Figura 9.3.1 (B), revela un comportamiento cuasi-lineal (es decir, la nube de puntos se aglomera conforme a una línea recta en diagonal). En esta representación logarítmico-logarítmico, se aprecia que las tendencias propuestas en la hipótesis (2) e hipótesis (3) se cumplen; es decir, los puntos rojos y naranjas (malas Experiencia de Usuario) se encuentran arriba y a la derecha; mientras que los puntos abajo y a la izquierda son verdes (buenas Experiencias de Usuario); así mismo, los puntos amarillos están en medio.

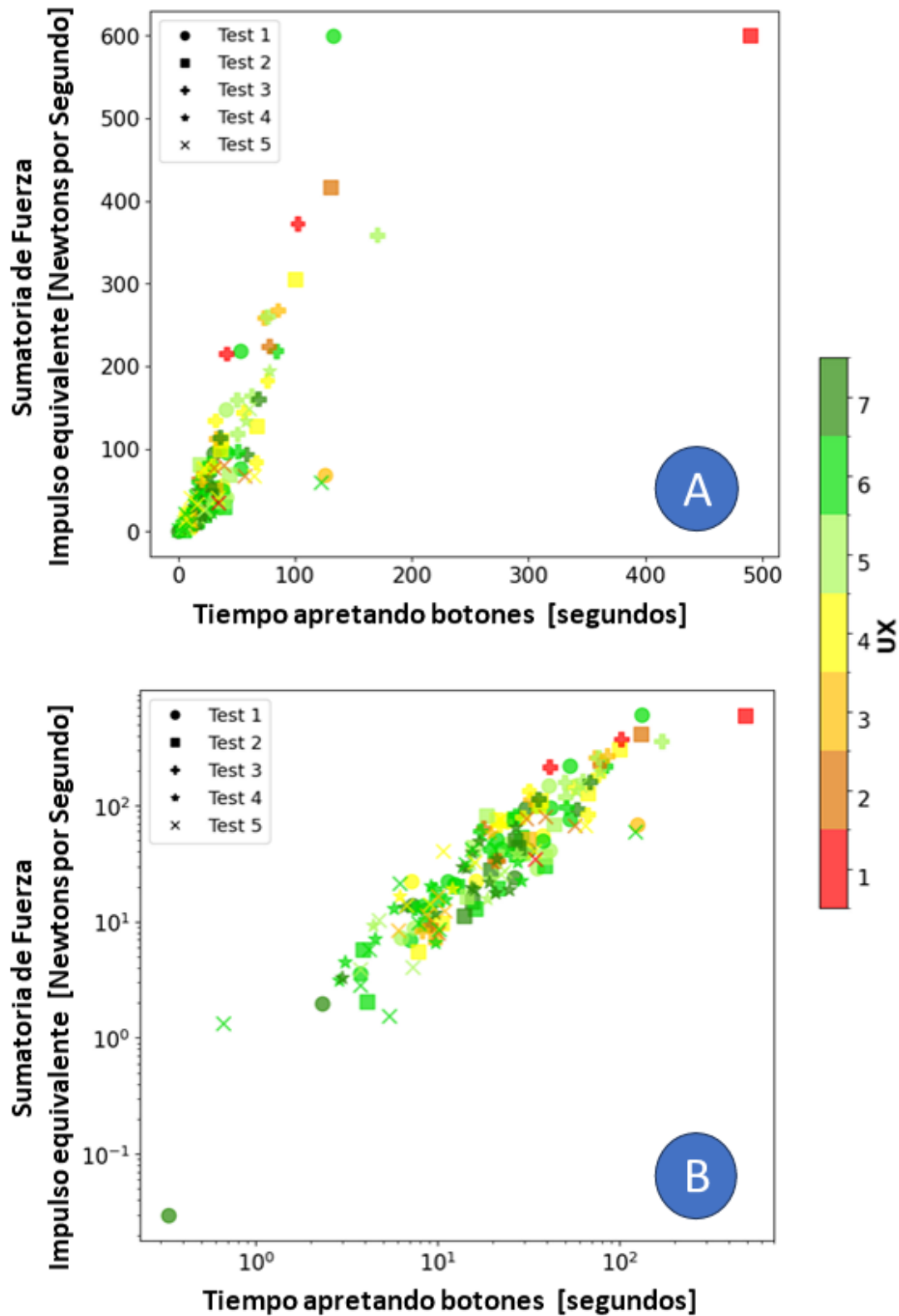


Figura 9.3.1. Gráfica de los resultados experimentales correlacionando variables cuantitativas (tiempo apretando botones e Impulso equivalente al presionar botones) con la evaluación cualitativa de la Experiencia de Usuario (escala de colores UX: verde es positivo y rojo es negativo) (A) Escala lineal-lineal, (B) Escala logarítmica-logarítmica.

Complemento estas gráficas con una evaluación analítica, mediante la correlación de Pearson-r entre: (1) “Sumatoria de Fuerzas” Vs. UX total en Tabla 9.3.1, (2) “Tiempo apretando sensores de fuerza” Vs. UX en Tabla 9.3.2, y (3) “Número de veces que se apretaron los botones” Vs. UX en Tabla 9.3.3.

Tabla 9.3.1 Correlación Sumatoria de Fuerzas Vs UX	Correlación Pearson-r
Correlación por participante (1 a 5)	-0.32
Correlación por participante (2 a 4)	-0.51
Correlación por promedio por Prueba (1 a 5)	-0.49
Correlación por promedio por Prueba (2 a 4)	-0.99

Tabla 9.3.2 Correlación Tiempo apretando sensores de fuerza Vs UX	Correlación Pearson-r
Correlación por participante (1 a 5)	-0.31
Correlación por participante (2 a 4)	-0.39
Correlación por promedio por Prueba (1 a 5)	-0.51
Correlación por promedio por Prueba (2 a 4)	-0.96

Tabla 9.3.3 Correlación Número de veces que se apretaron los botones Vs UX	Correlación Pearson-r
Correlación por participante (1 a 5)	-0.32
Correlación por participante (2 a 4)	-0.40
Correlación por promedio por Prueba (1 a 5)	-0.66
Correlación por promedio por Prueba (2 a 4)	-0.99

En los tres casos comparo la correlación entre puntos de información por Participante y por promedio por Prueba Experimental. Estas comparaciones denotan la relación entre cada variable cuantitativa y la evaluación cualitativa de la Experiencia de Usuario (UX). Las correlaciones de los promedios por Prueba Experimental, tomando en cuenta las cinco pruebas, son moderadas e inversas en los tres casos (-0.49, -0.51, y -0.66, respectivamente). Estos resultados son muy significativos, dado que se utilizó un solo reactivo para evaluar la Experiencia de Usuario. Aún más sobresaliente, al calcular las correlaciones tomando en cuenta únicamente los promedios de las pruebas 2,3 y 4 (parte lineal del experimento, sin tomar en cuenta la primera prueba dado el efecto de “primera interacción”) se obtuvieron correlaciones muy fuertes (-0.99, -0.96 y -0.99 respectivamente). Esto último indica que es altamente viable utilizar los datos cuantitativos generados durante la interacción humano-robot como indicadores de la experiencia de usuario (cuando se analiza por grupo experimental y no por individuo).

Sin embargo, al calcular dichas correlaciones por punto de información individual (UX por participante), y tomando en cuenta las cinco pruebas, las variables de “Sumatoria de Fuerzas”, “Tiempo apretando sensores de fuerza” y “Número de veces que se apretaron los botones” mostraron una correlación inversa y débil (-0.32, -0.31 y -0.32 respectivamente). Complementariamente, al calcular las correlaciones por participante y tomando en cuenta las

pruebas 2, 3 y 4 (parte lineal del experimento) se obtuvieron correlaciones ligeramente superiores (-0.51, -0.39 y -0.40 respectivamente).

Resumiendo, los datos cuantitativos obtenidos durante las interacciones humano-robot; referentes a: (1) "Sumatoria de Fuerzas", (2) "Tiempo apretando sensores de fuerza" y (3) "Número de veces que se apretaron los botones", sí sirven como indicadores de la evaluación de la Experiencia de Usuario, siempre y cuando se calculen los promedios por grupo experimental. Por otro lado, dichos datos cuantitativos son menos significativos de manera individual (por participante) y deben de ser analizados con respecto al contexto de la interacción humano robot.

10. Conclusiones

Los resultados experimentales muestran una correlación inversa y fuerte entre la evaluación cualitativa de la Experiencia de Usuario y los datos generados durante la Interacción Humano-Robot. Estos resultados demuestran la viabilidad del método presentado en esta tesis, con el cual es posible evaluar efectivamente la experiencia del usuario durante la interacción humano-robot con una sola pregunta cualitativa de 7 puntos en la escala de Likert.

Abordando directamente la pregunta de investigación. Los resultados experimentales presentes en este trabajo de tesis responden afirmativamente a la pregunta de investigación: ¿Existe correlación entre los datos generados por el robot (información cuantitativa) durante la Interacción Humano-Robot y la Experiencia de Usuario (información cualitativa)? Dado que se encontraron correlaciones fuertes entre datos del robot y las evaluaciones de Experiencia de Usuario, concluyo que, el concepto de -Experiencia de Usuario- es útil para evaluar pequeños cambios en el desempeño del robot. Mi contribución específica fue utilizar un cuestionario para la evaluación de la experiencia del usuario de una sola pregunta de 7 puntos en escala Likert para interacciones humano-robot bajo un marco *data-driven*, simplificando el difícil proceso de elegir, diseñar, y analizar un cuestionario con múltiples reactivos (como es el caso de los diferentes cuestionarios existentes en la literatura).

Otra conclusión, es más significativo analizar el cambio de la evaluación de Experiencia de Usuario entre pruebas experimentales, que comparar directamente el valor numérico en las escalas Likert. Es decir, es más relevante encontrar los factores cuantitativos que propician que los participantes evalúen como “mejor” o “peor” su experiencia personal conforme a interacciones y evaluaciones consecutivas, en vez de intentar generar una escala absoluta.

Además, concluyo que, es más útil trabajar con los conceptos de “mejor” o “peor” experiencia, en vez de “buena” o “mala” experiencia, debido a que es muy complejo establecer una escala a priori con los gustos personales para sistemas o productos completamente novedosos, a diferencia de ello, al realizar el cambio por la tendencia, se puede ver de manera comparativa (mas no absoluta) entre evaluaciones consecutivas.

El impacto de esta investigación en el campo del diseño mecánico y la interacción humano-robot se debe a que la interacción cotidiana de usuarios con robots genera un rastro de información que puede utilizarse para ayudar al robot a adaptarse al usuario. En este sentido, los resultados de esta investigación doctoral apuntan a que es posible la evaluación de la experiencia del usuario por medio de la generación, almacenamiento y análisis de datos provenientes de sensor **anónimamente** al usuario durante la interacción humano-robot.

De manera experimental, demostré que **el -Número de errores del robot- sí impacta directamente en la evaluación cualitativa de la experiencia del usuario, mientras que la altura inicial de la lámpara, no**. Interpreto lo anterior como signo de que la experiencia del usuario depende en mayor medida del comportamiento que el robot sostenga a lo largo de la prueba, y en menor medida del estado del robot al iniciar la interacción. Este detalle es relevante no solo para interacciones entre humanos y lámparas robotizadas, sino para cualquier interacción humano-robot

donde se requiera adaptar las características del robot en respuesta a las características o deseos del usuario. Además, así como el número de errores del robot impactan la experiencia del usuario, los datos cuantitativos demostraron que el número de errores del robot también repercuten en el comportamiento de los usuarios y que se utiliza más la interfaz de usuario conforme más errores comete el robot. Es decir, la interacción humano-robot se vuelve menos eficiente conforme se requieren más acciones para alcanzar el objetivo deseado.

Por otro lado, parece ser que la pregunta ¿cuál debe de ser la posición inicial de un robot para esperar al siguiente usuario? tiene como respuesta: -donde sea , pero una vez que comience la interacción se debe ajustar al usuario actual-. Ya que no es posible saber las características del siguiente usuario con certeza, lo más adecuado sería utilizar datos de factores humanos y ergonomía. Así mismo, considero que este punto se puede interpretar como la existencia de un límite en la metodología aquí utilizada y la falta de capacidad del cuestionario cualitativo de una sola pregunta para evaluar cualidades del robot que tengan que ver únicamente con el estado inicial del robot.

En el experimento, el número de errores del robot y la evaluación cualitativa de la experiencia del usuario mostraron una relación directa: **un promedio de 14 errores de robot significó una reducción de 0.6 puntos de evaluación UX**; mientras que un promedio de **43 errores por prueba significó una reducción de 1.2 puntos** en la escala de Likert de 7 puntos durante la evaluación UX.

Dentro del protocolo *data-driven* que utilicé en la Lámpara-robot, **podemos correlacionar las evaluaciones de la experiencia del usuario con dos tipos de variables almacenadas en el robot**. Primero, con **variables de estado del robot** (describen las acciones reales que realizó el robot, ya sea iniciados por cuenta propia o en reacción a los comandos del usuario) y, segundo, **con variables de interacción** (cuántas veces, cuándo, y qué tan fuerte el participante apretó los botones de la interfaz de la Lámpara-robot).

Dentro de los resultados de seguir el protocolo *data-driven* implementado en esta investigación, encontramos variables de estado del robot que se relacionan fuertemente con la evaluación de la experiencia del usuario, como lo es la -Altura final de la Luminaria-. En promedio, los participantes evaluaron positivamente su experiencia cuando la Lámpara terminó la prueba a 30 cm de altura (Pruebas 1 y 4), y negativamente cuando terminó la prueba con la luminaria a 20 cm de altura de la mesa (Pruebas 3 y 5). Con estos datos concluyo que el error de la Lámpara-robot de -no mantener la altura deseada- fue el error que más impactó en la evaluación de la experiencia de usuario.

Es sorprendente cuánto se puede conocer del usuario por medio de los datos generados durante la interacción cotidiana con dispositivos robotizados o “inteligentes”. Es necesario tener en mente que la información que abordé en esta tesis es solo una pequeña muestra del alcance y profundidad de las consecuencias (y utilidades) que pueden derivar del uso de protocolos *data-driven*. Considero que la investigación sobre la Interacción Humano-Robot tendrá un auge propulsado por el advenimiento de la robótica ubicua. Desde un punto de vista de diseño mecánico, tenemos como ventaja poder analizar tanto la parte tecnológica como la parte de satisfacción del cliente (mediante evaluación de la Experiencia de Usuario), lo cual nos permite convertir interacciones cotidianas en

sesiones de generación de datos altamente confiables y cuantificables. Enfocándonos en, pasar de la interacción física con el objeto a datos cuantitativos (resolviendo el diseño y fabricación de robots, así como el sensado y procesamiento de señales) a desarrollar productos que ofrezcan experiencias personalizadas en tiempo real, y que no solo se centren en la comodidad instantánea, sino también, en el bienestar a largo plazo del usuario.

Finalmente, destaco que los robots tienen la peculiaridad como productos, que por diseño ya están provistos de sensores para su funcionamiento y operación, lo cual promueve la migración de técnicas y protocolos *data-driven* resultantes de pruebas experimentales a los productos finales.

11. Trabajo a futuro

Divido el trabajo a futuro en dos partes, primero lo que es posible realizar con lo que desarrollé para esta investigación doctoral (Lámpara-robot y base de datos con más de 17,860,630 de datos). La primera parte consiste en realizar un análisis estadístico de la base de datos utilizando inteligencia artificial para encontrar relaciones no triviales; por ejemplo, redes neuronales o *random-walks*. Ello se debe a que el uso de algoritmos de inteligencia artificial permite estudiar relaciones secundarias, así como efectos de combinación de factores por medio de análisis multidimensionales.

La bancada de pruebas robotizada de cinco grados de libertad, la Lámpara-robot, puede adaptarse para explorar diferentes protocolos de interacción y escenarios de uso. En sí, hacer la mayor cantidad posible de experimentos de cualquier índole, corroborará el diseño robusto y modular de la Lámpara-robot. Además de promover el crecimiento de la base de datos cualitativos de alta precisión (error <0.5%).

Lo que sigue por hacer. Es necesaria investigación enfocada en el impacto de la interacción humano-robot a largo plazo, para generar paradigmas de diseño con respeto a la privacidad de los usuarios y que generen bienestar social, sin provocar la pérdida de autonomía de las personas al estar bajo la influencia constante y ubicua de agentes robotizados. En el presente podemos ver las nefastas tendencias en mercadotecnia de utilizar la tecnología y estrategias psicológicas-biológicas para “atrapar” al cliente; además, prácticas rapaces como compartir datos personales de los clientes. Hoy, las grandes compañías tienen nuestro número de teléfono y se la pasan molestando con llamadas vendiendo seguros o tarjetas de crédito. Mañana, nuestros datos personales incluirán el historial de nuestro estado de ánimo y estado de salud; ¿qué harán entonces estas grandes compañías con dicha información? ¿espontáneamente se volverán éticas y responsables?

He aquí la necesidad de generar conocimiento independiente, preciso y confiable que nos permita generar alternativas de diseño de alto valor agregado (robots). Con lo aprendido durante la investigación doctoral, considero que la clave es diseñar teniendo como eje central al usuario. Abordando desde la etapa inicial de diseño las posibles implicaciones de los datos generados durante la interacción humano-robot con respecto a la privacidad del usuario. En este aspecto hago la siguiente recomendación: tener un manejo transparente del procesamiento de datos, evitar “cajas negras” y servicios externos (almacenamiento en la nube, etc.) que vulneren la seguridad de los datos adquiridos durante las interacciones humano-robot, desde su creación, hasta su almacenamiento o destrucción.

12. Referencias

- (1) Alabdulkareem, Amal, Noura Alhakbani, and Abeer Al-Nafjan. 2022. "A Systematic Review of Research on Robot-Assisted Therapy for Children with Autism" *Sensors* 22, no. 3: 944. <https://doi.org/10.3390/s22030944>
- (2) Alenljung, B., Lindblom, J., Cort, R., & Ziemke, T. (2017). User Experience in Social Human-Robot Interaction. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence*. Vol.8. pp.12-31.
- (3) Amos, B., Ludwiczuk, B., & Satyanarayanan, M. (2016). OpenFace: A general-purpose face recognition library with mobile applications. School of Computer Science, Carnegie Mellon University.
- (4) Bajcsy, A., Losey, D. P., O'Malley, M. K., & Dragan, A. D. (2017). Learning Robot Objectives from Physical Human Interaction. 1st conference on Robot Learning (CoRL 2017), Mountain View, United States.
- (5) Bartneck, C., Kulić, D., Croft, E. et al. Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots. *Int J of Soc Robotics* 1, 71–81 (2009). <https://doi.org/10.1007/s12369-008-0001-3>
- (6) Bhattacharjee, T., Gordon, E.K, Scalise, R., Cabrera, M.E., Caspi, A., Cakmak, M., & Srinivasa S.S. (2020). Is More Autonomy Always Better? Exploring Preferences of Users with Mobility Impairments in Robot-assisted Feeding. 2020 15th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), pp. 181-190.
- (7) Bonin, D., Stankiewicz, L., Thomas, C., Deuse, J., Kuhlenkötter, B., & Wischniewski, S. (2016). Digital Assessment of Anthropometric and Kinematic Parameters for the Individualization of Direct Human-Robot Collaborations. In: *Proceedings of the 7th International Conference on 3D Body Scanning Technologies*. Lugano, Switzerland, pp.171-181. DOI: 10.15221/16.171
- (8) Campbell, A. T., Eisenman, S. B., Lane N. D., Miluzzo, E., Peterson, R. A., Lu, H., Zheng, X., Musolesi, M., Fodor, K., & Ahn, G. S. (2008) The Rise of People-Centric Sensing, *IEEE Internet Computing*, 12 (4), 12-21. doi: 10.1109/MIC.2008.90.
- (9) De Luca, A., & Flacco, F. (2012). Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), Rome, Italy, 2012, pp. 288-295, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290917
- (10) De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A., & Bicchi, A. (2008). An atlas of physical human-robot interaction. *J. Mech. Mach. Theory* 43(3), pp. 253-270.
- (11) Deuse, J., Grötsch, A., Stankiewicz, L., & Wischniewski, S. (2016). A Customizable Digital Human Model for Assembly System Design. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 490. Springer.
- (12) Fosch Villaronga, E. & Albo Canals, J. (2018). Implications of the Google's US 8,996,429 B1 Patent in Cloud Robotics-Based Therapeutic Researches. *Service Robots, Intech*. doi: 10.5772/intechopen.70279
- (13) Ghosh, D., Olewnik, A., Lewis K., Kim, J., & Lakshmanan, A. (2017). "Cyber-Empathic Design: A Data-Driven Framework for Product Design". *Journal of Mechanical Design*. 139 (9), 1-12.
- (14) Gomez-Monroy Carlos Gilberto, Vicente Borja, Alejandro Ramirez-Reivich, "Recomendaciones para la experimentación en el área de interacción entre humano y robot utilizando el concepto de Experiencia del Usuario", 2019, Congreso Internacional SOMIM.
- (15) Gomez-Monroy Carlos Gilberto, Vicente Borja, María del Pilar Corona-Lira, Alejandro C. Ramírez-Reivich, "Diseño y fabricación de banco de pruebas robotizado para la automatización de experimentos en el área de la interacción entre humano y robot.", 2020, Congreso Internacional SOMIM.

- (16) Haddadin, S., Albu-Schäfer, A., & Hirzinger, G. (2007). Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing. In *Robotics: Science and Systems III*, MIT Press, 2008, pp. 217-224.
- (17) Healey, J., & Picard, R. (1998). Digital processing of affective signals. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98 vol.6*, pp. 3749-3752. doi: 10.1109/ICASSP.1998.679699.
- (18) Hernandez, J., Lovejoy, J., McDuff, D., Suh, J., O'Brien, T., Sethumadhavan, A., Greene, G., Picard, R., & Czerwinski, M. (2021) Guidelines for Assessing and Minimizing Risks of Emotion Recognition Applications. In: *2021 9th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, pp. 1-8, doi: 10.1109/ACII52823.2021.9597452.
- (19) Höök, K., Benyon, D., & Munro, A. J. (Eds.). (2002). *Designing information spaces: the social navigation approach*. Springer Science & Business Media.
- (20) International Organization for Standardization. (2019). *Interaction Principles-Ergonomics of human-system interaction (ISO Standard No. 9241-210)*. Part 110.
- (21) Jaques, N., Taylor, S., Sano, A., & Picard, R. (2015). Multi-task, multi-kernel learning for estimating individual wellbeing. In *Proc. NIPS Workshop on Multimodal Machine Learning 898*, p. 3.
- (22) K. Dautenhahn and I. Werry, "A quantitative technique for analysing robot-human interactions," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, 2002, pp. 1132-1138 vol.2, doi: 10.1109/IRDS.2002.1043883
- (23) Kanade, T. (1973). *Picture Processing System by Computer Complex and Recognition of Human Faces*. Doctoral Dissertation, Kyoto University. Japan.
- (24) Karabegović, I., Doleček, V. (2017). *The Role of Service Robots and Robotic Systems in the Treatment of Patients in Medical Institutions*. *Advanced Technologies, Systems, and Applications 3*. Springer, Cham.
- (25) Konstan, J., & Riedl, J. (2012). Recommender systems: From algorithms to user experience. *User Modeling and User-Adapted Interaction (UMUAI) vol. 22*. pp. 101-123.
- (26) Koumpouros. Yiannis , Effie Papageorgiou, Alexandra Karavasili, Foteini Koureta. (2016). "PYTHEIA: A Scale for Assessing Rehabilitation and Assistive Robotics". *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Materials Engineering Vol:10, No:11*.
- (27) Koutentakis D, Pillozzi A, Huang X. Designing Socially Assistive Robots for Alzheimer's Disease and Related Dementia Patients and Their Caregivers: Where We are and Where We are Headed. *Healthcare (Basel)*. 2020 Mar 26;8(2):73. doi: 10.3390/healthcare8020073. PMID: 32225117; PMCID: PMC7349047.
- (28) Krol, K., Spring, J. M., Parkin, S., & Sasse, A. (2016). Towards robust experimental design for user studies in security and privacy. *LASER*.
- (29) Laugwitz, B., Held, T., & Schrepp, M. (2008). Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire. In: Holzinger, A. (eds) *HCI and Usability for Education and Work*. *USAB 2008*. Lecture Notes in Computer Science, vol 5298. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89350-9_6
- (30) Lee, K.M., & Nass, C. (2003). Designing social presence of social actors in human computer interaction. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '03)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 289–296. <https://doi.org/10.1145/642611.642662>
- (31) Lin, H., Liu, C., Fan, Y., & Tomizuka, M. (2017). "Real-time collision avoidance algorithm on industrial manipulators," *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Maui, HI, USA, 2017, pp. 1294-1299, doi: 10.1109/CCTA.2017.8062637.
- (32) Mackay, W.E. (1995). Ethics, lies and videotape... In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 138-145

- (33) Marche, C., Nitti, M., & Pilloni, V. (2017). Energy efficiency in smart building: A comfort aware approach based on Social Internet of Things. *Global Internet of Things Summit (GIOTS)*, Geneva, Switzerland, 2017, pp. 1-6, doi:10.1109/GIOTS.2017.8016267.
- (34) Mortier, R., Haddadi, H., Henderson, T., McAuley, D., & Crowcroft, J. (2015). Human-Data Interaction: The human face of the Data-Driven society, *SSRN Elec. Jour.*
- (35) Nakagaki, Ken, Daniel Fitzgerald, Zhiyao (John) Ma, Luke Vink, Daniel Levine, and Hiroshi Ishii. 2019. InFORCE: Bi-directional 'Force' Shape Display for Haptic Interaction. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 615–623. <https://doi.org/10.1145/3294109.3295621>
- (36) Nelles, J., Kwee-Meier, S. T., & Mertens, A. (2019). Evaluation Metrics Regarding Human Well-Being and System Performance in Human-Robot Interaction – A Literature Review. In: Bagnara, S., Tartaglia, R., Albolino, S., Alexander, T., Fujita, Y. (eds) *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 825. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96068-5_14
- (37) Paetzl, M., Perugia, G., & Castellano, G. (2020). The Persistence of First Impressions: The Effect of Repeated Interactions on the Perception of a Social Robot. *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 73–82. <https://doi.org/10.1145/3319502.3374786>
- (38) Phoebe Liu, Dylan F. Glas, Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro. (2018). "Data-driven HRI: Learning Social Behaviors by Example From Human–Human Interaction", *IEEE Transactions on Robotics*.
- (39) Picard, R.W. (1995). *Affective Computing*. Technical Report 321, M.I.T. Media Laboratory Perceptual Computing Section, Cambridge, MA, USA.
- (40) Prati, Elisa & Borsci, Simone & Peruzzini, Margherita & Pellicciari, Marcello. (2022). A Systematic Literature Review of User Experience Evaluation Scales for Human-Robot Collaboration. *Transdisciplinarity and the Future of Engineering*.
- (41) Prince C.G., & Gogate L.J. (2007). Epigenetic robotics: behavioral treatments and potential new models for developmental pediatrics. *Pediatric Research*. 2007 Apr;61(4): 383-5. doi: 10.1203/pdr.0b013e3180459fdd. PMID: 17515858.
- (42) Roto, V. (2006). User experience building blocks. In *The 2nd cost294-mause international open workshop (Vol. 14, No. 1)*.
- (43) Sawik, Bartosz, Sławomir Tobis, Ewa Baum, Aleksandra Suwalska, Sylwia Kropińska, Katarzyna Stachnik, Elena Pérez-Bernabeu, Marta Cildoz, Alba Agustin, and Katarzyna Wieczorowska-Tobis. 2023. "Robots for Elderly Care: Review, Multi-Criteria Optimization Model and Qualitative Case Study" *Healthcare* 11, no. 9: 1286. <https://doi.org/10.3390/healthcare11091286>
- (44) Sliwinski, J., Katsikitis, M., & Jones, C.M. (2015). Mindful Gaming: How Digital Games Can Improve Mindfulness. In: Abascal, J., Barbosa, S., Meter, M., Gross, T., Palanque, P., Winckler, M. (eds) *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*. *Lecture Notes in Computer Science* 9298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22698-9_12
- (45) Solove, D. J. (2005). A Taxonomy of Privacy. *University of Pennsylvania Law Review*, 154(3), 477–564. <https://doi.org/10.2307/40041279>
- (46) Song, S., Jaiswal, S., Sanchez, E., Tzimiropoulos, G., Shen, L.; & Valstar, M. (2021). Self-supervised Learning of Person-specific Facial Dynamics for Automatic Personality Recognition. In *IEEE Transactions on Affective Computing*. doi: 10.1109/TAFFC.2021.3064601.
- (47) Taylor, S. A. (2020). *Forecasting mental distress using healthcare claims data [Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology]*.
- (48) Tonkin M., Vitale, J., Ojha, S., Clark, J., Pfeiffer S., Judge, W., Wang, X., & Williams M. A. (2017). Embodiment, Privacy and Social Robots: May I Remember You?. In: *Social Robotics. ICSR 2017*.

- Lecture Notes in Computer Science (), vol 10652. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70022-9_50
- (49) Tonkin, M., Vitale, J., Herse, S., Williams, M. A., Judge, W., & Wang, X. (2018). Design Methodology for the UX of HRI: A Field Study of a Commercial Social Robot at an Airport. 13th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), Chicago, IL, USA, pp. 407-415.
- (50) Vitale, J., Tonkin, M., Herse, S., Ojha, S., Clark, J., Williams, M. A., Wang, X., Judge, W. (2018). Be More Transparent and Users Will Like You: A Robot Privacy and User Experience Design Experiment. In: Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 379–387. <https://doi.org/10.1145/3171221.3171269>
- (51) Weiss, A., Bernhaupt, R., Lankes, M., & Tscheligi, M. (2009). The USUS Evaluation Framework for Human-Robot Interaction. *New Frontiers in HRI*. pp. 89-110.
- (52) Wen Shen, Alanoud Al Khemeiri, Abdulla Almehzi, Wael Al Enezi, Iyad Rahwan, and Jacob W. Crandall. 2017. Regulating Highly Automated Robot Ecologies: Insights from Three User Studies. In Proceedings of the 5th International Conference on Human Agent Interaction (HAI '17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 111–120. <https://doi.org/10.1145/3125739.3125758>
- (53) Wood, A., O'Brien, D., Altman, M., Karr, A., Gasser, U., Bar-Sinai, M., Nissim, K., Ullman, J., Vadhan, S., & Wojcik, M. (2014). Integrating Approaches to Privacy Across the Research Lifecycle: Long-Term Longitudinal Studies. Berkman Center Research Publication No. 2014-12, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2469848> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2469848>
- (54) Xu, Q., Zhou, F., & Jiao, J. (2011). Affective-Cognitive Modeling for User Experience With Modular Colored Fuzzy Petri Nets. *ASME. J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 11 (1): 011004. <https://doi.org/10.1115/1.3563047>

Apéndice A: Traducción cuestionario UX “Diseño Ciber-Empático”.

Traducción del cuestionario para evaluación de la Experiencia de Usuario propuesto por Ghosh et al. in 2016.

Construcción Latente	Reactivos en el Cuestionario	Escala de Evaluación	Número de reactivo
Antes de la Sesión Experimental			
Estética	El diseño del zapato parece placentero	1 (Completamente en desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	1
	Me gusta el diseño del zapato	1 (Completamente en desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	2
Atractivo del Diseño	En mi opinión el zapato es: No Atractivo - Atractivo	1 (Atractivo) - 7 (No Atractivo)	3
	Desagradable - Agradable	1 (Agradable) - 7 (Desagradable)	4
	Indeseable - Deseable	1 (Indeseable) - 7 (Deseable)	5
Originalidad	En mi opinión el zapato es: Ordinario - Único	1 (Ordinario) - 7 (Único)	6
	Común - Original	1 (Común) - 7 (Original)	7
	Rutinario - Novedoso	1 (Rutinario) - 7 (Novedoso)	8
Utilidad	En mi opinión el zapato es: Inútil - Útil	1 (inútil) - 7 (Útil)	9
	No Efectivo - Efectivo	1 (No Efectivo) - 7 (Efectivo)	10
	Valioso - Insignificante	1 (Valioso)	11
Capacidad	En mi opinión el zapato ofrece:	1(Pocas Ventajas) - 7 (Muchas Ventajas)	12
	En mi opinión el zapato tendrá un desempeño:	1 (Malo) - 7 (Bueno)	13
	En mi opinión el zapato añade:	1 (Poco valor) - 7 (Mucho Valor)	14
Efectividad	Yo espero que el zapato funcione bien	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	15
	Yo espero que el zapato sea efectivo en mi trabajo:	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	16
	El zapato se desempeñará mejor que la mayoría de los zapatos	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	17
	El zapato hará un buen trabajo	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	18
Usabilidad	El zapato aparenta ser fácil de usar	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	19
	El uso del zapato se ve raro	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	20
	Siento confianza de utilizar el zapato	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	21
	Me gusta escuchar nuevas ideas	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	22
	Odio cualquier cambio en mi rutina diaria	1(Completamente en Desacuerdo) –	23

Construcción Latente	Reactivos en el Cuestionario	Escala de Evaluación	Número de reactivo
Iniciativa Innovadora del Consumidor		7 (Completamente de Acuerdo)	
	Constantemente encuentro nuevas maneras de mejorar la manera en la que vivo	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	24
	Disfruto la novedad de poseer productos nuevos	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	25
	Comprar productos nuevos toma mucho tiempo y esfuerzo	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	26
	Usualmente otras personas me piden consejo para comprar productos nuevos	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	27
	Los productos nuevos tienen un precio inaceptablemente alto	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	28
	Estoy atento para comprar productos nuevos en cuanto salgan	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	29
	Aceptación Tecnológica	Tengo confianza de que puedo aprender nuevas habilidades relacionadas a la tecnología	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)
Me cuesta trabajo entender la mayoría de los temas relacionados a la tecnología		1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	31
Soy aprensivo(a) hacia el uso de nuevas tecnologías		1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	32
Cuando utilizo un aparato tecnológico siento que lo puedo romper		1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	33
Confío en mis habilidades para interpretar las respuestas que dan los aparatos tecnológicos		1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	34
La terminología técnica me es confusa		1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	35
Yo he evitado la tecnología porque me es poco familiar		1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	36
Soy capaz de estar al tanto de los avances tecnológicos		1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	37
Conciencia Hacia la Salud	Dudo si usar tecnología o no debido al miedo a hacer errores que no pueda corregir	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	38
	Reflexiono sobre mi salud bastante	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	39
	Estoy muy consiente de mi salud	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	40
	Generalmente presto atención a mis sentimientos internos respecto a mi salud	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	41
	Constantemente examino mi salud	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	42
	Estoy alerta a cambios en mi salud	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	43

Construcción Latente	Reactivos en el Cuestionario	Escala de Evaluación	Número de reactivo
Conciencia Hacia la Salud	Usualmente estoy al pendiente de mi salud	7 (Completamente de Acuerdo) 1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	44
	Estoy consciente de mi salud conforme a lo largo del día	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	45
	Noto como me siento físicamente a lo largo del día	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	46
	Pongo mucho empeño en mi salud	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	47
Durante la Sesión Experimental			
Humor	¿Cómo te sientes en este momento?		
	Feliz	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	48
	Alegre	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	49
	Jovial	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	50
	Triste	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	51
	Deprimido(a)	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	52
	Decaído(a)	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	53
Confort Percibido	El zapato es incómodo	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	54
	El zapato no se ajusta a mi pie	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	55
	El zapato es muy duro	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	56
	El zapato se siente bien balanceado	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	57
	El zapato es más cómodo que la mayoría de los zapatos	1(Completamente en Desacuerdo) - 7 (Completamente de Acuerdo)	58
Estado del Usuario (Confort percibido por ubicación)	¿Cuánta presión sentiste en la parte frontal de la planta del pie?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	59
	¿Cuánta presión sentiste en la parte media de la planta del pie?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	60
	¿Cuánta presión sentiste en la parte trasera de la planta del pie (talón)?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	61
	¿Qué tan calientes se sentían tus pies al caminar?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	62
Fatiga	Tuve picazón en los pies.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	63
	Sentí los pies cansados.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	64
	Sentí los pies pesados.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	65
	Sentí los pies tensos.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	66
	Sentí los pies fatigados.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	67
Evaluación del Producto	En general, mi opinión sobre el zapato con sensores integrados es: Desfavorable - Favorable	1(Desfavorable) - 7(Favorable)	68

Construcción Latente	Reactivos en el Cuestionario	Escala de Evaluación	Número de reactivo
	Malo - Bueno	1 (Malo) - 7 (Bueno)	69
	Negativo - Positivo	1 (Negativo) - 7 (Positivo)	70
Sección posterior a la prueba experimental			
	¿Cómo te sientes en este momento?		
Humor	Feliz	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	71
	Alegre	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	72
	Jovial	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	73
	Triste	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	74
	Deprimido(a)	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	75
	decaído	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	76
Evaluación de Producto	En general, mi opinión sobre el zapato con sensores integrados es:		
	No favorable - Favorable	1 (No Favorable) - 7 (Favorable)	77
	Malo - Bueno	1 (Malo) - 7 (Bueno)	78
	Negativo - Positivo	1 (Negativo) - 7 (Positivo)	79
Intención de Uso	Si los zapatos con sensores integrados ya estuvieran a la venta, que usted los siga usando es:		
	improbable - Probable	1 (Improbable) - 7 (Probable)	80
	Inverosímil - Verosímil	1 (Inverosímil) - 7 (Verosímil)	81
	Imposible - Posible	1 (Imposible) - 7 (Posible)	82
Disposición a Pagar	¿Cuál sería el precio máximo que pagarías por los zapatos con sensores integrados?	Escribe la cifra:	83
Confort Percibido	El zapato es incómodo	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	84
	El zapato no se ajusta a mi pie	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	85
	El zapato es muy duro	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	86
	El zapato se siente bien balanceado	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	87
	El zapato es más cómodo que la mayoría de los zapatos	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	88
Estado del Usuario (Confort percibido por ubicación)	¿Cuánta presión sentiste en la parte frontal de la planta del pie?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	89
	¿Cuánta presión sentiste en la parte media de la planta del pie?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	90
	¿Cuánta presión sentiste en la parte trasera de la planta del pie (talón)?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	91
	¿Qué tan calientes se sentían tus pies al caminar?	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	92
Fatiga	Tuve picazón en los pies.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	93

Construcción Latente	Reactivos en el Cuestionario	Escala de Evaluación	Número de reactivo
Fatiga	Sentí los pies cansados.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	94
	Sentí los pies pesados.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	95
	Sentí los pies tensos.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	96
	Sentí los pies fatigados.	1(No en lo absoluto) - 7 (Sí, completamente)	97
Atractivo del Diseño	En mi opinión el zapato es: No Atractivo - Atractivo	1 (Atractivo) - 7 (No Atractivo)	98
	Desagradable - Agradable	1 (Agradable) - 7 (Desagradable)	99
	Indeseable - Deseable	1 (Indeseable) - 7 (Deseable)	100
Originalidad	En mi opinión el zapato es: Ordinario - Único	1 (Ordinario) - 7 (Único)	101
	Común - Original	1 (Común) - 7 (Original)	102
	Rutinario - Novedoso	1 (Rutinario) - 7 (Novedoso)	103
Utilidad	En mi opinión el zapato es: Inútil - Útil	1 (inútil) - 7 (Útil)	104
	No Efectivo - Efectivo	1 (No Efectivo) - 7 (Efectivo)	105
	Valioso - Insignificante	1 (Valioso)	106
Percepción del Diseño	El diseño del zapato con sensores integrados parece placentero	1 (Completamente en desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	107
	Me gusta el diseño del zapato con sensores integrados	1 (Completamente en desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	108
Capacidad	En mi opinión el zapato ofrece:	1(Pocas Ventajas) - 7 (Muchas Ventajas)	109
	En mi opinión el zapato tendrá un desempeño:	1 (Malo) - 7 (Bueno)	110
	En mi opinión el zapato añade:	1 (Poco valor) - 7 (Mucho Valor)	111
Efectividad	Yo espero que el zapato funcione bien	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	112
	Yo espero que el zapato sea efectivo en mi trabajo:	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	113
	El zapato se desempeñará mejor que la mayoría de los zapatos	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	114
	El zapato hará un buen trabajo	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	115
Usabilidad	El zapato aparenta ser fácil de usar	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	116
	El uso del zapato se ve raro	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	117
	Siento confianza de utilizar el zapato	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	118
Conocimiento Previo	En general, ¿qué tanto sabes de zapatos?	1 (Nada en lo absoluto) - 7 (Bastante)	119
	Yo sé mucho sobre zapatos	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	120

Construcción Latente	Reactivos en el Cuestionario	Escala de Evaluación	Número de reactivo
Conocimiento Previo	¿Cómo calificas tus conocimientos sobre zapatos en comparación con las demás personas?	1 (Menor) - 7 (Mayor)	121
Conocimiento Sobre tecnología	En general, ¿qué tan familiarizada(o) estás con ropa tecnológica que incluye sensores y actuadores?	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	122
	Sé mucho sobre ropa tecnológica y aditamentos digitales	1(Completamente en Desacuerdo) – 7 (Completamente de Acuerdo)	123
	¿Cómo calificarías tus conocimientos sobre ropa tecnológica en comparación con las demás personas?	1 (Menor) - 7 (Mayor)	124
Implicación personal	Para mí los zapatos son:		
	No importantes - Importantes	1 (No importantes) - 7 (Importantes)	125
	Irrelevantes - Relevantes	1 (Irrelevantes) - 7 (Relevantes)	126
	Insignificantes - Significativos	1(Insignificantes) - 7(Significativos)	127
Hedónico / Utilitario	Para mí los zapatos son algo que:		
	No son funcionales - Son funcionales	1(No son funcionales) - 7 (Son funcionales)	128
	Innecesarios - Necesarios	1(Innecesarios) - 7 (Necesarios)	129
	Imprácticos - Prácticos	1(Imprácticos) - 7 (Prácticos)	130
	No son entretenidos - Son entretenidos	1 (No son entretenidos) - 7 (Son entretenidos)	131
	Aburridos - Emocionantes	1 (Aburridos) - 7 (Emocionantes)	132
	No los disfruto - Los disfruto	1 (No los disfruto) - 7 (Los disfruto)	133

Apéndice B: Materiales y Herramientas

En esta sección enlisto los materiales y herramientas utilizados en la elaboración de la Lámpara-robot. Esta lista no es exhaustiva, sino más bien contiene los elementos esenciales del proyecto. Muchos otros elementos y procesos fueron necesarios para la culminación de este proyecto, pero por cuestiones de claridad y espacio me acoto a los siguientes elementos.

Herramientas:

1. 1. Multímetros de mano: Klein Tools MM600 y CL800.
2. 2. Osciloscopio: Siglent SDS 1202 X-E.
3. 3. Fuente de poder: Siglent SPD3303 X-E.
4. 4. Generador de funciones: Siglent SDG2042.
5. 5. Multímetro de banco: Siglent SDM 3045X.
6. 6. Estación de soldadura electrónica: Weller 70-110 Watts.
7. 7. Inversora para soldadura TIG: Lincoln Electric Square Wave.
8. 8. Amoladora manual de 4 ½.
9. 9. Discos de trabajo de 4 ½: Corte, esmeril, lija, cepillo, etc.
10. 10. Taladros de mano y banco.
11. 11. Cortadora de plasma (Mandado con proveedor externo).
12. 12. Báscula digital de 0.1 gr de precisión.
13. 13. Luxómetro.
14. 14. Herramienta de mano: Pinzas, desarmadores, etc.

Materiales:

15. 1. Motor a Pasos con servocodificador para evitar perder pasos (Nema 23, 2 N.m).
16. 2. Driver para motor a pasos Nema 23.
17. 3. Motor Servo: 20kg torque.
18. 4. Motor Servo: Futaba 120.
19. 5. Sensores de Fuerza: HoneyWell FSG15.
20. 6. Amplificadores Instrumentales: AD705, AD620, INA122P.
21. 7. Convertidor Analógico Digital: Gravity Module 4 channels 16-bits.
22. 8. Sensores de Luz:
23. 9. Multiplexor para sensores de Luz:
24. 10. Multiplexor para servos: PCA 9685.
25. 11. Módulo de reloj de tiempo real: DS3231.
26. 12. Módulo de memoria SD.
27. 13. Microprocesadores: Arduino Uno, Arduino Mega, y Arduino Primo.
28. 14. Fuente de energía: Poder (36 v , 8 amp) y (6 v, 2 amp), Lógico (5 v, 0.5 amp).
29. 15. Tornillo sin fin de precisión con bolas recirculantes: 50 cm.
30. 16. Placa (5 mm) y lámina de acero (calibre 16).

Apéndice C: Fabricación de la Lámpara-robot

La fabricación de la Lámpara-robot se divide entre *hardware* y *software*, ambos trabajando en conjunto. En cuanto al software, programé los tres microprocesadores en el IDE de Arduino. La programación paralela entre Arduinos es de tipo asíncrona y está basada en el uso de casos, interrupciones por hardware (utilicé cables entre los pins de los Arduinos como “*flags*” asíncronos) y redundancia. Los módulos de tiempo real, memoria SD, multiplexor para servo y sensores y el convertidor analógico digital están conectadas por protocolos digitales estándar y de libre uso (i2c y SPI).

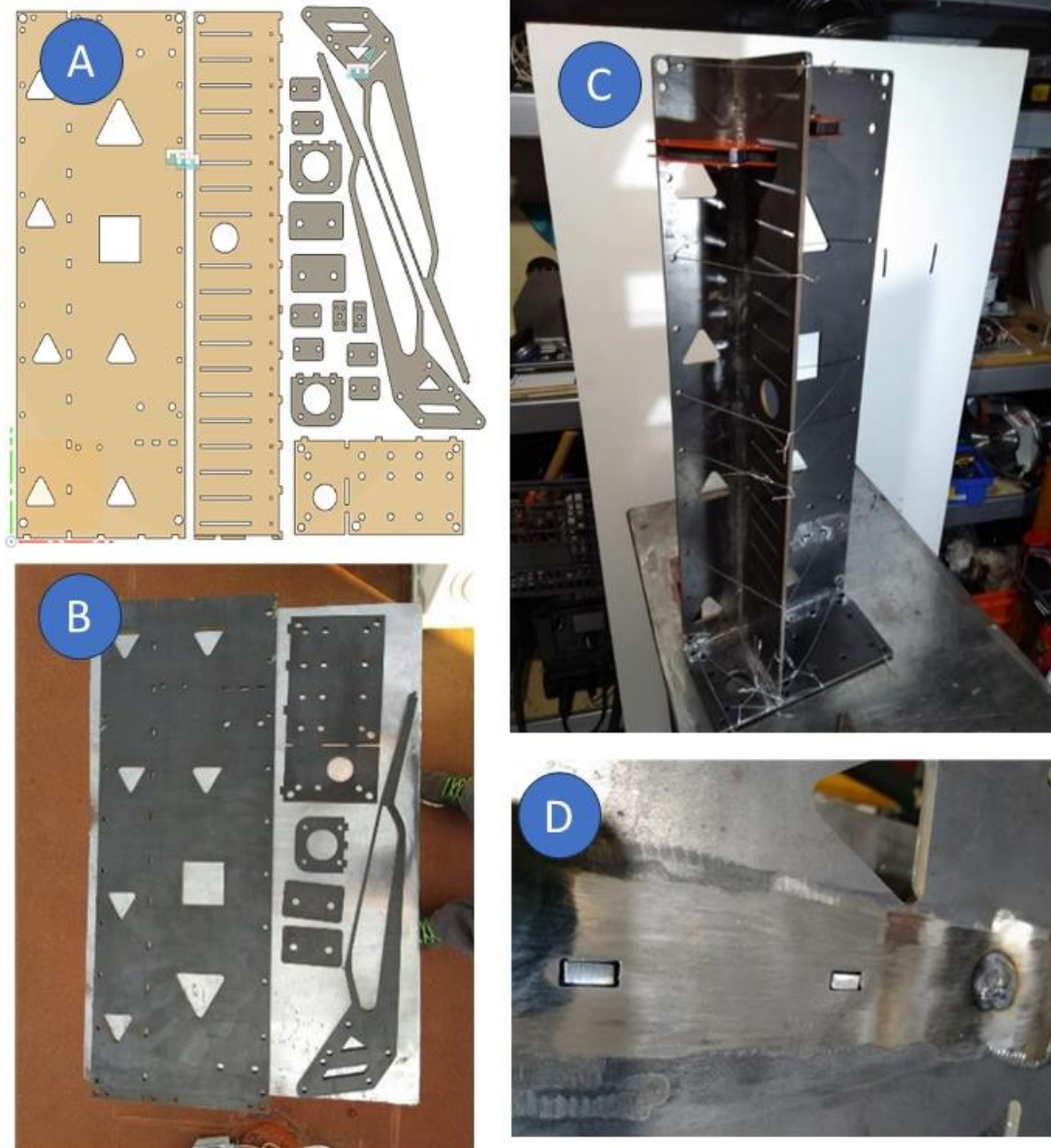


Figura C.1 Fabricación base de Lámpara-robot. (A) Modelo en computadora de Lámpara-robot, (B) Piezas cortadas de placa de metal de 5mm, (C) Preparación para soldadura TIG, (D) Detalle mostrando una pestaña soldada y otras aún no.

Lo referente al hardware lo considero integrado por dos áreas: (1) eléctrico/electrónico y (2) mecánico. En ambos casos seguí una filosofía minimalista, al considerar conveniente utilizar el menor número de piezas posibles y la menor cantidad de intervención física sobre las piezas. Esto para promover la repetibilidad del experimento incluyendo la fabricación de la Lámpara-robot. Con esto en mente modelé en Fusion 360 el cuerpo de la lámpara (planeando que sería fabricado en placa de acero de 5mm y lámina de acero calibre 16) como un rompecabezas que a través de piezas 2D se genera un volumen. Las piezas contaron con pestañas y muescas para embonar exactamente y garantizar perpendicularidad y paralelismo entre superficies. Éstas se cortaron en chorro de agua y soldé las pestañas dentro de las muescas con proceso TIG para reducir la deformación por calor. Ver Figura C.2.

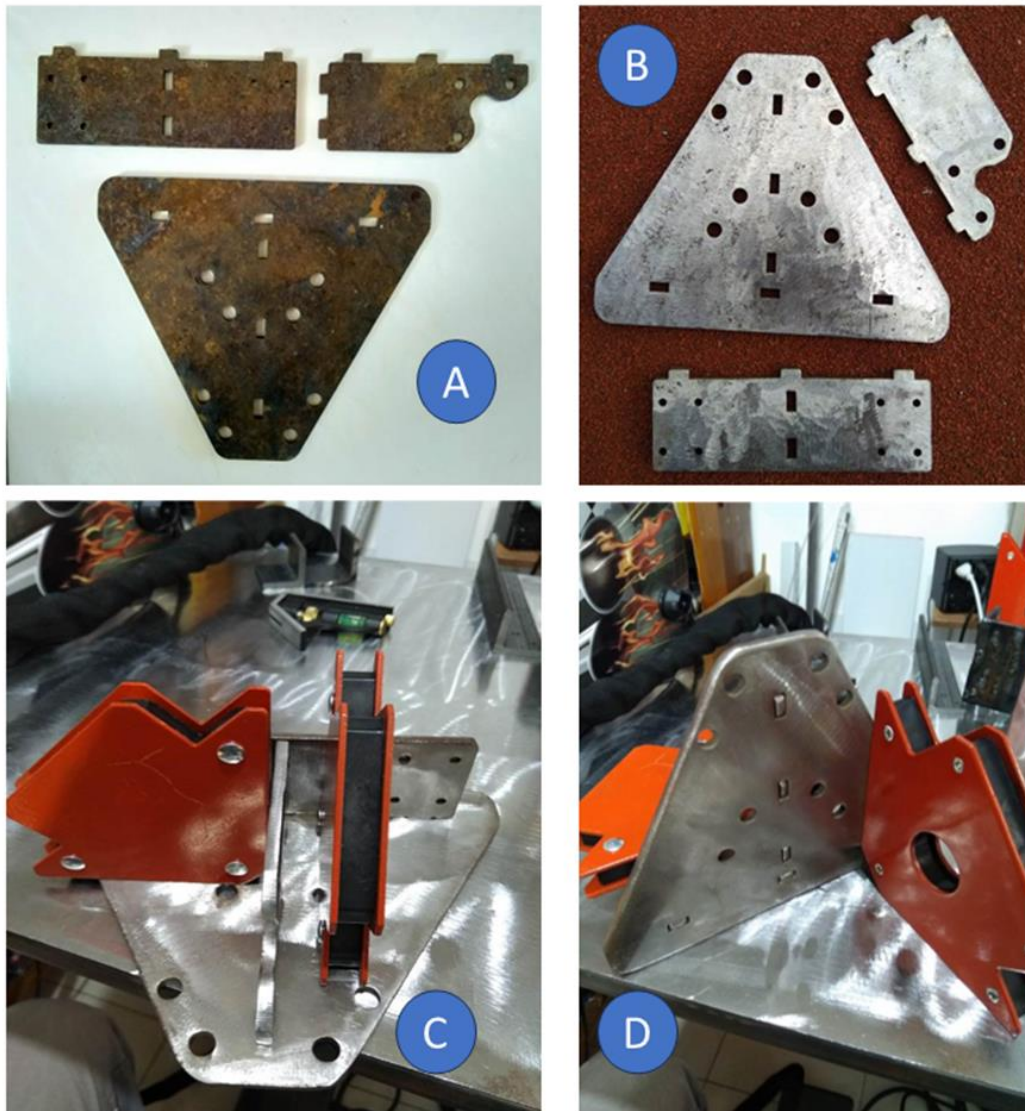


Figura C.2. Fabricación de la base del brazo de luminaria. (A) Piezas recién salidas del corte por chorro de agua, (B) Piezas preparadas para ensamble, (C) Se muestra la perpendicularidad de las piezas, (D) Se ve ensamble entre pestañas y muescas.

El cabezal de iluminación está hecho de lámina de acero, las piezas se cortaron con láser e igualmente lo diseñé para ensamblar cortes 2D en piezas 3D. El cabezal tiene monturas para: 4 sensores de luz, 2 servomotor, 3 luminarias LED de uso domiciliario y el atenuador mecánico de persianas. Soldé algunas piezas de lámina con TIG quedando permanente unidas, mientras que a otras partes les soldé tuercas y tornillos para que el cabezal fuera 100% desmontable y rearmable (con el fin de facilitar el mantenimiento y reajustes). Ver Figura C.3.

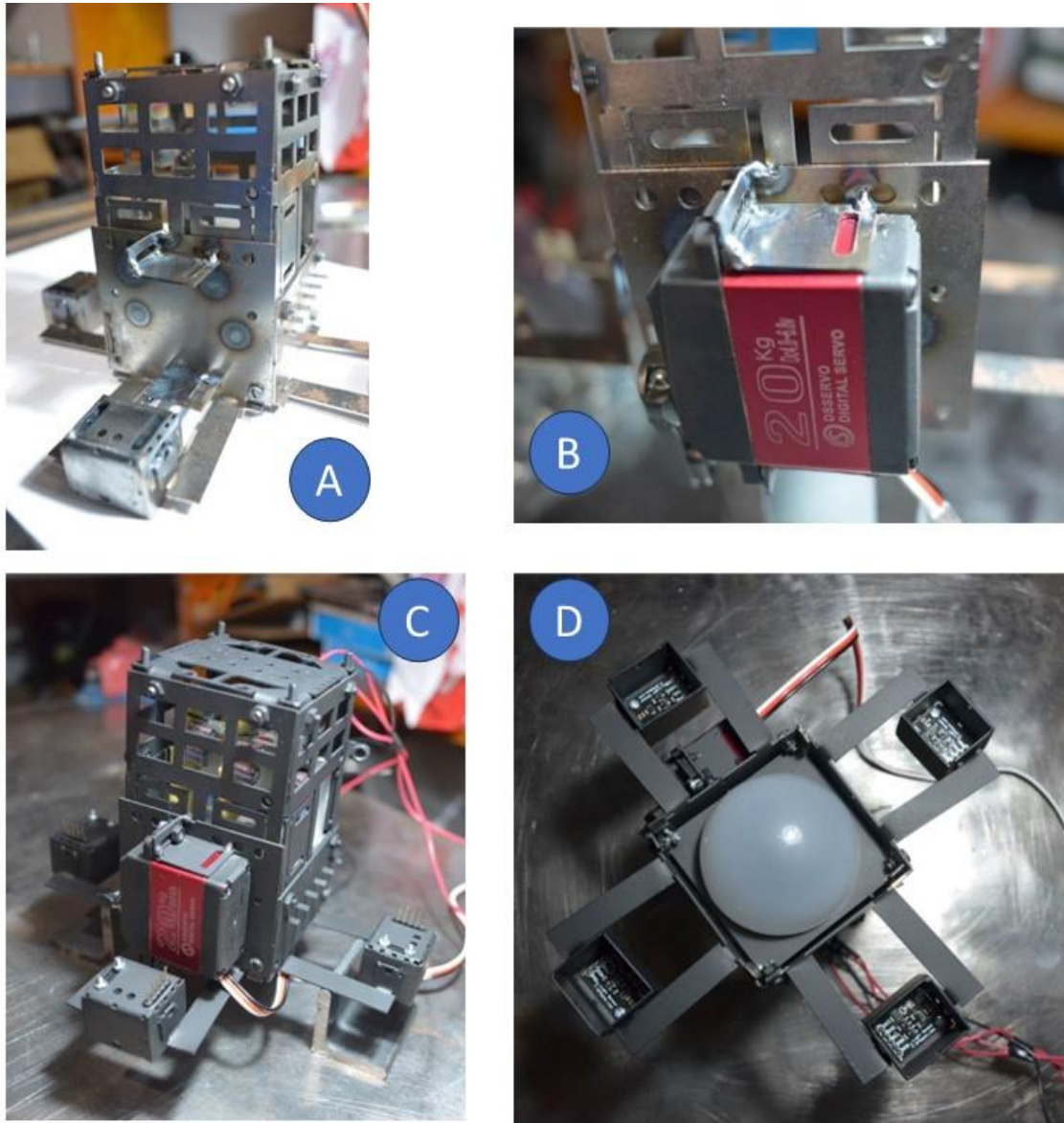


Figura C.3. Fabricación Cabezal de iluminación. (A) Cabezal de iluminación muestra marcas de calor localizado donde se realizó soldadura TIG, (B) Detalle del soporte para el motor servo para las persianas, (C) Vista general superior del Cabezal completamente ensamblado y poblado de electrónicos, (D) Vista general inferior del Cabezal, al centro el difusor de luz y a las orillas los sensores de luz.

El cabezal de iluminación lleva en su interior tres bombillas LED de uso domiciliario modificadas para integrarlas en el cabezal de iluminación. Estas bombillas LED (5 Watts, 110 volts, AC) tienen en su interior un módulo de LEDs y un transformador de voltaje, que pasa 110 volts (AC) a 70 volts (DC). Fabriqué el montaje para los módulos y sus correspondientes transformadores de aluminio para que trabaje a la vez como difusor de calor. Aunque las tres luminarias quedan dentro del Cabezal, cada una se puede prender y apagar independientemente. Ver Figura C.4.

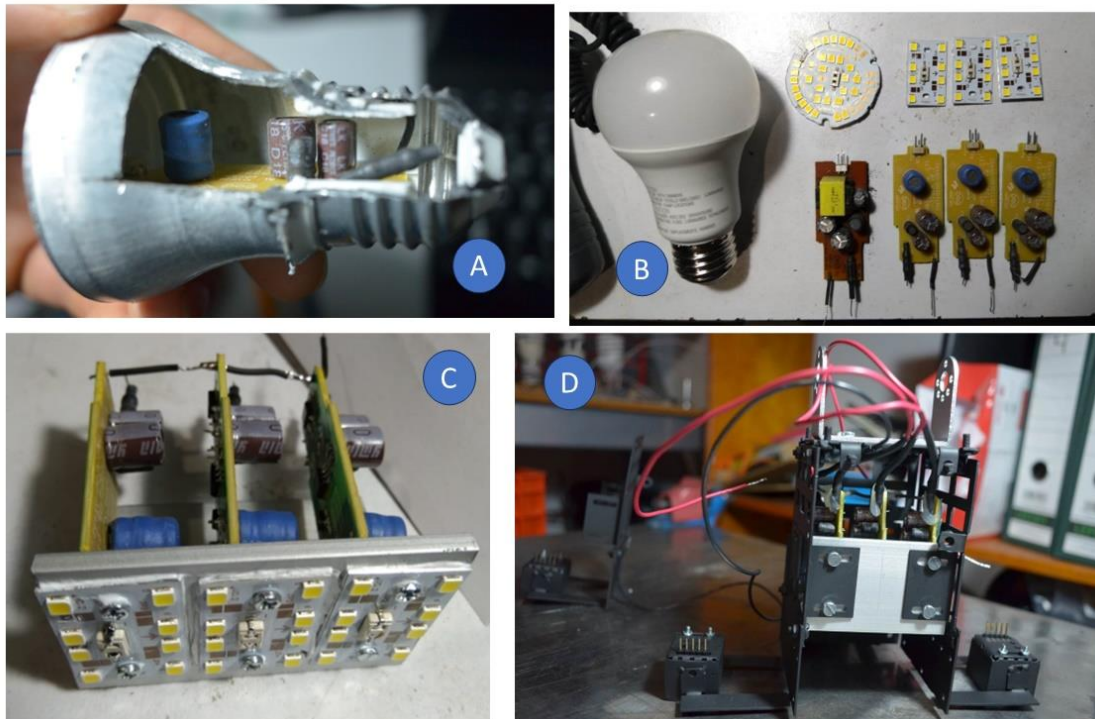


Figura C.4. Fabricación luminaria LED. (A) Interior de Bombilla LED de uso domiciliario, (B) comparación de tamaño entre bombilla de fábrica con tres juegos de sus componentes, (C) Tres módulos LED de 5 watts @110volts AC en soporte de aluminio conformando la Luminaria y (D) la Luminaria montada dentro del Cabezal de iluminación de la Lámpara-robot.

Realicé la fabricación de circuitos electrónicos con componentes de montaje *through-hole*. La interfaz de usuario está hecha de acrílico de 6mm, placa de acero calibre 16, y madera. Anexo más pruebas gráficas del proceso de diseño y fabricación en el Apéndice F, Apéndice G y Apéndice H.

Después de haber descrito la fabricación de la Lámpara-robot, paso a reportar el proceso de caracterización de los botones de fuerza, incluyendo el sistema de amplificación. De esta manera determiné la equivalencia entre volts (sensor de fuerza), valor digital (Arduino) y newtons (fuerza con la que usuarios presionan los botones).

Apéndice D: Caracterización de los sensores de fuerza

En esta sección únicamente abordo la caracterización de los sensores de fuerza y sus sistemas de amplificación instrumental. En Gómez et al., 2020 se reporta el rango de movimiento, repetibilidad de posición, estabilidad del flujo luminoso y capacidad de autoajuste de brillo por medio de las persianas metálicas (Ver Apéndice J).

La interfaz de usuario está compuesta por cuatro botones: 2 sensores de fuerza y 2 *push-button*. Los cuatro trabajan con señales analógicas, la diferencia es que los sensores de fuerza producen un rango continuo, mientras que los *push-button* son binarios (High, Low). Los primeros pasos para caracterizar los sensores de fuerza fue verificar la estabilidad de los voltajes, analizando cómo se comportan las señales de los sensores sin ser presionados. Verifiqué que la desviación a largo plazo (*drift*), acoplamiento parasitario, parcialidad, error, y ruido fueran despreciables (<0.5%). Ver Figura D.1.

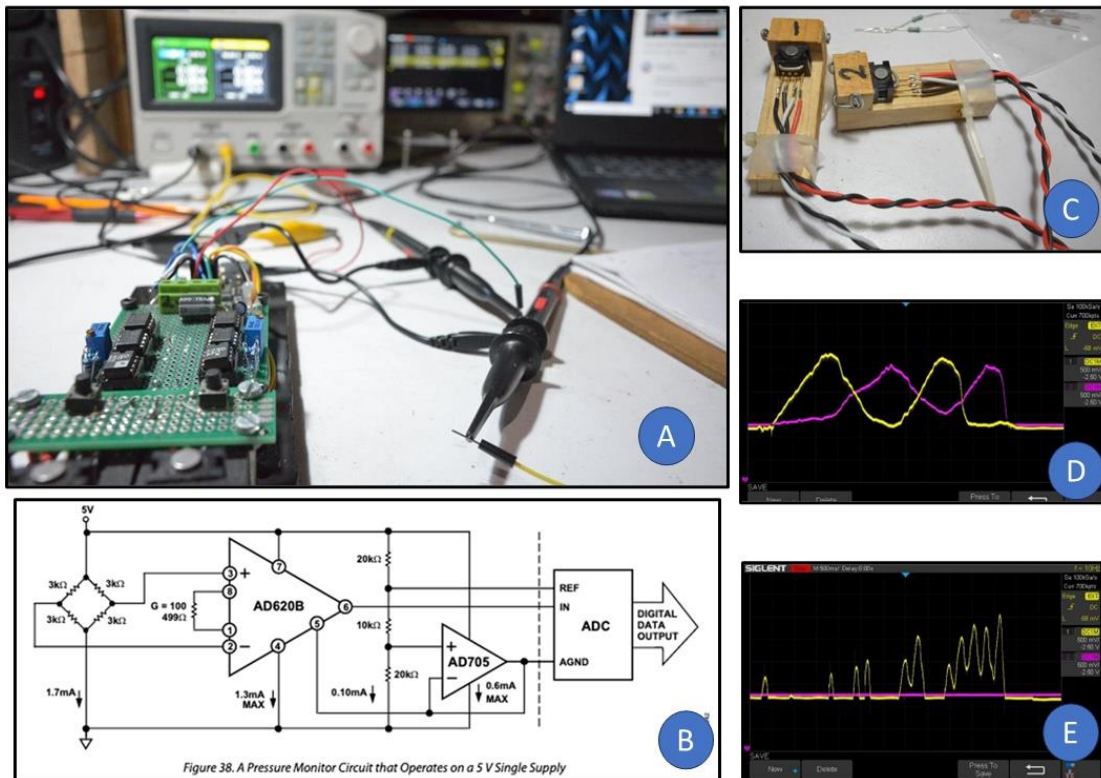


Figura D.1. La fotografía (A) muestra la caracterización de la interfaz a través de un osciloscopio y alimentando el circuito con una fuente de poder de laboratorio. En (B) muestro el diagrama eléctrico propuesto en la hoja de especificaciones del amplificador instrumental AD620B utilizado en la primera etapa de amplificación de los sensores de fuerza. En (C) los sensores de fuerza piezoeléctricos Honeywell en su soporte de madera hecho a la medida. En (D) se ejemplifica que los dos sensores funcionan al mismo tiempo, mientras que en la gráfica (E) se aprecia la independencia entre los canales 1 y 2 (es decir, no hay acoplamiento parasitario).

El siguiente paso fue colocar la interfaz de usuario sobre una báscula digital y utilizar pesos de referencia sobre los sensores de fuerza. De esta manera creé una tabla de correspondencia entre la

lectura de valor digital en Arduino y la fuerza real ejercida sobre los botones. En la Tabla D.1 muestro al centro (en verde) las mediciones base (pesos de referencia) y a los lados (en amarillo) el promedio de las tres veces que se tomó la medición digital por cada lado. A su vez, muestro la resolución digital por gramo fuerza (cuántos conteos digitales por gramo fuerza).

Botón Izquierdo [digital counts]				Resolucion digital [counts/gr]			Botón Derecho [digital counts]			
Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio Izquierdo	Izq.	Medición base (gr)	Der.	Promedio Derecho	Medición 1	Medición 2	Medición 3
190	190	200	193	3.9	50	2.9	147	140	150	150
400	370	370	380	3.8	100	3.0	300	310	280	310
540	560	530	543	3.6	150	3.0	450	450	450	450
710	700	710	707	3.5	200	3.2	643	620	670	640
850	870	890	870	3.5	250	3.3	820	810	820	830
1,700	1,700	1,700	1,700	3.4	500	3.2	1,600	1,600	1,600	1,600
2,400	2,500	2,500	2,467	3.3	750	3.3	2,500	2,500	2,500	2,500
3,400	3,400	3,400	3,400	3.4	1,000	3.2	3,200	3,200	3,200	3,200
3,700	3,800	3,750	3,750	3.4	1,100	3.2	3,550	3,500	3,600	3,550

Tabla D.1. Caracterización experimental de los dos sensores de fuerza (FSG15).

Grafiqué los valores promedio de cada sensor de fuerza. En la Figura D.2 se aprecia que ambos sensores tienen un comportamiento sigmoide (lo ideal sería lineal). Para tener una relación analítica, utilicé la regresión lineal. Se obtuvo $y=0.03x-2$, donde, “x” es el valor de la fuerza en Newtons mientras que “y” corresponde al valor recibido en el Arduino y almacenado en la tarjeta de memoria SD. Dichos valores provienen de los sensores analógicos de fuerza (Honeywell FSG15), pasando por tres amplificadores instrumentales (AD705, AD620, INA122P) y un convertidor analógico digital (16-bits 4 canales ADC) antes de llegar al Arduino por medio de conexión i2c.

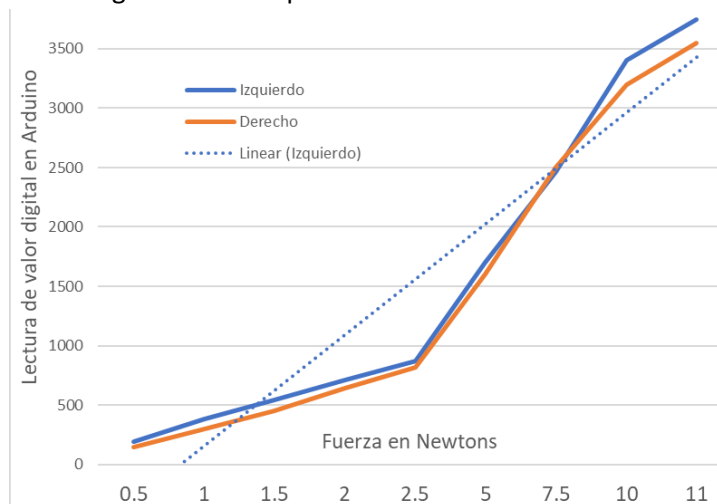


Figura D.2.Gráfica caracterización sensores de fuerza, muestra resultados de pruebas experimentales relacionando Newtons (Fuerza) con el valor digital en Arduino.

La Lámpara-robot guarda muchos otros valores aparte de los provenientes de los sensores de fuerza. A continuación, detallo las variables que enmarcaron mi proceso *data-driven*.

Apéndice E: Cuadernillo para participantes

Descripción de experimento

Explicación general del experimento

El experimento consiste en entrar a un cuarto con iluminación controlada. En dicho cuarto usted encontrará una lámpara robotizada, la cual se controla por medio de un panel con botones (llamado "interfaz de usuario").

El experimento se divide en 5 pruebas, en cada prueba el robot correrá un programa diferente, por lo que puede que la lámpara robotizada se comporte diferente en cada una de las pruebas.

Una vez ajustada la lámpara acorde a sus preferencias, tendrá que leer un fragmento de texto para posteriormente contestar 2 preguntas de comprensión de lectura y una tercera pregunta donde usted evaluará su experiencia con el robot considerando únicamente la prueba recién concluida. **La evaluación de su experiencia se relacionará con la evaluación que hace el robot de usted.**

Para evaluar su experiencia se le hará una sola pregunta por prueba. Se le pide que no base la evaluación de su experiencia en sus conocimientos técnicos sobre tecnología y robótica, sino que la debe basar en qué sintió usted durante cada prueba, por ejemplo: emoción, sorpresa, alegría, frustración, enojo, miedo, tranquilidad, etc. En otras palabras, valore en una escala del 1 al 7 si interactuar con la lámpara le provocó emociones más positivas o negativas, donde 1 es lo más negativo y 7 es lo más positivo.

En este cuadernillo encontrará los textos y preguntas de comprensión de lectura, así como las instrucciones detalladas que le guiarán a través de las 5 pruebas. Es de vital importancia para el experimento que usted siga las instrucciones conforme se describen los pasos y que complete las lecturas y preguntas de acuerdo con las instrucciones, sin adelantar (ni hojear brevemente) las páginas siguientes de este cuadernillo. En este cuadernillo se le indicará cuándo cambiar de página.

Si usted desea participar en el experimento, por favor pase a la siguiente página "Formulario de Consentimiento Informado".

El siguiente paso es leer y llenar el "Formulario de Consentimiento Informado".

Datos del participante:

1. Edad:
2. Género:
3. Estatura:
4. Peso:
5. Ocupación:
6. Nacionalidad:
7. Cantidad de actividad física (¿cuántas horas a la semana realiza actividad física? Por ejemplo: bailar, basquetbol, gimnasio, bicicleta, nadar, etc.: (Ninguna) (de 1 a 4) (de 5 a 8) (más de 8)
8. ¿Utiliza lentes? Puedes elegir más de una opción:
(oscuros o de transición) (graduación progresiva) (armazón) (contacto) (ninguno)
9. ¿Sabe qué tipo de corrección tienen sus lentes?
(no) (astigmatismo) (miopía) (otro_____)
10. ¿Tiene algún impedimento visual? (Por ejemplo: cataratas, glaucoma, daltonismo, etc.)_____
11. ¿Tiene algún padecimiento de salud? (Por ejemplo: hipertensión, diabetes, epilepsia, otros.)_____
12. En general, ¿cómo describe su afinidad por los robots?
(Me encantan) (Me interesan) (Me dan igual) (Me desagradan) (Los aborrezco)

- Al terminar de contestar estas preguntas, por favor, NO cambie de página e informe al investigador. -

Instrucciones

1. En este experimento usted va a interactuar con una lámpara de mesa robotizada.
2. La interacción consiste en que usted ajuste las características de la lámpara a su gusto para realizar una actividad de comprensión de lectura.
3. El experimento consta de 5 pruebas. En cada prueba se le pide que ajuste la lámpara a su gusto, realice la lectura de un texto breve, conteste unas preguntas referentes al texto, y que evalúe su experiencia.
4. La lámpara robotizada cuenta con 4 características ajustables:
 - a. Altura.
 - b. Intensidad luminosa.
 - c. Brillo.
 - d. Ángulo del cabezal.
5. Para interactuar con la lámpara robotizada usted debe de utilizar el panel de control, conformado por 4 botones.
 - a. Botón 1: Prendido y apagado (ON/OFF)____[Apretar para iniciar o terminar una prueba]
 - b. Botón 2: Característica____[Apretar para cambiar la característica que quiere ajustar]
 - c. Botón 3: Bajar_____ [Apretar para reducir la altura, intensidad, brillo, o ángulo]
 - d. Botón 4: Subir_____ [Apretar para incrementar la altura, intensidad, brillo, o ángulo]
6. Para iniciar una prueba usted debe de presionar el Botón 1 (ON/OFF).
7. Cuando termine la actividad de comprensión de lectura, así como la evaluación de su experiencia, usted debe apretar nuevamente el Botón 1 (ON/OFF).
8. Antes de pasar a la siguiente prueba, usted debe contar en voz alta del 1 al 20.
9. La lámpara robotizada emitirá un sonido de alerta en caso de que usted aprete demasiado fuerte los botones.
10. Como parte del experimento, al inicio y al final de cada prueba, la iluminación del cuarto cambiará.
11. Si tiene alguna duda o pregunta, hágasela saber a la persona que aplica el experimento antes de continuar. Si no tiene dudas, por favor, continúe a la siguiente página y comience el experimento.

Breve recordatorio:

Se le recuerda que al evaluar su experiencia no se base en sus conocimientos técnicos sobre tecnología y robótica, sino que la debe basar en qué sintió usted durante cada prueba. Por ejemplo: emoción, sorpresa, alegría, frustración, enojo, miedo, tranquilidad, etc. Es decir, valorar dentro de una escala del 1 al 7 si interactuar con la lámpara le provocó emociones más positivas o más negativas. Donde 1 es lo más negativo y 7 es lo más positivo. **La evaluación de su experiencia se relacionará a la evaluación que hace el robot de usted.**

Prueba 1:

- 1.- Por favor, solamente presione el Botón On/Off cuando se le indique en este cuadernillo.
- 2.- Presione el botón -On/Off- para comenzar esta prueba.
- 3.- Ajuste las características de la lámpara robot a su gusto utilizando los botones de -Característica-, -Bajar- y -Subir-.
- 4.- Durante la prueba puede reajustar las características cuantas veces lo desee.

Lectura 1: El papel de las expectativas en la interacción entre humano y robot

Artículo académico (Abstract): "The role of expectations in HRI", Manja Lohse. Applied Informatics, Research Institute for Cognition and Robotics, Bielefeld University, Bielefeld Germany.

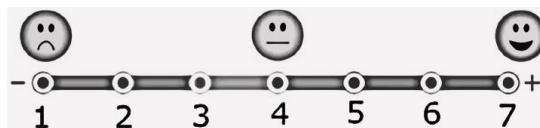
Toda vez que hay interacción entre dos humanos, se crean expectativas en los que se basa su comportamiento. Este artículo establece que se da el mismo caso en las interacciones entre humano y robot (Human-Robot Interactions, HRI). En este trabajo se introducen suposiciones del campo de la teoría de la expectativa, e ilustra como estas suposiciones se pueden probar en el contexto de la interacción entre humano y robot. Así mismo, el objetivo de este artículo es mostrar que conocer las expectativas del usuario puede ayudar a diseñar robots. Dado que las expectativas del usuario dependen del comportamiento del robot, dichas expectativas pueden ser moldeadas para mejorar la interacción entre humano y robot.

Pregunta 1: ¿Crees que el comportamiento humano puede ser alterado por el comportamiento del robot? (Si), (No).

Pregunta 2: Relata brevemente las expectativas que tienes de interactuar con una Lámpara Robot:

Pregunta 3: Escribe el número de prueba que se muestra en la pantalla del módulo con botones (recuerda que este número cambia en cada prueba): _____

Pregunta 4: Califica tu experiencia durante esta prueba encerrando un número del 1 al 7 en la siguiente escala:



- 5.- Presione el botón -On/Off- para terminar esta prueba.
- 6.- Cuente del 1 al 20 en voz alta antes de pasar a la siguiente página.

Prueba 2:

- 1.- Por favor, solamente presione el Botón On/Off cuando se le indique en este cuadernillo.
- 2.- Presione el botón -On/Off- para comenzar esta prueba.
- 3.- Ajuste las características de la lámpara robot a su gusto utilizando los botones de -Característica-, -Bajar- y -Subir-.
- 4.- Durante la prueba puede reajustar las características cuantas veces lo desee.

Lectura 2: Computación que toma en cuenta los sentimientos humanos

Artículo académico (Fragmento): "Affective Wearables", Rosalind Picard and Jennifer Healey, MIT Media Laboratory Perceptual Computing Section Technical Report No.432. 1997.

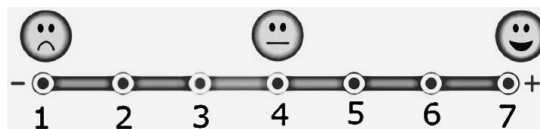
Una cualidad que se puede distinguir entre una *-wearable computer-* (computadora-vestimenta), en contraste con una computadora portátil, es que las "computadoras-vestimenta" pueden estar en contacto físico con el usuario por largo tiempo y de manera íntima. Una computadora-vestimenta puede ser tu cinturón o tu zapato, sombrero, guantes, joyería, u otro tipo de vestimenta, lo que proporciona gran variedad de tipos de contacto físico más allá del paradigma tradicional de cómo utilizar una computadora (es decir apretar teclas o el ratón con la punta de los dedos); en particular, cuando estas computadoras-vestimenta están dotadas de sensores y herramientas para el proceso de señales y el reconocimiento de patrones. Las computadoras-vestimenta tienen el potencial de aprender y reconocer patrones físicos y psicológicos del usuario, en especial aquellos patrones que corresponden a los estados emocionales del usuario, por ejemplo, miedo, estrés, relajamiento, o estar realizando felizmente una actividad.

Pregunta 1: ¿Habías escuchado el término *Affective computing* o *Wearable computers*? (Sí), (No).

Pregunta 2: Propón una aplicación de vestimentas computarizadas:

Pregunta 3: Escribe el número de prueba que se muestra en la pantalla del módulo con botones (recuerda que este número cambia en cada prueba): _____

Pregunta 4: Califica tu experiencia durante esta prueba encerrando un número del 1 al 7 en la siguiente escala:



5.- Presione el botón -On/Off- para terminar esta prueba.

6.-Cuenta del 1 al 20 en voz alta antes de pasar a la siguiente página.

Prueba 3:

- 1.- Por favor, solamente presione el Botón On/Off cuando se le indique en este cuadernillo.
- 2.- Presione el botón -On/Off- para comenzar esta prueba.
- 3.- Ajuste las características de la lámpara robot a su gusto utilizando los botones de -Característica-, -Bajar- y -Subir-.
- 4.- Durante la prueba puede reajustar las características cuantas veces lo desee.

Lectura 3: Datos personales, legislando la salud y bioética

Libro (fragmento): "Big Data, Health Law, and Bioethics", edited by I. Glenn Cohen, Holly Fernandez Lynch, Effy Vayena, and Urs Gasser. Cambridge University Press, 2018.

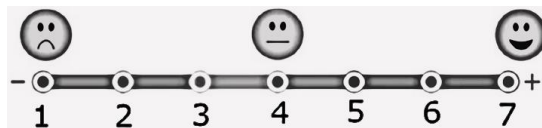
Cuando datos de todos los aspectos de nuestra vida pueden ser relevantes para nuestra salud, desde nuestros hábitos de compra para despensa, nuestro historial de búsquedas en Google, nuestra información en aplicaciones de monitoreo de actividad física (como FitBit) y hasta nuestros registros médicos, ¿es realmente posible diferenciar entre -BigData- y -BigData referente a la salud-? Será que el BigData referente a la salud será utilizado para el bien del usuario, por ejemplo, para aumentar la seguridad en medicinas, o para el mal, por ejemplo, ¿para que las aseguradoras discriminen a los usuarios? ¿Será que este enfoque de BigData corromperá la procuración de salud (y a los sistemas de salud) como ha sido hasta ahora? ¿Será posible proteger la privacidad de nuestra salud? ¿Qué barreras serán necesarias para recolectar y utilizar información relacionada con nuestra salud? ¿Cuál será el papel que la jurisprudencia jugará, y qué problemas éticos podrían surgir? Estos y muchos otros temas se abordan en este libro.

Pregunta 1: ¿Conoces alguna ley o agencia en México que regule el uso del Big Data? (Sí) (No).

Pregunta 2: Describe tu experiencia con los sistemas de salud en México:

Pregunta 3: Escribe el número de prueba que se muestra en la pantalla del módulo con botones (recuerda que este número cambia en cada prueba): _____

Pregunta 4: Califica tu experiencia durante esta prueba encerrando un número del 1 al 7 en la siguiente escala:



5.- Presione el botón -On/Off- para terminar esta prueba.

6.- Cuente del 1 al 20 en voz alta antes de pasar a la siguiente página.

Prueba 4:

- 1.- Por favor, solamente presione el Botón On/Off cuando se le indique en este cuadernillo.
- 2.- Presione el botón -On/Off- para comenzar esta prueba.
- 3.- Ajuste las características de la lámpara robot a su gusto utilizando los botones de -Característica-, -Bajar- y -Subir-.
- 4.- Durante la prueba puede reajustar las características cuantas veces lo desee.

Lectura 4: Prestaciones cognitivas, físicas, sensoriales y funcionales en el diseño de interacciones

Artículo académico (Abstract): "Cognitive, physical, sensory, and functional affordances in interaction design", H. Rex Hartson, Behaviour & Information Technology, 2003.

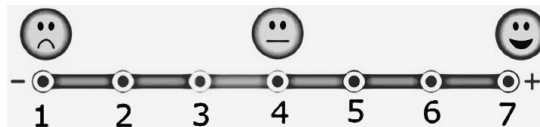
En respuesta al ensayo de Norman de 1999 sobre el mal uso del término *-affordance-* (prestaciones) aplicado en el área de interacción entre humano y computadora, este artículo es un artículo concepto que afirma la importancia de este poderoso concepto, reforzando la terminología de Norman, y expandiendo la utilidad en términos de la aplicación en el diseño y evaluación de interacciones humano-computadora. En este artículo definimos y utilizamos cuatro nuevos tipos de *-affordances-* en el contexto del diseño y evaluación de interacciones humano-computadora: 1) *affordance* cognitiva, 2) *affordance* física, 3) *affordance* sensorial, y 4) *affordance* funcional. El término *affordance* cognitiva (lo que Norman llama *affordance* percibida) y *affordance* física (lo que Norman llama *affordance* real) se refieren a conceptos paralelos e igualmente importantes de la "usabilidad" para el diseño de interacciones humano-computadora, para los cuales los *affordances* sensoriales juegan un papel de apoyo. En este artículo argumentamos que el concepto de *affordance* físico conlleva forzosamente componentes de utilidad o de acción con propósito (*affordance* funcional). Finalmente, proveemos lineamientos para ayudar a los diseñadores a pensar sobre cómo estos cuatro tipos de *affordances* trabajan juntos naturalmente en un contexto de diseño y evaluación de interacciones entre humano y computadora.

Pregunta 1: ¿Conoces el trabajo sobre diseño de Don Norman? (Sí), (No)

Pregunta 2: Describe una situación donde es necesario que la tecnología considere tanto el cuerpo como la mente de los usuarios: _____

Pregunta 3: Escribe el número de prueba que se muestra en la pantalla del módulo con botones (recuerda que este número cambia en cada prueba): _____

Pregunta 4: Califica tu experiencia durante esta prueba encerrando un número del 1 al 7 en la siguiente escala:



5.- Presione el botón -On/Off- para terminar esta prueba.

6.- Cuente del 1 al 20 en voz alta antes de pasar a la siguiente página.

Prueba 5:

- 1.- Por favor, solamente presione el Botón On/Off cuando se le indique en este cuadernillo.
- 2.- Presione el botón -On/Off- para comenzar esta prueba.
- 3.- Ajuste las características de la lámpara robot a su gusto utilizando los botones de -Característica-, -Bajar- y -Subir-.
- 4.- Durante la prueba puede reajustar las características cuantas veces lo desee.

Lectura 5: Diseñar para el bienestar del usuario

Descripción de taller académico: "Design for Wellbeing – Tools for Research, Practice and Ethics" Rafael A. Calvo , Dorian Peters, CHI'19 Extended Abstracts.

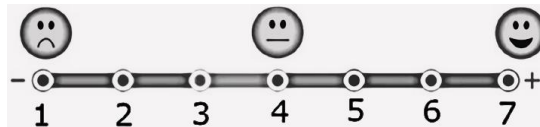
Cualquier cambio que nos acerque al diseño y tecnologías éticas que genuinamente mejoren nuestras vidas requiere que esas tecnologías respeten nuestras necesidades psicológicas. Actualmente, no hay una integración sistemática de la ciencia del -bienestar humano- hacia el desarrollo tecnológico, y muchos de los daños a la salud mental inducidos por la tecnología, reportados diariamente en los medios, son muestra clara de este déficit de integración, pero recientemente esto está cambiando. La demanda por "tecnologías más humanas" [12] está forzando a las compañías a reimaginar los negocios digitales. Afortunadamente, investigaciones recientes han revelado nuevas maneras de hacer tecnologías psicológicamente respetuosas. Así como diseñamos ergonómicamente para el bienestar físico, también podemos diseñar psico-ergonómicamente para promover el bienestar psicológico de los usuarios. Al integrar teorías y métodos bien documentados y de múltiples disciplinas, podemos diseñar y desarrollar nuevas tecnologías para "no ocasionar daño" y más aún para incrementar el bienestar psicológico. En este curso introducimos marcos teóricos para el diseño de tecnologías que, a la vez, respeten los valores humanos y su bienestar, esto aunado a un marco teórico ético con el cual podemos situar el diseño y hacerlo florecer. También, proporcionamos herramientas prácticas para el desarrollo, diseño, y la evaluación del impacto psicológico de los productos.

Pregunta 1: ¿Crees necesario incluir esta perspectiva de diseño en la Facultad de Ingeniería? (Sí) (No)

Pregunta 2: Describe un escenario donde consideras importante que se aplique el diseño centrado en el bienestar psicológico del usuario:

Pregunta 3: Escribe el número de prueba que se muestra en la pantalla del módulo con botones (recuerda que este número cambia en cada prueba): _____

Pregunta 4: Califica tu experiencia durante esta prueba encerrando un número del 1 al 7 en la siguiente escala:



- 3.- Presione el botón -On/Off- para terminar esta prueba.
- 4.- Cuente del 1 al 20 en voz alta, su participación ha terminado.
- 5.- Entregue este cuadernillo a la persona que aplica el experimento.

¡Muchas gracias por participar!

Apéndice F: Dibujos y modelos 3D de Lámpara robot

	<p>Figura F.1. Bosquejo de Lámpara robotizada. Exploración entre lámpara de piso y lámpara de mesa.</p>
	<p>Figura F.2. Bosquejo del perfil de Lámpara de mesa, se muestra transición de altura del cabezal de iluminación.</p>
	<p>Figura F.3. Bosquejo de mecanismo para subir y bajar cabezal de iluminación en la Lámpara de mesa robotizada. Se establecen dimensiones preliminares.</p>

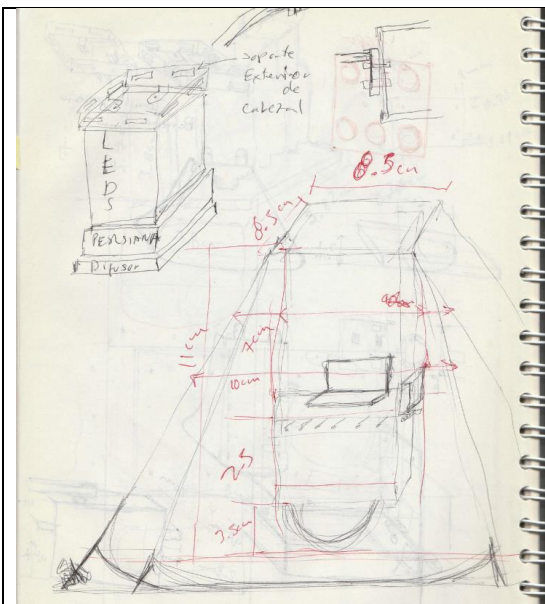


Figura F.4. Bosquejo de cabezal de iluminación. Se presenta diseño modular, mostrando separación entre LEDs, mecanismo de persianas y difusor de luz.

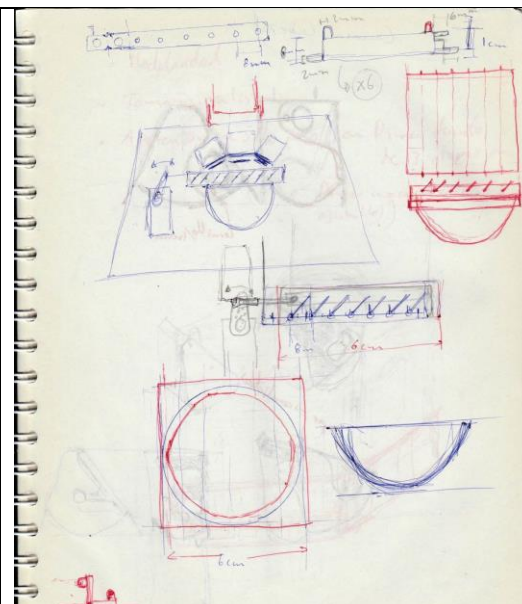


Figura F.5. Bosquejo de detalle de mecanismo de persianas y su ubicación en relación con el difusor de luz (media esfera).

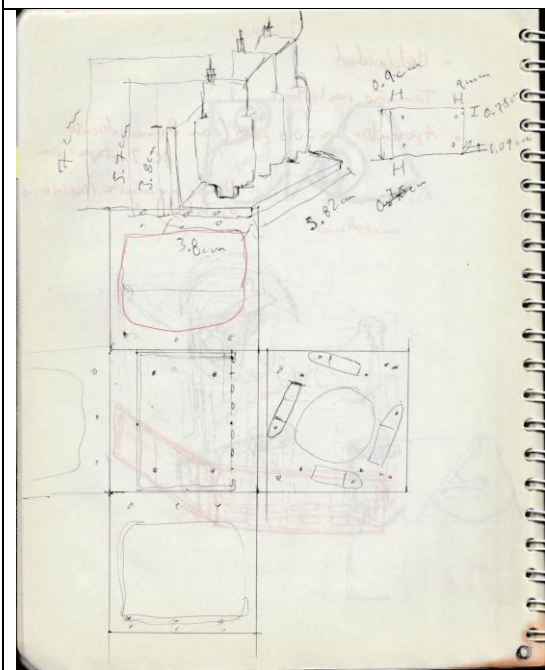


Figura F.6. Bosquejo de la disposición de tres módulos LED de uso comercial adaptados para cabezal de iluminación. Medidas reales conforme piezas comerciales.

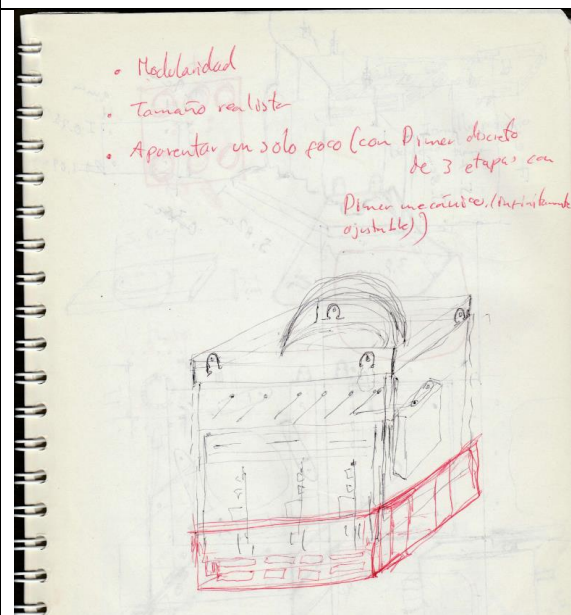


Figura F.7. Bosquejo "jaula" del cabezal de iluminación donde se sujetan los módulos LED, el mecanismo de persianas y el difusor de luz.

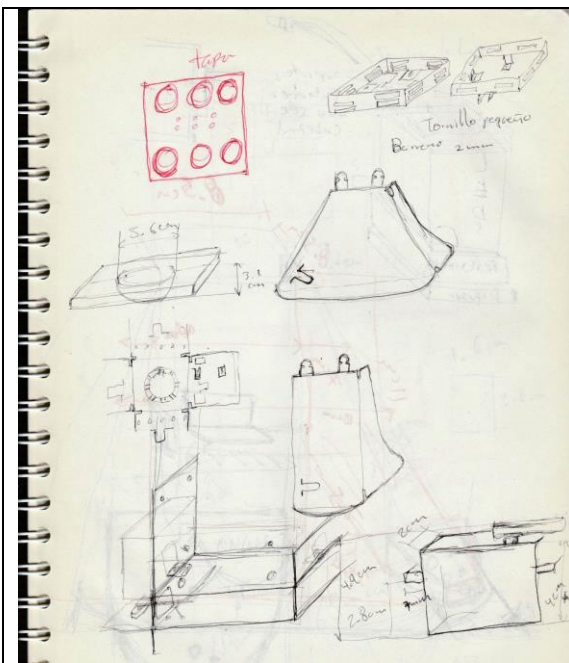


Figura F.8. Bosqueja de detalle sobre colocación de servomotor para controlar persianas, y forma del cabezal de iluminación.

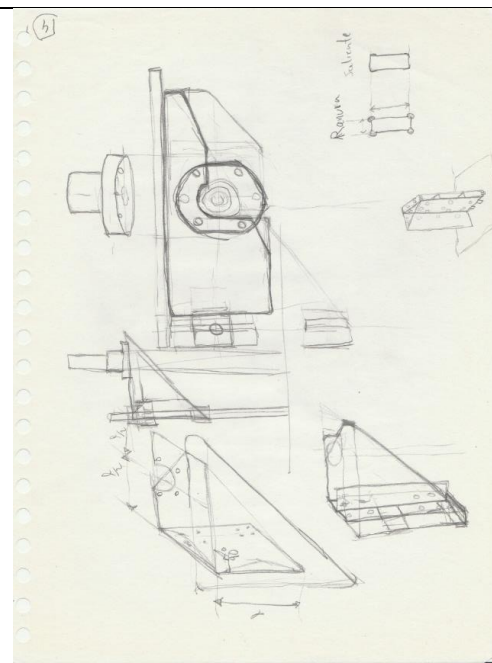


Figura F.9. Bosquejo detalle pieza del elevador de altura del cabezal que se atornilla a la tuerca del sinfín.

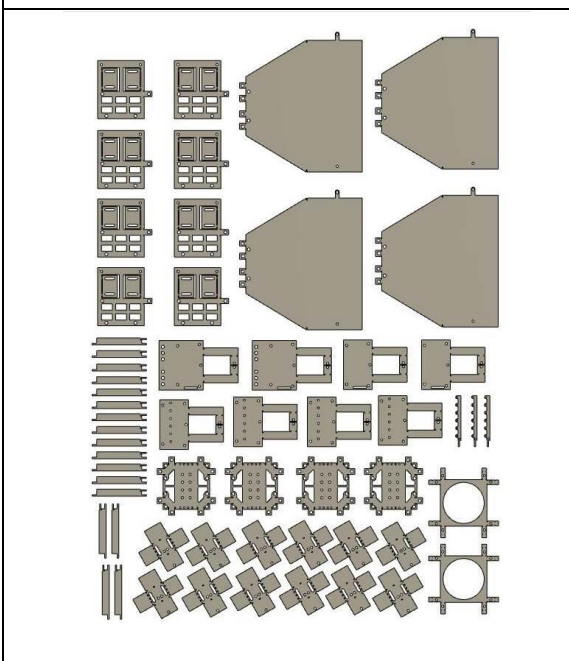


Figura F.10. Piezas modeladas en CAD (Fusion360) para ser cortadas con láser de una lámina de acero. (Jaula de cabezal, persianas, y soportes, para sensores de luz y motores servo)

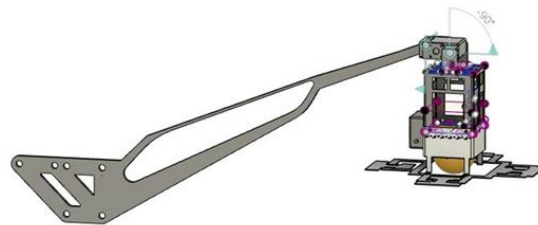
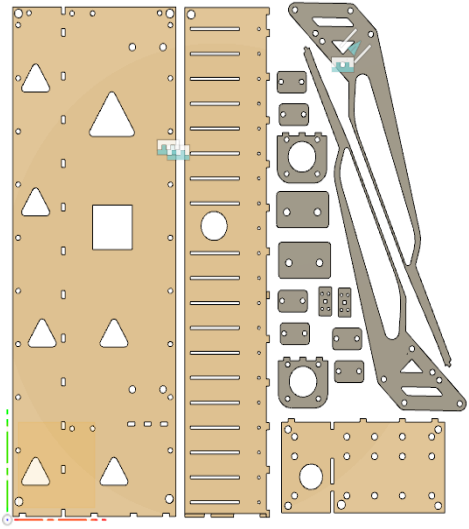
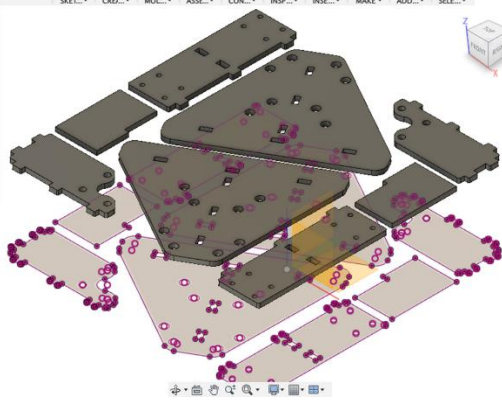
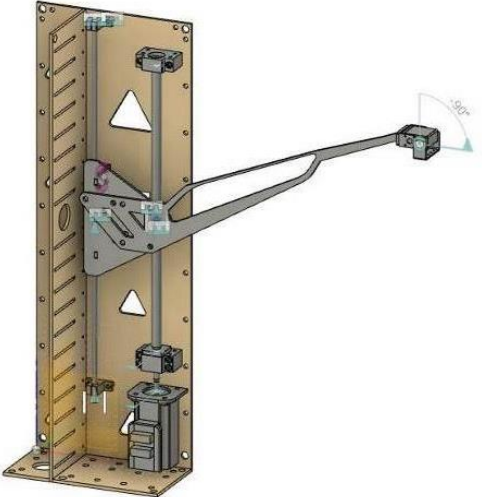
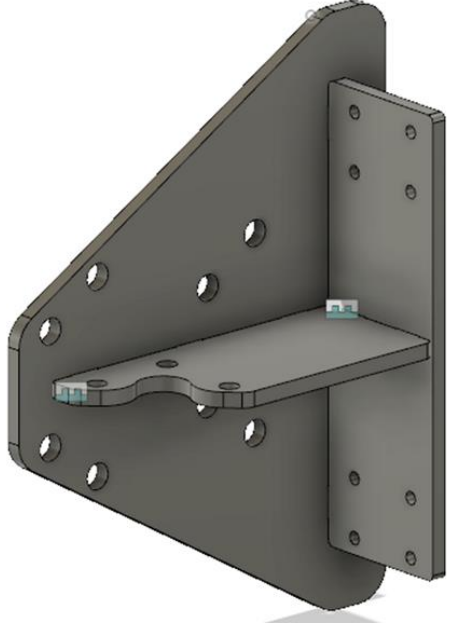


Figura F.11. Ensamble CAD del brazo y cabezal de iluminación, fabricado con las piezas cortadas con láser.

	
<p>Figura F.12. Piezas del cuerpo de la lámpara modeladas en Fusion360 para ser cortadas con chorro de agua de una placa de acero.</p>	<p>Figura F.13. Piezas del soporte del brazo para subir y bajar el cabezal de iluminación. Modeladas en Fusion360.</p>
	
<p>Figura F.14. Ensamble en Fusion360 de las piezas a ser cortadas en placa de metal para formar el cuerpo de la lámpara y brazo.</p>	<p>Figura F.15. Ensamble de piezas de soporte de brazo de cabezal.</p>

Apéndice G: Fotografías fabricación luminaria

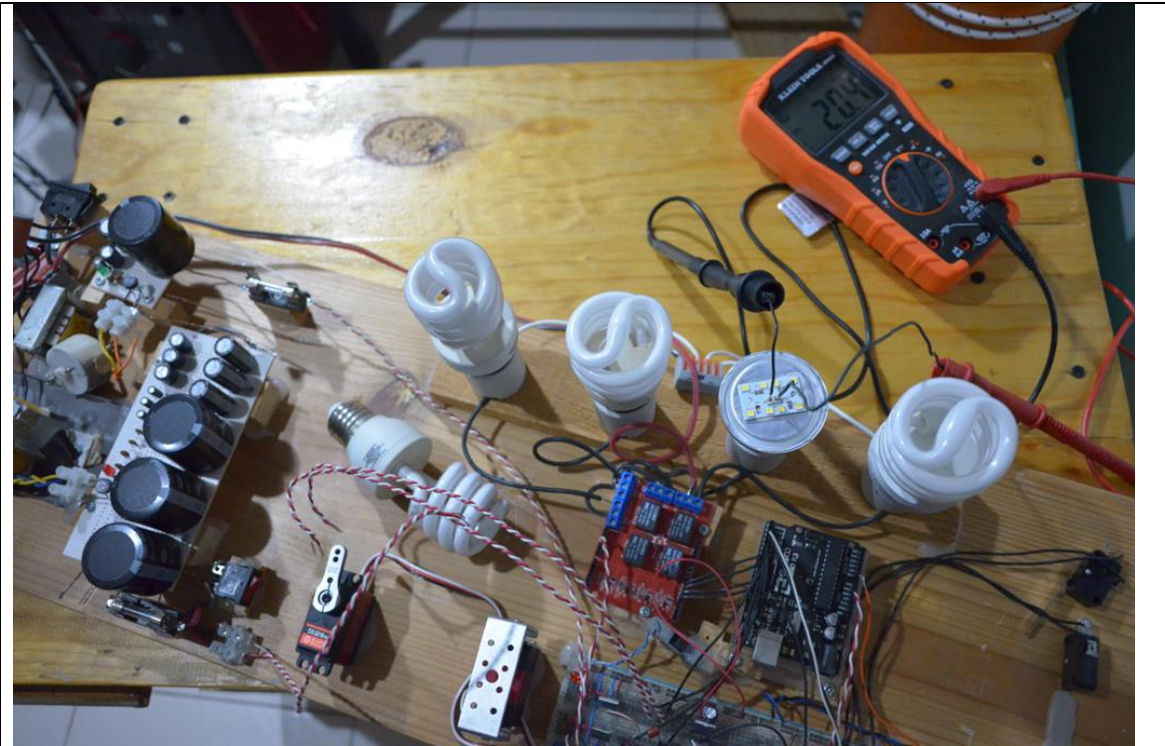


Figura G.1. Circuito eléctrico y electrónico para controlar focos convencionales y servomotores.



Figura G.2. Adaptación de foco LED para construcción de luminaria con tres módulos.



Figura G.3. Extracción de módulo LED de 5 Watts y regulador/rectificador de voltaje de 72 volts DC de foco LED de uso comercial (Phillips).

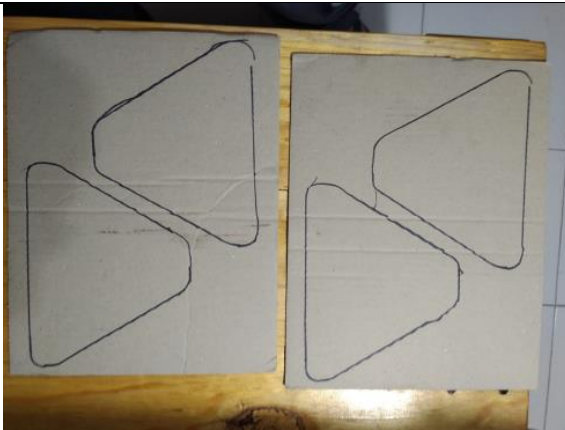


Figura G.4. Prototipado rápido del cabezal de iluminación en cartón.

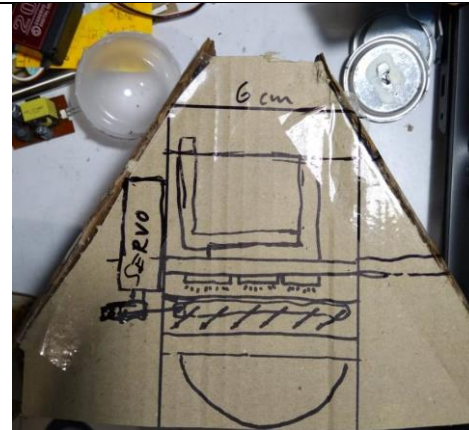


Figura G.5. Tamaño se basa en medidas de servomotor y difusor de luz comercial.

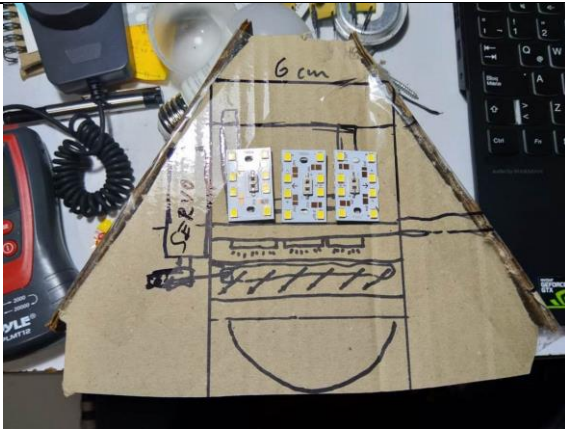


Figura G.6. Módulos LED de 5 Watts, sobre prototipo rápido.

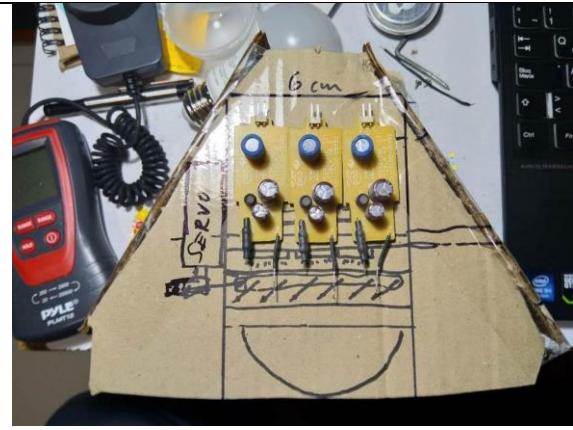


Figura G.7. Reguladores de voltaje para módulos LED de uso comercial.

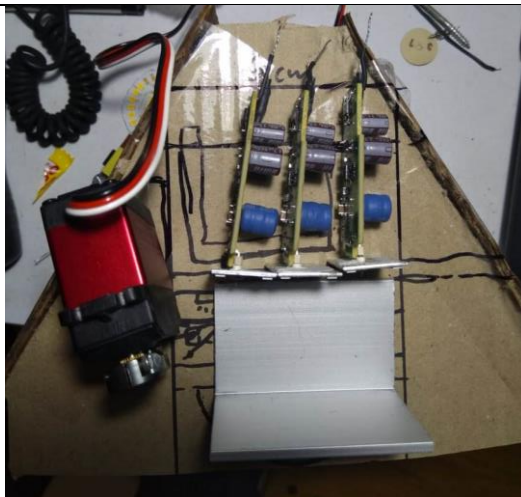


Figura G.8. Presentación de servomotor, módulos LED, reguladores de voltaje y difusor de calor.

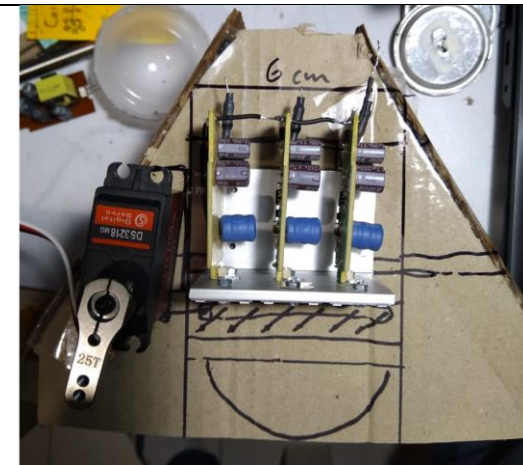


Figura G.9. Presentación de ensamble de luminaria con tres módulos LED con encendido independiente.

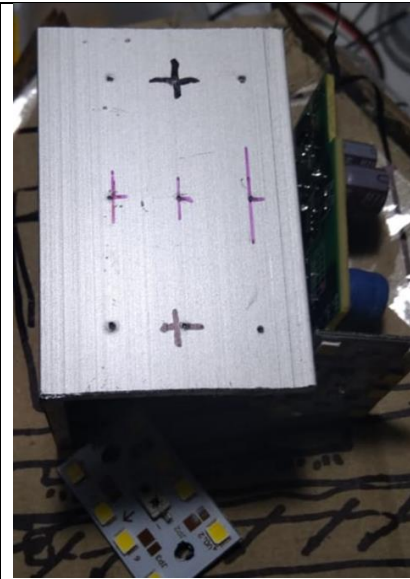


Figura G.10. Fabricación de difusor de calor y base para los módulos LED y sus reguladores de voltaje.

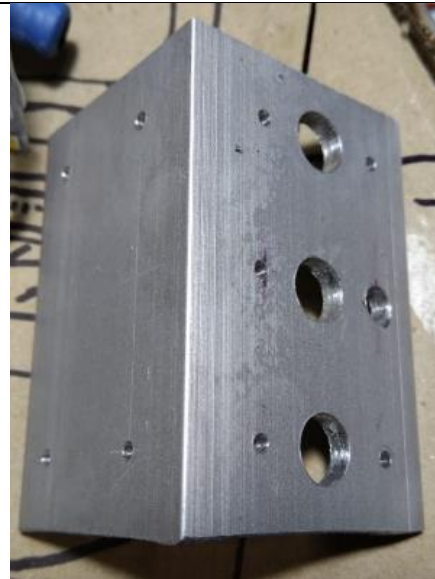


Figura G.11. Difusor de calor de aluminio terminado.



Figura G.12. Ensamble de módulos LED y reguladores en el difusor de calor (vista lateral).

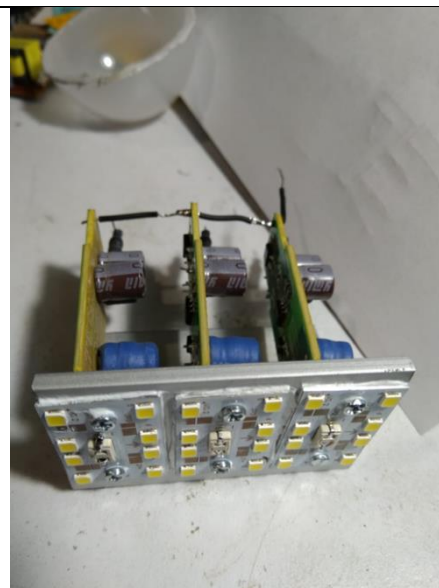


Figura G.13. Ensamble de módulos LED y reguladores en el difusor de calor (vista de perfil).

Apéndice H: Fotos de fabricación Cabezal de iluminación

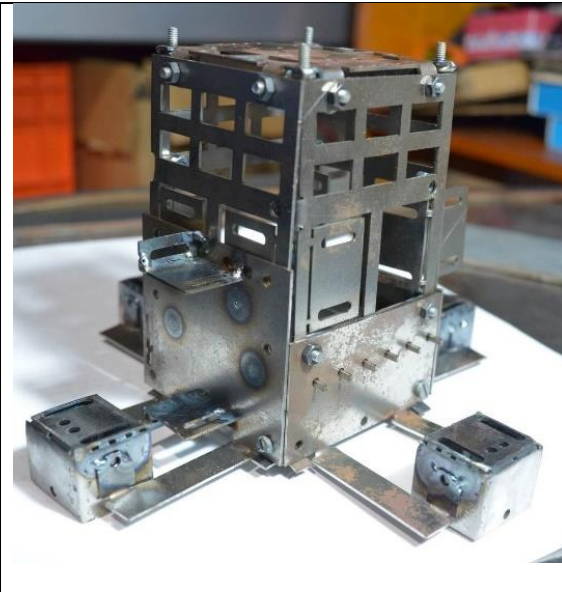


Figura H.1. Cuerpo del cabezal (jaula). Corte láser, doblado y soldado con proceso TIG.

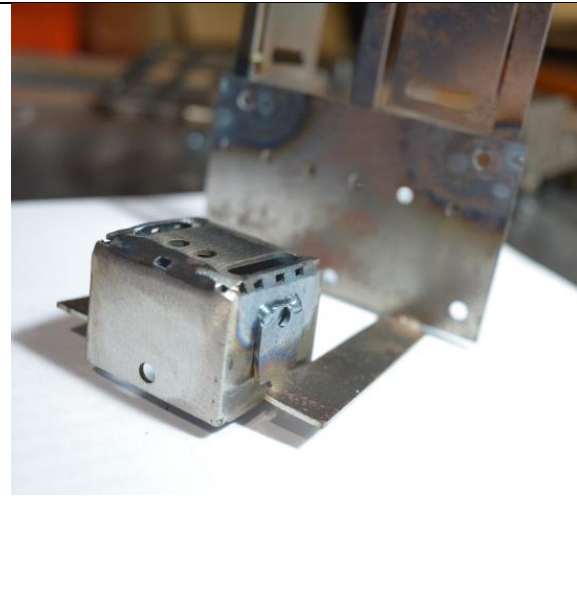


Figura H.2. Detalle de piezas en lámina de 1mm, soporte para sensor de luz (caja de 2cm de lado).

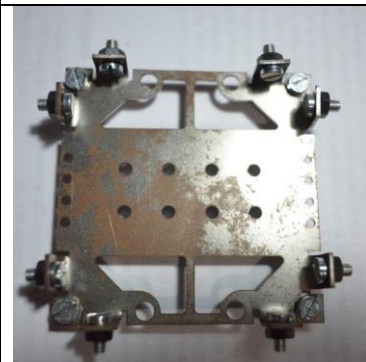


Figura H.3. Detalle tapa de la "jaula", una piezas por 5 lados (4 laterales y uno superior)

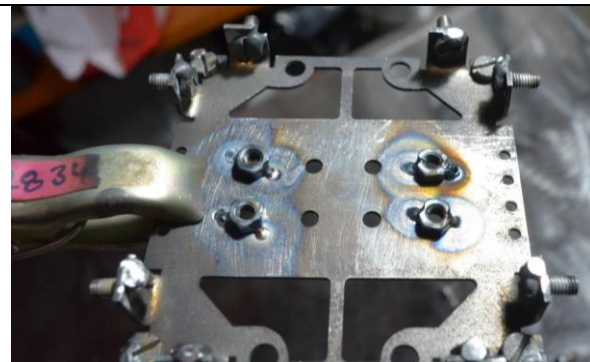


Figura H.4. Detalle tapa de "jaula", se aprecia sistema de tornillería para ensamble y desensamble.



Figura H.5. Soporte para soldar con proceso TIG sobre piezas de lámina de 1mm.

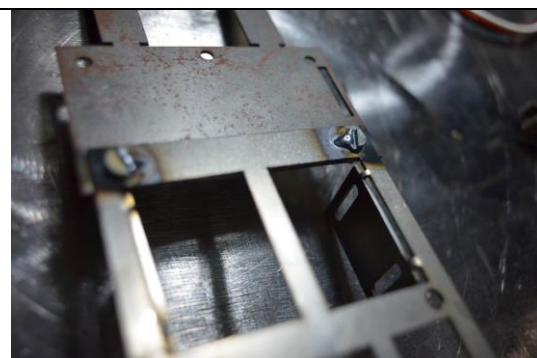


Figura H.6. Detalle de pared de "jaula". Esta pieza a su vez es un subensamble de varias piezas para lograr geometrías complejas.

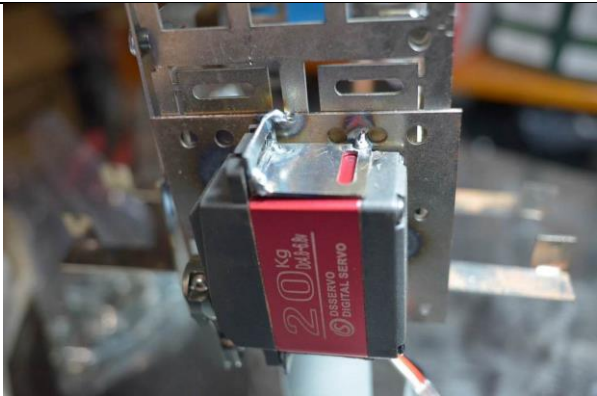

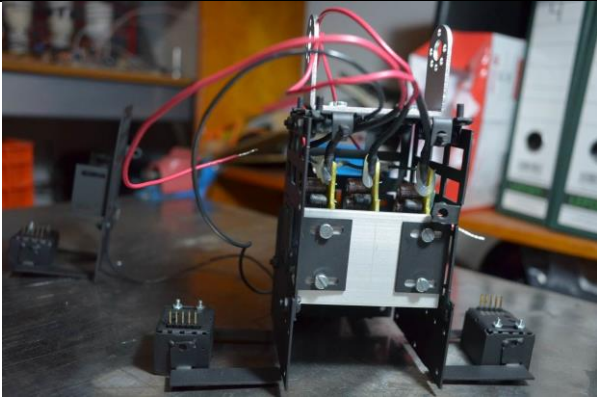
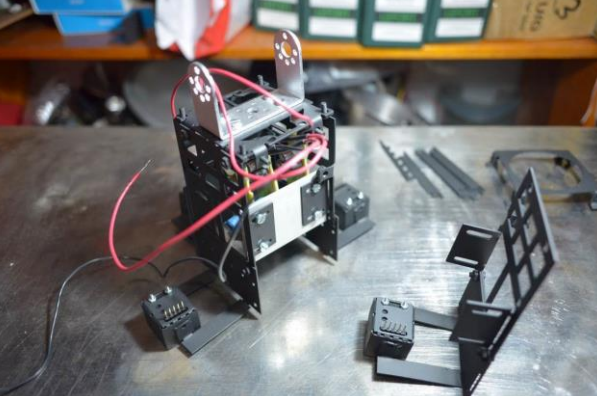
	<p>Figura H.7. Detalle de soldadura TIG, soporte para servomotor que mueve el mecanismo de persianas dentro del cabezal de iluminación.</p>
	<p>Figura H.8. Cabezal de iluminación con sensores de luz (cajas laterales), servomotor y módulos LED dentro de la "jaula".</p>
	<p>Figura H.9. Detalle de soporte para difusor de calor y base de los 3 módulos LED dentro de la "Jaula". El espacio debajo del difusor de calor es para el mecanismo de persianas.</p>
	<p>Figura H.10. Detalle de "jaula" abierta para ensamble de mecanismo de persianas (persianas sobre la mesa) y base para difusor de luz. Se aprecia el soporte superior para el servomotor que controla el ángulo del cabezal.</p>



Figura H.11. Vista general de la Lámpara-robot y comparación con lámpara de piso. Proporción del tamaño del cabezal de iluminación.



Figura H.12. Interfaz de usuario con cuatro botones; dos de los cuales son sensores de fuerza de alta precisión. Circuito de amplificadores instrumentales, mini-display, y convertidor analógico-digital de 4 canales. Interfaz controla cabezal de iluminación (ángulo de proyección, posición del mecanismo de persianas, intensidad luminosa de los módulos LED y altura del cabezal).

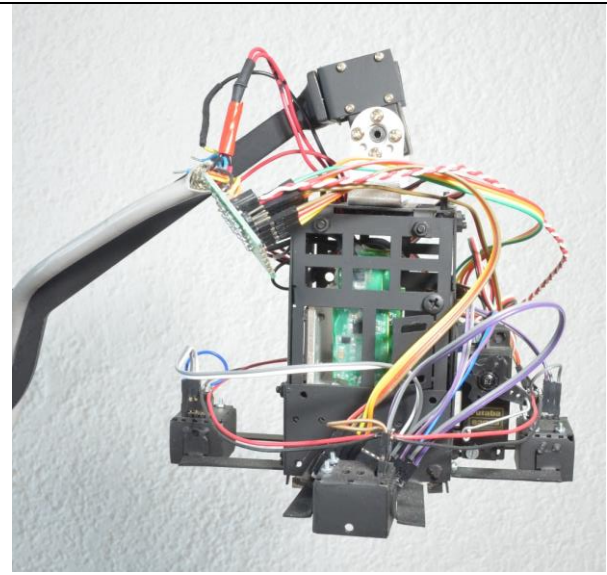
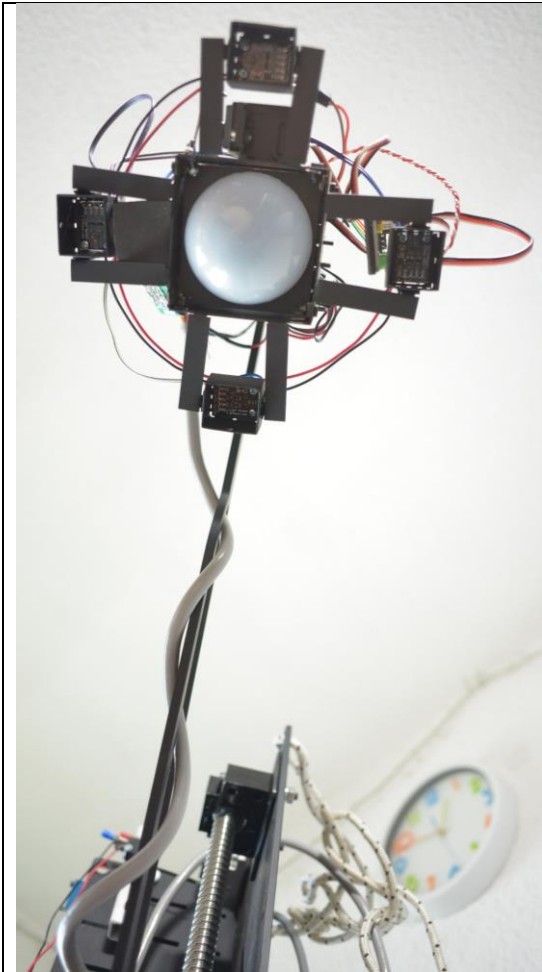


Figura H.13. (arriba) Cabezal de iluminación completamente poblado por sensores y actuadores. Servomotor superior controla el ángulo del cabezal, mientras que el servomotor lateral mueve el mecanismo de persianas.

Figura H.14. (izquierda) Vista inferior del cabezal de iluminación, se aprecia difusor de luz al centro y los cuatro sensores de luz en soportes laterales.

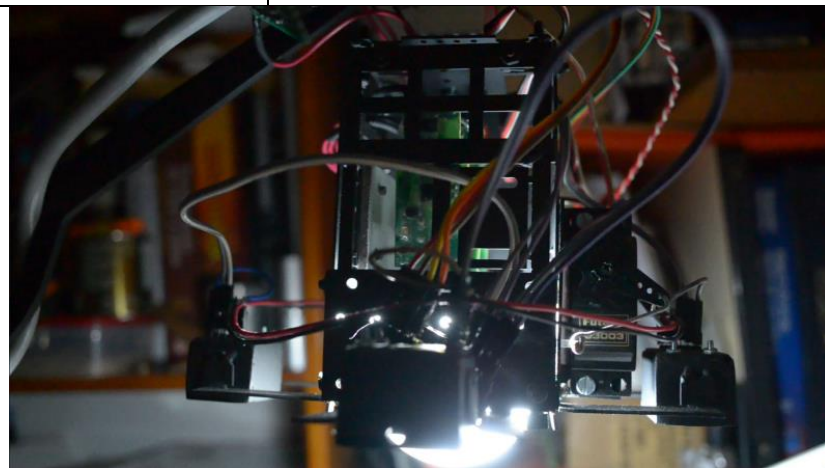
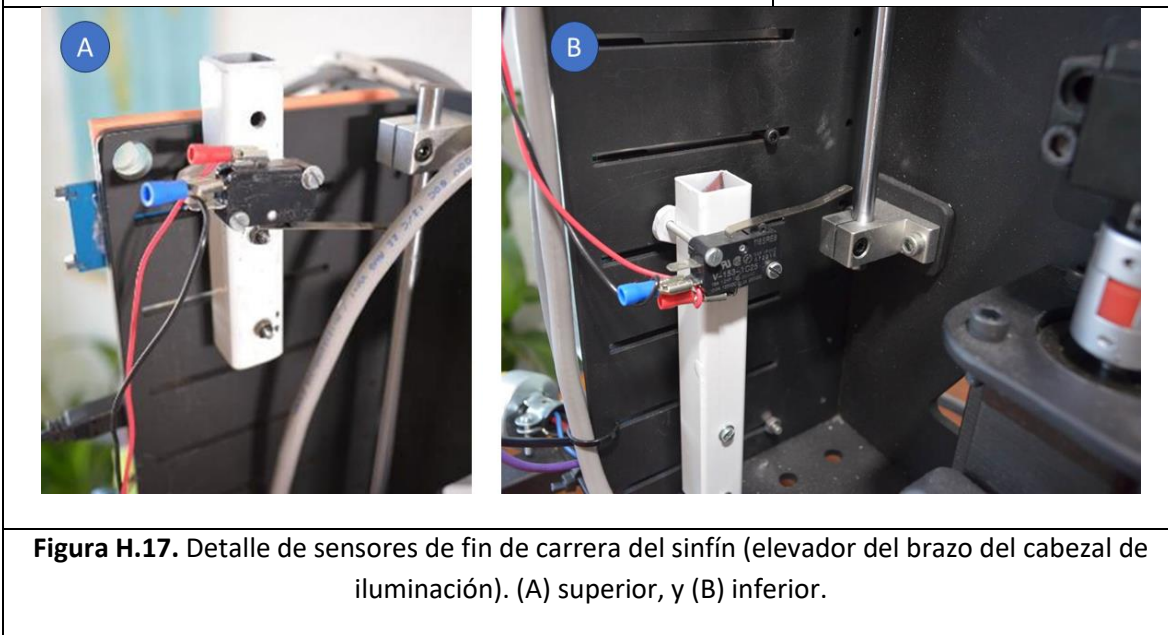
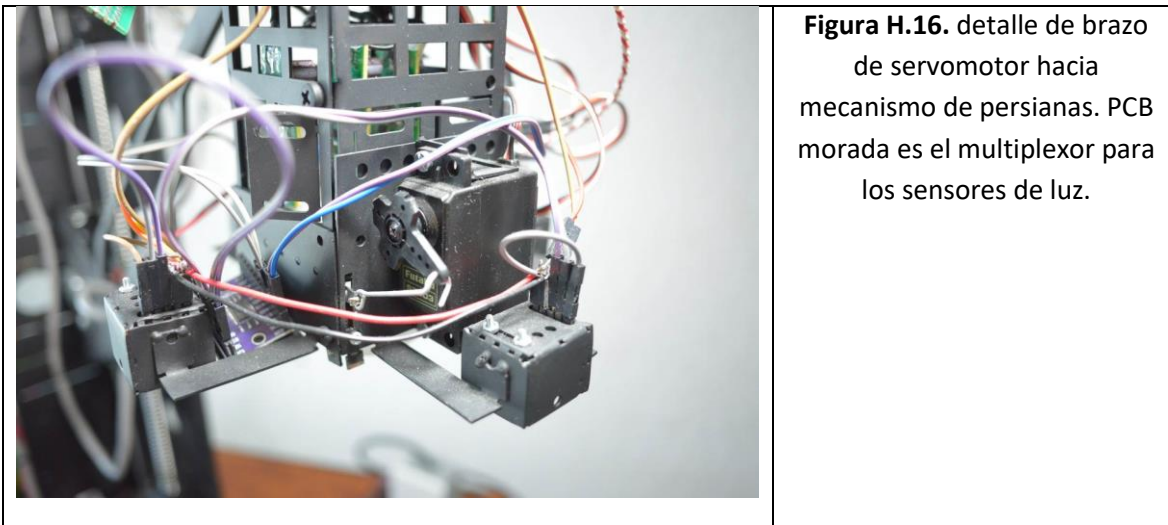


Figura H.15. Vista de cabezal de iluminación encendida.



Apéndice I: Artículo SOMIM 2019

Esta página se deja en blanco intencionalmente para respetar el formato original del artículo:

***“Recomendaciones para la experimentación en el área de interacción entre humano
y robot utilizando el concepto de Experiencia del Usuario”***

Que tiene por autores:

Carlos G. Gomez-Monroy, Vicente Borja, y Alejandro Ramirez-Reivich.

Publicado en las MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM

18 al 20 DE SEPTIEMBRE DE 2019 MAZATLÁN, SINALOA, MÉXICO

A continuación, dicho artículo.

Tema A1a: Diseño Mecánico.

“Recomendaciones para la experimentación en el área de interacción entre humano y robot utilizando el concepto de Experiencia del Usuario”

Carlos G. Gomez-Monroy¹,
Diseño Mecánico, FI, UNAM.
CDMX, México.

Vicente Borja²,
CDMIT, FI, UNAM.
CDMX, México.

Alejandro Ramirez-Reivich³,
CDMIT, FI, UNAM.
CDMX, México.

RESUMEN

Dentro de la investigación en el área de la interacción entre humano y robot se encuentra el enfoque de diseño centrado en el usuario, éste reconoce el valor ingenieril que tiene la evaluación cualitativa del usuario de la interacción con el robot, a la que llamamos experiencia del usuario. Debido al rango de variables comprendidas en una interacción es necesario delimitar los alcances experimentales. En este artículo se proporciona una síntesis de los componentes recurrentes en los experimentos de artículos publicados, a la vez que se presenta un conjunto de recomendaciones para el planteamiento de nuevos experimentos que involucren la evaluación cualitativa del usuario.

Palabras Clave: Interacción humano-robot, Experiencia del usuario, diseño experimental.

ABSTRACT

Within the research in the area of human-robot interaction is the user-centered design approach, which recognizes the engineering value of the user's qualitative evaluation of the interaction with the robot, which we call experience user experience. Due to the range of variables included in an interaction, it is necessary to define the experimental scopes. This paper provides a synthesis of the recurrent components in the experiments of published papers, together with recommendations for the presentation of new experiments involving the qualitative assessment of the user.

Keywords: Human-robot interaction, User Experience, experimental design.

1- Introducción

Actualmente, hay un incremento en el diseño y fabricación de dispositivos y robots con capacidad de sensar al usuario por medio de cámaras, micrófonos, sensores de distancia, etc. [19, 32, 33, 36]. Dichos dispositivos abren la puerta a la investigación de la interacción entre el dispositivo y el usuario, al facilitar la información recopilada por el dispositivo durante el uso del mismo, evitando tener que crear una bancada de pruebas especial para recopilar dicha información, lo que resulta en una interacción natural (en campo, es decir, la vida real) y no en un escenario artificial [1-5].

La información recopilada por los dispositivos o robots durante la interacción ha mostrado la capacidad de inferir la evaluación subjetiva del usuario, es decir, su opinión, lo que se hace tradicionalmente con una encuesta de satisfacción [10, 14, 23, 50]. La correlación entre la

información obtenida de sensar al usuario es de tipo cuantitativa, es decir, objetiva; cuando cuenta con la opinión del usuario, que es de carácter cualitativo o subjetivo, se denomina Experiencia del Usuario (“*User Experience*”, UX)[14, 22, 23, 24, 37, 39, 41].

Una parte central del concepto de Experiencia del Usuario es la existencia de una valoración cualitativa de la interacción, es decir, se reconoce el componente de “opinión personal” como un objeto con valor ingenieril en la obtención de las necesidades del usuario [10].

Un robot tiene la capacidad de modificar varias de sus características físicas, y dentro de estas posibles variables, hay subvariables que necesitan definirse. Sin embargo, a la hora de diseñar un experimento científico se requiere aislar la variable de interés lo más posible, teniendo un ambiente controlado para reducir el ruido en la captura de información [52].

El mismo rigor científico requerido para llevar a cabo la experimentación es un obstáculo cuando se intenta estudiar la interacción entre humanos y robots, utilizando

el concepto de Experiencia del Usuario, pues se incurre en una paradoja: si hacemos un experimento con un robot con múltiples características que cambian a la vez, se dificulta la correlación directa entre la valoración cualitativa que da el usuario y la variable de interés (pues no existe una correlación biyectiva o uno a uno); por otro lado, si se limita el comportamiento del robot durante el experimento a sólo variar una característica a la vez, podríamos estar despojando al robot de su cualidad de ser robot, o al menos de ser percibido como uno por el usuario.

En cualquiera de los casos existe el reto de generar estudios académicos veraces y, deseablemente, repetibles. En este artículo se aborda la diversidad y complejidad de los temas estudiados en la interacción entre humano y robot (HRI, *human-robot interaction*), [46, 47, 51], con el fin de presentar un panorama general del área de investigación, así como una lista de recomendaciones para el diseño de nuevos experimentos que intenten captar la experiencia del usuario.

2- Antecedentes

La posibilidad de diseñar productos que se adapten al usuario y que siempre estén mejorando su servicio mueve a grupos de investigadores a estudiar diversas maneras de reconocer las necesidades del usuario en tiempo real. Estudios recientes se enfocan en reconocer las necesidades del usuario por medio de un algoritmo que utiliza información recibida de los sensores en el producto y que miden al usuario durante la interacción. Tal es el caso del experimento realizado por Xu et al. [26] en una estación de metro, donde se utilizaron las puertas y escaleras eléctricas, elevadores y anuncios dentro de la estación para guiar a los usuarios de acuerdo con sus características; a las personas de la tercera edad o aquellas con dos o más bultos se les guiaba hacia el elevador, mientras que a los usuarios jóvenes con carga ligera se les guiaba hacia la escalera eléctrica o escalera tradicional. El fin del experimento era simular un ambiente altamente robotizado en un lugar cotidiano, como una estación de metro, y producir una experiencia acorde a las necesidades específicas de cada usuario.

En la investigación de la interacción entre humano y robot (HRI), un grupo de estudios con perspectiva de Diseño Centrado en el Usuario (UCD) intenta ligar (correlacionar) información cuantitativa de la interacción entre humano y robot, con la evaluación cualitativa del usuario hacia la interacción, es decir su opinión, bajo el concepto denominado “experiencia del usuario” (UX). Para obtener la información cuantitativa se sensa al usuario durante la interacción, obteniendo datos que sirvan para comparar con los resultados de los cuestionarios de satisfacción (a mano o en digital).

El concepto de UX permite estudiar variables de acoplamiento entre humanos y robots, con el fin de llegar a una convivencia segura y eficiente en un ambiente colaborativo entre humanos y robots, de manera que los

usuarios (humanos) no sólo estén seguros, sino también se sientan seguros y cómodos durante la interacción, por ejemplo, el estudio realizado por Bonin et al.[27], donde se compara la experiencia que tienen los operadores de una línea de ensamblado al interactuar con un brazo robótico utilizando diferentes perfiles de velocidad.

El estudio de UX es complejo debido a su naturaleza multidisciplinaria y al difícil reto de obtener retroalimentación confiable por parte de los usuarios, además de la sensibilidad de la población y predisposiciones sociales o personales respecto del robot en cuestión.

La habilidad de los robots para adaptarse al usuario en sus componentes físico y de comportamiento, ponen a disposición del usuario un sinnúmero de decisiones por tomar, cuyos parámetros no tendrán sentido para el usuario no experto. Como ejemplo de la adaptabilidad física de un robot tenemos el componente ergonómico en líneas de ensamblado en espacios colaborativos con brazos robotizados, donde el sistema adquiere las tallas del operador para ajustarse a sus características físicas y disminuir el estrés musculoesquelético [20]. Como ejemplo de la parte de comportamiento, están los robots de compañía para ancianos o niños con autismo, dichos robots reconocen al niño como individuo y se comportan de manera específica y de acuerdo con interacciones pasadas, repitiendo características que le agradaron al niño y reduciendo las que no [40, 45].

La flexibilidad del concepto UX conlleva que el rango de temas para hacer experimentos sea extenso y diverso, utilizando diferentes tipos de robots, como puede ser un robot humanoide con pantalla de iPad que trabaja como asistente en un aeropuerto y cuyo interés del estudio es conocer la susceptibilidad del público a dar sus datos personales [29]; otro ejemplo es el estudio realizado por Alenljung et al. [11] cuyo objetivo fue analizar la respuesta emocional de una persona hacia un pequeño robot humanoide, modelo Nao, simplemente al sujetarlo entre sus manos. En otro caso se instrumentaron tenis con múltiples sensores de presiones en la plantilla para comparar el perfil de presión con la opinión de los usuarios respecto al calzado, los autores de este estudio llaman a su metodología “Diseño Ciber-empático” [10]. Otra área en auge es la virtualización de espacios de trabajo y simulación de riesgo, que permite simular las posturas requeridas para llevar a cabo el trabajo asignado y evaluar las implicaciones en la salud del trabajador a largo plazo, para así permitir que el robot altere las rutinas de ensamblaje o establecer diferentes tácticas preventivas como la predicción de colisiones [12, 38, 48, 49].

Así como hay diversas investigaciones que utilizan el concepto de UX, de igual manera hay muchas formas de sensar a un usuario y de obtener su opinión. Al ser un tema relativamente nuevo, no hay un consenso dominante respecto a cómo se debe de capturar la información cualitativa en los estudios HRI, ésta es la motivación para realizar una serie de recomendaciones para el diseño

y elaboración de experimentos utilizando el concepto de UX, con el fin de desarrollar experimentos con rigor científico, ayudando a delimitar el tema de interés, el enfoque, la variable experimental, forma de evaluación cualitativa del usuario y la forma de sensar al usuario para obtener la información cuantitativa de la interacción.

3- Objetivo

El objetivo de este artículo es dar un panorama actual sobre la experimentación en el área de la interacción entre humano y robot (HRI), desde un enfoque de diseño centrado en el usuario; específicamente, planteamientos que utilizan el concepto de Experiencia del Usuario (UX), así como proporcionar recomendaciones para desarrollar experimentos en esta área de investigación.

4- Metodología

El presente artículo es el resultado de 18 meses de investigación de antecedentes en el área de la interacción humano-robot, que se realizó como base para el planteamiento de un experimento propio que se encuentre a la altura de la investigación realizada por los grupos académicos ya establecidos en el área.

- A. Se analizaron múltiples artículos del área de la interacción humano-robot (especialmente de hace 10 años a la actualidad).
- B. Se establecieron componentes comunes dentro del planteamiento experimental de los artículos.
- C. Se propone una lista de recomendaciones a modo de guía para el diseño de experimentos que utilizan el concepto de Experiencia del Usuario.
- D. Se proporciona un ejemplo para las recomendaciones propuestas.

5- Resultados y discusión

En la interacción humano-robot, el enfoque de Diseño Centrado en el Usuario de la investigación utiliza la Experiencia del Usuario (UX) como forma de evaluación del usuario hacia el producto (objeto). Con claras tendencias e intenciones de pasar de los cuestionarios tradicionales de satisfacción escritos (a mano o digital), donde se le pregunta directamente al usuario su opinión respecto al objeto en uso, a la medición del usuario para asumir el estado de satisfacción del mismo sin tener que preguntarle directamente; dicho enfoque permite medir a los usuarios finales del producto para seguir mejorándolo o para adaptarse de manera personal, alterando sus características para ajustarse a los gustos y características (necesidades, requerimientos) personales del usuario. Hay que remarcar la ventaja que esto representa en la

reducción de costos de grupos muestra y en lo robusto de la muestra (pues el mercado mismo se vuelve el grupo muestra).

Los robots pueden almacenar información permitiendo el aprendizaje de máquina: por ende, la autooptimización del sistema utilizando los datos generados durante la interacción entre el robot y el usuario. Durante la investigación en HRI es necesario delimitar la correlación entre la medición física (información cuantitativa) y el método de comparación clásico de una encuesta de satisfacción (información cualitativa).

Los resultados de este trabajo se presentan de la siguiente manera:

- Componentes comunes en los experimentos realizados en la interacción humano-robot, cuando se utiliza el concepto de Experiencia del usuario (UX).
- Recomendaciones para el planteamiento y desarrollo de experimentos nuevos que requieran capturar la opinión del usuario (experiencia).
- Ejemplo de uso de las recomendaciones.

5.1- Componentes comunes en la investigación de UX.

A continuación se enlista la propuesta de componentes generales que constituyen los experimentos realizados en el área de la interacción humano-robot. Dichos componentes fueron identificados durante la investigación de antecedentes como un esfuerzo de análisis y síntesis de las publicaciones recientes en el área:

1. Robot (social, industrial, médico, militar, etc.).
2. Ambiente (ecología) donde se desempeñará el robot.
3. Variable experimental.
4. Objetivo del experimento
5. Forma de interacción.
6. Forma de capturar la opinión del usuario (cualitativo).
7. Forma de medir al usuario (cuantitativo).
8. Usuario (perfil de usuario).

A continuación se presenta una breve descripción de cada componente:

5.1.1 Robot

Comprende cualquier ente robótico aislado o en conjunto, como las llamadas “ecologías altamente automatizadas y robotizadas”, incluyendo, pero no limitado a, robots humanoides, brazos industriales para

ensamblado, juguetes, estaciones de trenes, etc. Si cumple con la definición de robot y está en contacto con humanos durante su funcionamiento se puede abordar el enfoque de Experiencia del Usuario y las recomendaciones propuestas en este artículo.

5.1.2 Ambiente

Corresponde al espacio físico donde el robot se desempeña, considerando factores naturales como ventilación, humedad relativa, etc., y factores tecnológicos como conectividad y disposición de otros dispositivos que pudiesen compartir información con el robot.

5.1.3 Variable Experimental

En la interacción humano-robot, se debe considerar tanto la variable de interés como el campo de conocimiento del investigador y estar abierto a (de ser posible promover) la colaboración multidisciplinaria, pues la naturaleza del fenómeno es pertinente para la investigación ingenieril, estética, ergonómica, antropológica, entre otras.

5.1.4 Objetivo del experimento

El objetivo del experimento debe de establecerse conforme a las posibilidades técnicas y económicas disponibles para el investigador, buscando un balance entre el marco teórico y la capacidad de producción de prototipos con exactitud y precisión de nivel científico. Hay casos de investigaciones realizadas con robots comerciales [11], mientras que otros diseñan y fabrican un prototipo como bancada de pruebas [10].

5.1.5 Forma de Interacción

La interacción entre el humano y el robot queda definida, principalmente, por cómo se da la comunicación entre las partes, pudiendo ser a través de botones, gestos faciales (reconocimiento facial), comandos de voz (reconocimiento de voz), gestos corporales (Kinect Xbox®), por mencionar algunos. Asimismo, es necesario determinar la naturaleza de la interacción humano-robot por su índole o motivación, es decir, hay diferencia entre la dinámica de interacción entre un robot ensamblador y el obrero, y un juguete robot y el infante. Se puede dividir la naturaleza de la interacción en al menos tres: laboral, de asistencia y recreativa.

5.1.6 Información cualitativa

La información cualitativa es aquella que proporciona el usuario como evaluación de su interacción, en ella se pretende capturar información sobre la experiencia del usuario que permita mejorar el diseño, fabricación o comportamiento de los robots. La manera tradicional para obtener información cualitativa es por medio de cuestionarios escritos, aunque también puede ser adjudicada por un tercero (ya sea un dispositivo tecnológico capaz de reconocer gestos faciales y asignar

un valor a las expresiones del usuario mientras utiliza el robot, o por un evaluador humano que interprete las mismas expresiones faciales).

5.1.7 información cuantitativa

La información cuantitativa obtenida de la interacción humano-robot se genera mediante el sentido directo o indirecto del usuario, por medio de cualquier tipo de tecnología de sentido, desde presionar un botón, hasta la huella de calor que deja cualquier humano al tocar un objeto. Esta información tiene el potencial de representar una evaluación objetiva de la experiencia del usuario, que no dependa de la capacidad de comunicación del usuario o de la interpretación de un tercero.

5.1.8 Usuario

Hace referencia al usuario objetivo del robot, no a los usuarios colaterales (fabricantes, transportistas, técnicos, vendedores, etc.), por lo que es de utilidad determinar las características distintivas del perfil de personas que usarán el robot, tanto físicamente (talla, altura, peso, género, etc.) como psicológicamente (e.g. nivel de estudios y predisposición hacia la tecnología).

En la Tabla 1 se muestra un desglose de 9 artículos que involucran experimentos enfocados en la interacción entre humano y robot, con componentes cuantitativos y cualitativos de la interacción, así como los demás componentes.

5.2- Recomendaciones

A continuación se presentan seis recomendaciones para diseñar y llevar a cabo experimentos utilizando el concepto de experiencia del usuario:

1. Conocer los conceptos recurrentes.
2. Evaluar la forma de obtener la información cualitativa.
3. Elegir una variable indivisible.
4. Obtener información cuantitativa de la interacción.
5. Evaluar la correlación entre la información cuantitativa y la cualitativa, otorgando un grado de confianza.
6. Garantizar la integridad científica del experimento.

5.2.1 Recomendación 1: Conceptos recurrentes

Cualquier persona interesada en desarrollar investigación en el área de la interacción humano-robot, utilizando el concepto de Experiencia del usuario, debe estar consciente de los siguientes puntos:

- Los términos Experiencia del Usuario (UX) y Bienestar del Usuario (*User Well-being*) [41], no están claramente definidos. La norma internacional ISO 94210 [13] se enfoca en

establecer parámetros útiles para utilizar el concepto UX; sin embargo, esta norma define UX de manera general, sin aportar un concepto que permita su acotación o profundice en su entendimiento. De igual manera sucede con el bienestar del usuario (*User Well-being*), ambos conceptos son utilizados constantemente, pero se usan según convenga al autor con sus particularidades.

- Artículos donde se presentan cuestionarios existentes para UX en HRI [8, 9, 16, 52].
- De las implicaciones sociales de este tipo de investigaciones, tanto positivas (asistencia en el espacio de trabajo para adultos mayores y con discapacidades, disminución y prevención de lesiones, etc.), como negativas (cuantificar la productividad del trabajador puede llevar a desventajas sociales para adultos mayores y con discapacidades) [54, 55].
- Diferentes estudios establecen que la **confianza** que tiene el usuario para con el robot influye en la interacción, así como en la evaluación que da el usuario del robot y de la interacción misma [6].
- Al estar trabajando con robots que sensan, graban y se comunican con personas, es necesario afrontar las cuestiones legales en cuanto a protección de datos personales y seguridad digital, pues la percepción de **privacidad** es cuestión de preferencia personal, así como posiblemente de un marco legal local [28, 29, 30, 31].
- No asumir que los fenómenos encontrados en la investigación psicológica en la interacción humano-humano, aplican a la interacción humano-robot [34, 35].
- Conocer técnicas de prototipado rápido y estrategias de simulación tecnológica como la llamada "*Wizard of Oz*", que consiste en brindar cualidades complejas a un robot con ayuda humana sin tener que realizar el desarrollo tecnológico requerido para programar realmente al robot; por ejemplo, si se quiere hacer investigación con un robot por medio de comandos de voz, el robot puede contar con un *walkie-talkie* mientras un humano maneja el otro *walkie-talkie* (sin ser percibido por el usuario del robot), para fungir como el sistema de reconocimiento y generación de voz. Este tipo de técnicas sirve para focalizar los esfuerzos en el tema de interés y no en la elaboración de un prototipo de gran complejidad.

5.2.2 Recomendación 2: Evaluación de la forma de obtener la información cualitativa

Evaluar la funcionalidad de la **encuesta** utilizada para captar la opinión del público, preferiblemente realizando una prueba comparativa o estadística (e.g. Coeficiente Alfa de Cronbach), pues es necesario verificar que nuestra forma de medir la veracidad de nuestro experimento sea efectiva.

Cada planteamiento nuevo debe de ser probado, ya sea en la forma de interacción, vía de comunicación entre humano y robot o comportamiento del robot; esto no se debe ver como algo retrógrada o en contra de la comunidad científica, simplemente es un procedimiento estándar para garantizar (buscar) la máxima claridad en el proceso de experimentación; de igual manera que se hace al calibrar un instrumento de medición, se calibra el experimento mismo, en pos de la repetibilidad de los resultados de la investigación.

5.2.3 Recomendación 3: Elegir una variable indivisible

Al elegir una variable experimental se debe considerar que toda variable, por trivial que parezca, tiene nimias, estas particularidades de la variable experimental son subvariables y pueden ser seleccionadas como la variable de interés para evitar dudas en la correlación entre la variable medida y los resultados cualitativos. Por ejemplo, si se habla de la variable de iluminación, dependiendo el enfoque de la investigación, ésta puede ser una variable sencilla de estudiar, si se consideran únicamente los estados "encendido" y "apagado", en cambio, se puede atacar alguna de las subvariables: temperatura de la luz, frecuencia de la luz, patrón de dispersión y hasta la composición electroscópica.

Es importante determinar el interés del equipo de investigación y plasmarlo en el reporte de resultados, para tener seguridad de que la variable planteada fue responsable de los resultados. A su vez, elegir una variable referente a la adaptabilidad del robot hacia el usuario o cuestiones de gusto personal, pues hay métodos establecidos para estudiar variables de eficiencia energética o económica. Conforme se demuestre una correlación fuerte entre las subvariables se puede proceder a experimentar con variables complejas (que contienen múltiples subvariables), de tal forma que sea rastreable a la opinión del usuario.

5.2.4 Recomendación 4: Obtener información cuantitativa de la interacción

Obtener datos cuantitativos de la interacción. En la investigación de la interacción entre humano y robot es básico tener información medible, que facilite el análisis objetivo de la interacción y permita, a largo plazo, eliminar la medición cualitativa para fines de automatización en tecnologías adaptativas.

Tabla 1. Desglose de artículos con experimentos con la Experiencia del usuario respecto a los componentes generales propuestos

Robot	Ambiente	Variable	Objetivo	Interacción	Forma de evaluación (Cualitativo)	Sensado del usuario (Cuantitativo)	Usuario	Ref. Art.
Nao (humanoide)	Experimento controlado, al interior	Predisposición personal hacia los robots.	Correlacionar los gestos de las personas con la experiencia que reportan de manera escrita.	Tocar el robot con las manos.	Encuesta escrita	Un observador asigna la evaluación	18-45 años, académicos y estudiantes.	11
Brazo ensamblador	industrial	Velocidad del brazo	Determinar el perfil de velocidad más agradable para los humanos	Ensamblar productos en una línea industrial de manera colaborativa	Encuesta escrita	Se sensa la velocidad del brazo robot.	Trabajador industrial	27
Humanoide repartidor de dulces, CMAssist.	Edificio de universidad; pasillos y cubículos.	Diálogo y comportamiento.	Estudio a largo plazo de la interacción humano-robot	El robot pasea por los pasillos repartiendo bocadillos y dulces, entabla conversación con los usuarios.	Encuesta escrita.	Se grabó el audio de las conversaciones entre el robot y los usuarios.	Personas relacionadas a la academia.	53
Conjunto de puertas, elevadores y escaleras en estación de trenes	Estación de tren subterráneo	Características de viaje del usuario: con maleta, silla de ruedas, etc.	Crear una experiencia individualizada con respecto a las características del usuario en una implementación del mundo real.	Entrar a la estación y seguir la ruta asignada según las características del usuario.	Encuesta: Satisfecho o insatisfecho.	Cámaras de la estación y evaluación de un operador.	Sin información	26
Tenis instrumentado	Áreas verdes universidad.	Zonas de presión en la plantilla del tenis	Correlacionar la medición de presión en la plantilla con la evaluación de los usuarios.	Colocarse el tenis y correr en un circuito predeterminado.	Encuesta escrita	Sensores de presión dentro la plantilla del tenis.	18-45 estudiantes	10
ICub robot (humanoide)	Experimento controlado, al interior	Dirección de la mirada del usuario	Determinar qué es mejor: seguir la cabeza o seguir la mirada	Robot y usuario uno frente al otro, viendo sin tocar.	Encuesta escrita	Visual, a través de cámaras.	18-45 académicos y estudiantes	18
Nursebot Pearl	Experimento controlado, al interior	Apariencia y comportamiento del robot	Estudiar el impacto de la apariencia del robot durante la interacción entre humano y robot	Robot y usuario uno frente al otro, conversación social.	Encuesta escrita	Medición del tiempo que el usuario accede a las instrucciones del robot.	Promedio de edad 25 años	7
Humanoide, con pantalla.	Simulación de Cocina	Lingüística. Número de conectores lingüísticos utilizados durante la conversación	Determinar la manera más agradable para el usuario en la que un robot le debe dar indicaciones.	Usuario cocina mientras el robot está a un lado dando las instrucciones.	Encuesta escrita, estadística ANOVA.	Se toma video de la interacción y se cuenta el número de conectores lingüísticos utilizados por el robot y por el usuario.	Personas relacionadas a la academia.	#28
Busto humanoide vs laptop	Experimento controlado, al interior	Apariencia del robot y privacidad del usuario.	Determinar el impacto en la confianza que tiene el usuario con un robot con cuerpo comparado con el de una laptop, cuando se solicitan datos personales.	El usuario se coloca frente al robot o laptop para realizar una simulación de inscripción a una base de datos.	Encuesta escrita	Grabación de video y análisis de la información personal facilitada por el usuario a cualquiera de los sistemas.	-	29

5.2.5 Recomendación 5: Evaluar la correlación entre la información cuantitativa y cualitativa

Evaluar la veracidad de la **correlación** entre los datos cuantitativos obtenidos de la medición de la interacción entre el usuario y la máquina y la información cualitativa obtenida por medio de la encuesta de satisfacción, determinando un grado estadístico de confianza o dispersión de la muestra (e.g. Gráfica de diferencia significativa de Tukey o la Correlación de Pearson), y cumpliendo con los estándares y expectativas de precisión del grupo de investigación.

5.2.6 Recomendación 6: Garantizar la integridad científica del experimento

La principal responsabilidad de un grupo de investigación es generar un experimento que permita ser claramente medible, para favorecer su repetibilidad (que es cuando se genera el conocimiento científico). Para esto, es buena práctica establecer un experimento “Doble ciego” (*Double Blind Experiment*), para evitar el efecto placebo o el sesgo del investigador, pues al saber cuál es el grupo de control puede introducir ruido en los resultados. Se realiza el experimento de tal manera que los usuarios y los aplicadores no sepan a qué grupo pertenecen, esto se puede realizar si el robot determina de manera aleatoria el grupo de investigación en el que participará cada usuario, en vez de que sea una persona quien lo asigne.

Entre más subvariables se prueben experimentalmente, más información habrá sobre ese robot en específico, donde eventualmente se podrían aplicar técnicas de inteligencia artificial que se alimenten de múltiples eventos con múltiples variables y múltiples sujetos, cumpliendo con las características para utilizar el concepto de “*big data*”.

5.3- Ejemplo: Lámpara-robot

Descripción general del planteamiento experimental: Se pretende estudiar la interacción entre usuarios y objetos cotidianos robotizados no humanoide. Se propone una lámpara de mesa con la capacidad de modificar su altura, flujo luminoso y ángulo de proyección de luz.

Componentes generales:

1. Robot: Lámpara de mesa
2. Ambiente: Hogar
3. Variable: Altura de la lámpara (número de subdivisiones en la altura de la lámpara)
4. Objetivo: Determinar si existe un número de subdivisiones recurrente en el gusto de los usuarios o un rango preferido.
5. Interacción: El usuario apretará botones para subir o bajar la lámpara a su gusto, pero el número de subdivisiones será asignado de manera aleatoria por el sistema.

6. Info. Cualitativa: La encuesta es de una sola pregunta, “¿Cómo fue su experiencia?” y con respuesta cerrada de escala Likert con 5 puntos.
7. Info. Cuantitativa: La lámpara-robot almacena el número de veces que el usuario apretó los botones, así como la duración de cada apretón y la fuerza ejercida sobre el botón.
8. Perfil de usuario: 18-45 años de edad, personas relacionadas con la academia.

Después de aplicar las recomendaciones en el ejemplo de la Lámpara-robot (la recomendación 1 se da por hecho), el resto se presenta a continuación:

Rec2: Se establece un grupo de control donde la variable experimental (número de subdivisiones en la altura de la lámpara) permanece constante, y se calcula el coeficiente de consistencia Alfa de Cronbach, estableciendo un valor mínimo de 0.7 para considerar efectivo el método de obtención de información cualitativa.

Rec3: La variable elegida es la altura de la lámpara-robot, la subvariable es el número de divisiones que tendrá la lámpara-robot en el rango de movimiento. Se plantea comparar números de divisiones aleatorias contra valores arrojados de un algoritmo de aprendizaje de máquina y el grupo de control.

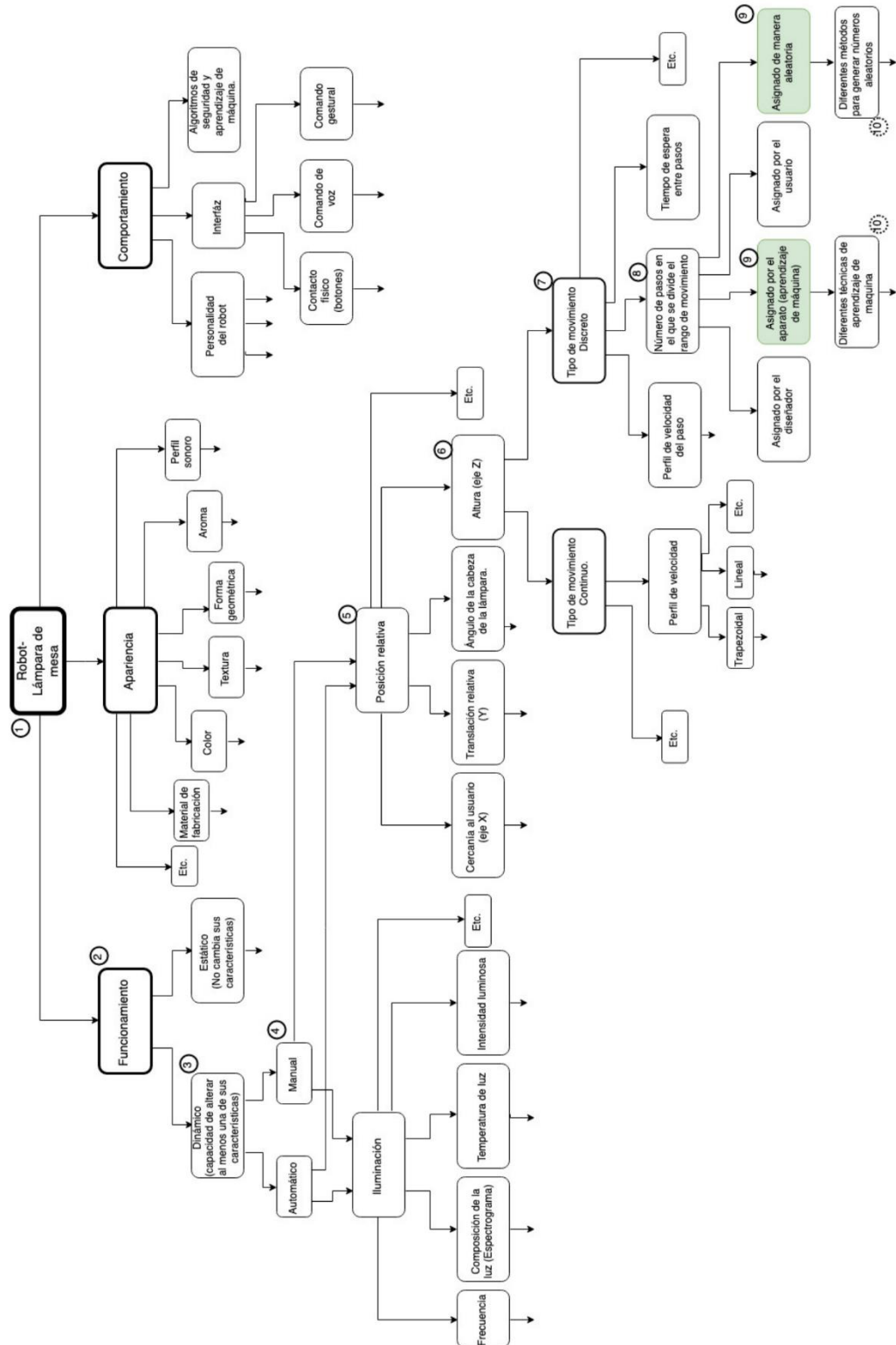
En la Figura 1 se muestra un ejemplo de ramificación de las características de una lámpara de mesa, denotando las múltiples características que pueden influenciar la opinión de un usuario, por lo que es necesario preponderar las variables y subvariables para reconocer posibles causas de ruido en nuestro experimento o falsa correlación al final del experimento.

En la Figura 1, las flechas que no tienen destino representan la posibilidad de aumentar el número de variables y subvariables.

Rec4: Medir la interacción del usuario con la lámpara-robot al apretar los botones “Subir” y “Bajar”; y correlacionarlos con una encuesta escrita “¿cómo fue la experiencia?”. La lámpara-robot almacenará la información de la interacción en forma de “número de apretones de cada botón”, “tiempo apretando botones”, “fuerza al apretar” y “posición de la cabeza de la lámpara (altura de la lámpara)”.

Rec5: Se tomó la decisión de poner como meta un valor en el coeficiente de correlación de Pearson de 0.5 en la correlación entre información cuantitativa y cualitativa.

Figura 1. Ejemplo de ramificación de las características de una lámpara de mesa. El número encerrado en un círculo representa la profundidad de la capa de subvariable. Se resaltan en verde las subvariables que serán parte del experimento, al ser comparadas (Aleatorio Vs Algoritmo de aprendizaje de máquina).



Rec6: Se eligió hacer el experimento con tres grupos en total, con asignación aleatoria de los sujetos de prueba por parte del robot, para producir un experimento doble ciego. Los grupos son:

- Grupo control: dentro de este grupo todos los usuarios se enfrentarán al mismo número de divisiones en la altura de la lámpara. Esto sirve para analizar la dispersión de la muestra y evaluar la veracidad del método de obtención de la información cualitativa.
- Grupo experimental 1: el número de divisiones que experimentará cada usuario será asignado de manera aleatoria entre 5 y 50 divisiones.
- Grupo experimental 2: Los usuarios de este grupo experimentarán con el número de divisiones que el algoritmo de inteligencia artificial les dé. El algoritmo intentará aprender de cada usuario para aproximarse a una solución óptima para el grupo poblacional con el que interactúe, tomando como realimentación la información cualitativa de los sujetos pasados.

Especificaciones técnicas del robot:

- Precisión e integridad de la señal de los botones: 0.0098 N/bit (1 gr/bit).
- Latencia máxima: 200 ms.
- Repetibilidad de la posición de lámpara: 1mm.
- Rango de movimiento: 0.5 m.
- Velocidad máxima de movimiento: 2 m/s.

6- Conclusiones y comentarios

La investigación en el área de interacción humano-robot, ha tomado interés debido a la tendencia de que los robots permearán todos los aspectos de la vida humana, desde el hogar hasta el trabajo, pasando por lo médico y el entretenimiento. Asimismo, el concepto de experiencia del usuario se muestra prometedor como herramienta para estudiar las necesidades del usuario, apuntando a cambiar las encuestas escritas de satisfacción y sustituirlas por el sensado del usuario para obtener información cuantitativa de la interacción.

Al ser un campo de investigación relativamente nuevo, no hay protocolos que hayan demostrado ser lo suficientemente robustos para establecerse en el medio científico. Es aquí donde este trabajo de investigación intenta aportar un grupo de recomendaciones para aquellos grupos que se disponen a experimentar en el área de la interacción entre humano y robot, nombrando los conceptos más recurrentes en la bibliografía y que son esenciales para abordar la investigación desde la experiencia del usuario.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y por la

Universidad Nacional Autónoma de México a través del proyecto DGAPA-PAPIIT-IT101718.

REFERENCIAS

- [1] Mortier, R., et al., 2015, "Human-Data Interaction: The human face of the Data-Driven society", SSRN Elec. J.
- [2] Campbell, A. T. et al., 2008, "The Rise of People-Centric Sensing", IEEE Internet Computing Vol.12, Issue 4. pp. 12-21.
- [3] Mortier, R., et al., 2016, "Human-Data Interaction", The encyclopedia of Human-Computer Interaction. Hershey PA: Idea Group Reference.
- [4] Bordegoni M, et al., 2013, "User Experience (UX) Upstream to Design: A Sensing Based Approach". ASME. IDETC-CIE.
- [5] Fokkinga, S.F., et al., 2014, "From Product to Effect: Towards a human-centered model of product impact." 6th DRS Conf.
- [6] Hancock, P. A., et al. 2011, "A Meta-Analysis of Factors Affecting Trust in Human-Robot Interaction.", Human Factors, Vol.53, No.5. pp. 517-527.
- [7] Goetz, J., et al., 2003, "Matching Robot Appearance and Behaviour to Tasks to Improve Human-Robot Cooperation". 12th IEEE RO-MAN, USA.
- [8] Laugwitz, B., et al., 2008, "Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire." USAB.
- [9] Weiss, A., et al., 2009, "The USUS Evaluation Framework for Human-Robot Interaction.", New Frontiers in HRI. pp. 89-110.
- [10] Ghosh, D, et al., 2017, "Cyber-Emphatic Design: A Data-Driven Framework for Product Design". ASME. J. Mech. Des.
- [11] Alenljung, B., et al., 2017, "User experience of conveying emotions by touch," 26th IEEE RO-MAN.
- [12] Petruck H., et al., 2016, "Increasing Safety in Human-Robot Collaboration by Using Anthropomorphic Speed Profiles of Robot Movements.", Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 490. Springer.
- [13] ISO 9241-210, 2010, "Human Centred Design for interactive systems", Ergonomics of human-system interaction, Part 210.
- [14] Hassenzahl, Marc., 2008. "User experience (UX): Towards an experiential perspective on product quality." ACM Ser. 339.
- [15] Tonkin, M., et al., 2018. "Design Methodology for the UX of HRI: A Field Study of a Commercial Social Robot at an Airport.", HRI'18, USA.
- [16] Everett, Y. J., et al., 2011. "Evaluating Human-Robot Interaction - Focusing on the Holistic Interaction Experience.". Social Robotics. 3. pp. 53-67.
- [17] Alenljung, B., et al., 2017. "User Experience in Social Human-Robot Interaction.", IJACI. Vol.8. pp.12-31.
- [18] Palinko, O., et al., 2016, "Robot reading human gaze: Why eye tracking is better than head tracking for

- human-robot collaboration," IEEE/RSJ IROS, pp. 5048-5054.
- [19] Mollahosseini, A., Chan, D. and Mahoor, M.H., 2016, "Going deeper in facial expression recognition using deep neural networks.", IEEE (WACV), USA. pp. 1-10.
- [20] Deuse, J., et al., 2016, "A Customizable Digital Human Model for Assembly System Design.", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 490. Springer.
- [21] Konstan, J. and Riedl, J., 2012. "Recommender systems: From algorithms to user experience.", *UMUAI* vol. 22. pp. 101-123.
- [22] Forlizzi, J. & Ford, S., 2000, "The Building Blocks of Experience: An Early Framework for Interaction Designers.", *Designing Interactive Systems (DIS)*. pp. 419-423.
- [23] Forlizzi, J. & Battarbee, K. 2004. "Understanding experience in interactive systems.", *DIS*. pp. 261-268.
- [24] Sasabuchi, K., Ikeuchi, K. & Inaba, M. 2018. "Agreeing to Interact: Understanding Interaction as Human-Robot Goal Conflicts.", *HRI'18*. pp. 21-28.
- [25] Moon, A., et al., 2014, "Meet Me where I'm Gazing: How Shared Attention Gaze Affects Human-Robot Handover Timing.", *HRI'14*. pp. 334-341.
- [26] Xu, Q., Zhou, F. and Jiao, J., 2011. "Affective-Cognitive Modeling for User Experience With Modular Colored Fuzzy Petri Nets.", *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*
- [27] Bonin, D., et al., 2016. "Digital Assessment of Anthropometric and Kinematic Parameters for the Individualization of Direct Human-Robot Collaborations.", *3DBODY.TECH*, pp.171-181.
- [28] Vitale, J., et al., 2018, "Privacy by Design in Machine Learning Data Collection: A User Experience Experimentation", *AAAI Symposium on Designing the User Experience of Machine Learning Systems*. Pp. 439-442.
- [29] Tonkin M. et al., 2017, "Embodiment, Privacy and Social Robots: May I Remember You?", *Social Robotics. ICSR*.
- [30] Krol, K., et al., 2016, "Towards robust experimental design for user studies in security and privacy.", *LASER*.
- [31] Vitale, J., et al., 2018, "Be More Transparent and Users Will Like You: A Robot Privacy and User Experience Design Experiment." *HRI'18*.
- [32] Kanade, Takeo. 1973, "Picture Processing System by Computer Complex and Recognition of Human Faces", *Doctoral Dissertation, Kyoto University. Japan*.
- [33] Amos, B., et al., "OpenFace: A general-purpose face recognition library with mobile applications."
- [34] Aarts, A., et al., 2015, "Estimating the Reproducibility of Psychological Science.", *Science*. Vol. 349.
- [35] Irfan, B., et al., 2018, "Social Psychology and Human-Robot Interaction: An Uneasy Marriage." *HRI'18*.
- [36] Shotton, J., et al., 2011, "Real-time human pose recognition in parts from single depth images," *CVPR*.
- [37] Hassenzahl, M., Tractinsky, N., 2006, "User experience- a research agenda." *Behaviour & IT* 25.
- [38] Haddadin, S., et al., 2007, "Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing." *Robotics: Science and Systems*.
- [39] Thomas, C., et al., 2016, "Intuitive Work Assistance by Reciprocal Human-robot Interaction in the Subject Area of Direct Human-robot Collaboration.", *CIRP*. 44. 275-280.
- [40] Karabegović, I., Doleček, V., 2017, "The Role of Service Robots and Robotic Systems in the Treatment of Patients in Medical Institutions.", *Advanced Technologies, Systems, and Applications*. Vol 3. Springer, Cham.
- [41] Nelles, J., et al., 2019, "Evaluation Metrics Regarding Human Well-Being and System Performance in Human-Robot Interaction – A Literature Review.", *20th Cong. IEA*. Vol. 825.
- [42] Definition: Well-Being. Accessed February 2019. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/well-be>
- [43] Marche, C., et al., 2017, "Energy efficiency in smart building: A comfort aware approach based on Social Internet of Things.", *Global Internet of Things Summit*.
- [44] Wei, Z., et al., 2018, "Thermal Comfort Modeling for Smart Buildings: A Fine-Grained Deep Learning Approach.", *IEEE Internet of Things Journal*.
- [45] Fosch Villaronga, E. & Albo Canals, J., 2018. "Implications of the Google's US 8,996,429 B1 Patent in Cloud Robotics-Based Therapeutic Researches." *Service Robots, Intech*.
- [46] De Santis, A., et al., 2008. "An atlas of physical human-robot interaction." *J. Mech. Mach. Theory*. V.43.
- [47] Bajcsy, A., et al., 2017, "Learning Robot Objectives from Physical Human Interaction.", *CoRL*.
- [48] De Luca, A. and Flacco, F., 2012, "Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration," *IEEE RAS & EMBS (BioRob)*, pp. 288-295
- [49] Lin, H., et al., 2017, "Real-time collision avoidance algorithm on industrial manipulators," *IEEE (CCTA)*.
- [50] Girardin, F. and Lathia, N., 2017, "When User Experience Designers Partner with Data Scientists", *AAAI Spring Symposium on Designing the User Experience of Machine Learning Systems*.
- [51] Baxter, P., et al., 2016, "From characterising three years of HRI to methodology and reporting recommendations," *HRI'16*.
- [52] Lindblom, J., Andreasson, R., 2016, "Current Challenges for UX Evaluation of Human-Robot Interaction.", *Advances in Ergonomics of Manufacturing*, vol 490. Springer, Cham.
- [53] Lee, M.K., et al., 2009, "The Snackbot: Documenting the design of a robot for long-term Human-Robot Interaction." *HRI'09*, pp. 7-14.
- [54] Bommann, Lutz., 2013, "What is social impact of research and how can it be assessed? A literature survey.", *JASIST*. Vol. 64
- [55] Roeser, S., 2010, "Emotional Engineers: Toward Morally Responsible Design.", *Science and engineering ethics*. Vol.18

Apéndice J: Artículo SOMIM 2020

Esta página se deja en blanco intencionalmente para respetar el formato original del artículo:

“Diseño y fabricación de banco de pruebas robotizado para la automatización de experimentos en el área de la interacción entre humano y robot.”

Que tiene por autores:

Carlos G. Gomez-Monroy, Vicente Borja,
María del Pilar Corona-Lira, y Alejandro Ramirez-Reivich.

Publicado en las MEMORIAS DEL XXVI CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
21 AL 23 DE OCTUBRE DE 2020 MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO.

A continuación, dicho artículo.

Tema A1a: Diseño Mecánico.

“Diseño y fabricación de banco de pruebas robotizado para la automatización de experimentos en el área de la interacción entre humano y robot.”

Carlos G. Gómez-Monroy, Vicente Borja, María del Pilar Corona-Lira,
Alejandro C. Ramírez-Reivich.*

Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Conjunto Sur, Facultad de Ingeniería. Edificio X, Centro de Ingeniería Avanzada, Ciudad Universitaria, CDMX, México, C.P. 04510.

* Autor contacto: gilbertogomo@gmail.com

RESUMEN

Hay un aumento de robots en los diversos ámbitos de la vida humana, por lo que la interacción entre humano y robots es objeto de estudio. A partir del reconocimiento del valor ingenieril de la evaluación cualitativa del usuario hacia la interacción, se diseñó un experimento para correlacionar la información cuantitativa adquirida por el robot durante cada prueba, con la evaluación cualitativa de cada usuario (encuesta escrita). En este artículo se presenta el diseño y fabricación de un banco de pruebas robotizado, en forma de lámpara de mesa con 5 grados de libertad, capaz de variar sus características experimentales aleatoria y automáticamente entre participantes, a la vez que almacena información del ambiente (5 variables), del usuario (4 variables) y de sí mismo (9 variables). Se reporta la resolución de control por variable y su tolerancia como relación entre la incertidumbre y su rango funcional.

Palabras Clave: Diseño experimental, Interface humano-robot, Sensado de usuario en tiempo real.

ABSTRACT

Robots have increased their presence in human environments, so that the interaction between human and robot is an ongoing research topic. Starting from the acknowledgment of the engineering value of user's qualitative evaluation of their own interaction, the experiment was designed to correlate the quantitative data measured by the robot with the qualitative evaluation of the user (written survey). This paper presents the design and fabrication of a robotized testing bench, in a desk lamp format with 5 degrees of freedom, capable of modifying its experimental characteristics in a random and automatic way, while retrieving data from the environment (5 variables), the user (4 variables) and the robot itself (9 variables). Control resolution and its tolerance are reported per variable as a ratio between uncertainty and its functional range.

Keywords: Human-robot interface, Real-time sensing, Parallel processing, Experimental design.

1- Introducción

Cada vez hay más aparatos robotizados o automatizados a nuestro alrededor, trabajando de manera independiente o en colaboración con humanos u otros robots [18, 19, 20, 21, 27, 32, 33, 36, 39, 40, 43, 44, 53]. Los robots han incrementado su presencia en los diferentes ámbitos de la vida humana, a tal grado que se habla de ecologías altamente robotizadas y automatizadas [42], donde la persona interactúa con múltiples dispositivos, ya sea que estén o no vinculados entre sí. Éstas nuevas tecnologías y ambientes conllevan una gran generación de información derivada de la interacción entre el usuario y los dispositivos [3, 46, 47, 48, 49] donde se forman gigantescas bases de datos que pueden ser utilizadas por algoritmos de aprendizaje de máquina [50, 5, 6, 13, 24, 25, 26, 31, 41, 45, 55].

El actual trabajo presenta el diseño y manufactura de una bancada de pruebas que emula un ambiente robotizado y automatizado para realizar pruebas con

usuarios. La bancada de pruebas cambia sus características automáticamente entre los 72 estados experimentales programados y los presentará de manera aleatoria a los participantes hasta completar 5 personas por estado experimental. Las 360 pruebas se realizan en 30 días, durante los cuales el banco de pruebas guardará registro de las características del ambiente, del usuario y de sí mismo, mientras llevará control de las pruebas realizadas, así como de las restantes para concluir el experimento.

2- Antecedentes

Actualmente, en los estudios sobre la interacción entre humano y robot prevalecen dos corrientes de evaluación de la interacción: la evaluación cualitativa de la experiencia del usuario donde generalmente se aplica una encuesta escrita al participante [8, 9] y la evaluación cuantitativa de variables medibles durante la interacción

mediante el sensado del usuario a lo largo de la interacción [15, 16, 17, 22, 23, 28, 30, 34, 35, 37, 51, 52, 54].

En la implementación experimental se diferencian cuatro estrategias: la primera es el uso de plataformas robóticas comerciales con características antropomorfas como Nao [11]; la segunda consiste en plataformas robóticas comerciales de uso específico como un brazo robot con tenaza [1, 2, 4]; la tercera es el uso de plataformas robóticas simuladas (es decir, con asistencia humana) o dispositivos no robóticos instrumentados con sensores para medir al usuario durante el uso del dispositivo [12]; finalmente, la cuarta es la virtualización de espacios de trabajo y simulación de riesgo, que permite simular a los usuarios en un espacio de trabajo virtual 3D, donde se estudian las posturas requeridas para llevar a cabo el trabajo asignado y evaluar las implicaciones en la salud del trabajador a corto y largo plazo [12, 38, 48, 49].

La naturaleza multivariable de la interacción entre humano y robot conlleva una amplia diversidad de experimentos con diferentes tipos de robots, como un robot humanoide que por cabeza lleva una tableta electrónica y trabaja de asistente en un aeropuerto con el objetivo de estudiar la susceptibilidad del público a dar sus datos personales [29]. Otro ejemplo es el estudio realizado por Alenljung et al. [11], cuyo objetivo fue analizar la respuesta emocional de una persona hacia un robot Nao, simplemente al sujetarlo entre sus manos. Como ejemplo de dispositivos no robóticos, se instrumentaron tenis con múltiples sensores de presiones en la plantilla para comparar el perfil de presión con la opinión de los usuarios respecto al calzado, los autores de este estudio llaman a su metodología “Diseño Ciberempático” [10].

El banco de pruebas que se describe en este artículo se diseñó e instrumentó a la medida del planteamiento experimental para investigar la interacción entre humano y robot en espacios automatizados. El banco de pruebas multivariable (18 variables) en formato de lámpara de mesa, registra información del ambiente, del usuario y de sí mismo simultáneamente durante la prueba. De igual manera, el banco de pruebas controla dos luminarias del habitáculo, las cuales presentan una rutina de encendido y apagado durante las pruebas para motivar la interacción del usuario con el robot lámpara de mesa, por medio de la interfaz y conforme a su gusto personal.

En este trabajo se detalla el diseño y la fabricación de la bancada de pruebas, así como la resolución de control y el rango de error por variable del robot.

3- Objetivo

El objetivo de este artículo es describir el diseño y fabricación del banco de pruebas multivariable (18 variables) y robotizado (5 grados de libertad) para la investigación de la interacción entre humano y robot,

desarrollada para realizar experimentos con usuarios de manera automatizada. El banco de pruebas cambia entre estados experimentales conforme pasan los participantes, sin requerir asistencia humana para definir el inicio o fin de cada prueba, ni para asignar las condiciones de la siguiente aleatoriamente. La bancada de pruebas guarda información del ambiente (iluminación, hora, fecha, temperatura y humedad), del usuario (mediante la instrumentación de botones de la interfaz: fuerza y frecuencia) y de la bancada misma (variables de estado del robot); y presenta la resolución de control y error en cada uno de los grados de libertad de la bancada de pruebas.

4- Metodología

En este artículo se presenta el panorama actual en la investigación sobre la interacción entre humano y robot; donde se distinguen 4 corrientes de bancos de pruebas implementados para la experimentación en dicha área. Se plantea un experimento automatizado por medio de un banco de pruebas robótico multivariable que guarde información del ambiente, del usuario y de sí mismo durante cada prueba, capaz de cambiar entre 72 estados experimentales aleatoriamente entre cada usuario. Se describe el diseño y fabricación del banco de pruebas, se reportan las tolerancias obtenidas en cada una de las variables de interés, así como la forma en la que fueron medidas.

A continuación, se desglosa el proceso de diseño y manufactura conforme se presenta en este artículo:

- A. Requerimientos de la bancada de pruebas
 - a. Descripción del planteamiento general.
 - b. Los 8 componentes del planteamiento experimental dentro de la interacción humano-robot.
 - c. Los 3 actores de la interacción: ambiente, usuario y robot.
 - d. Las 5 secciones de la interacción: pre, inicio, durante, fin y post.
- B. Planteamiento experimental
 - a. Presupuesto y recursos disponibles.
 - b. Especificaciones.
 - c. Descripción del formato de experimento
- C. Descripción de solución final: 6 módulos
 - a. Procesamiento.
 - b. Chasis.
 - c. Interfaz.
 - d. Control de iluminación en habitáculo.
 - e. Cabezal de luminaria.
 - f. Fuente de poder.
- D. Cálculo de resolución de control y error de cada una de las variables en el banco de pruebas
 - a. Altura (1 experimento)
 - b. Flujo luminoso (5 experimentos)
 - c. Ángulo de cabezal

- d. Sensado de usuario

A.- Requerimientos para la bancada de pruebas.

Los requerimientos para la bancada de pruebas son:

- a) Alta precisión de los datos generados durante las pruebas.
- b) Control y repetibilidad de los estados experimentales de la bancada.
- c) Mínima asistencia humana en el experimento.
- d) Experimento doble ciego.
- e) Control de múltiples variables de la bancada de pruebas y del habitáculo.
- f) Sensado del usuario y el ambiente.
- g) Transparencia en la adquisición de información.

A.a. Descripción general del planteamiento experimental

El objetivo del experimento es estudiar la posible correlación entre la información cuantitativa generada y almacenada por el banco de pruebas durante el experimento y la evaluación cualitativa del usuario respecto a su experiencia por medio de una encuesta de satisfacción escrita. El dispositivo robótico guarda la información de la interacción del usuario con la interfaz, en un ambiente automatizado. En este caso, se eligió una lámpara de mesa como dispositivo robótico con cinco grados de libertad: tres grados de libertad están en el cabezal de la luminaria (altura, ángulo de cabezal y flujo luminoso); uno más es la sensibilidad de la interfaz, equipada con botones sensibles a la fuerza; y el quinto grado de libertad es el control de la iluminación del habitáculo donde se realizan las pruebas, donde se contemplan dos luminarias controladas por la misma bancada de pruebas.

A.b. Los 8 componentes del planteamiento experimental para la interacción humano-robot.

Se establecieron los 8 componentes que describen la experimentación en la investigación de la interacción entre humano y robot, presentados en un artículo anterior [14].

- 1- **Robot:** Lámpara de mesa con 5 grados de libertad.
- 2- **Ambiente:** Hogar, ambiente automatizado (2 luminarias controladas independientemente).
- 3- **Variables del robot:** Altura de luminaria (500 mm), ángulo del cabezal de la luminaria (120°) y flujo luminoso (1000 luxes).
- 4- **Objetivo del experimento:** Registrar la interacción del usuario mientras utiliza el robot a través de la interfaz; al tiempo que guarda información sobre el ambiente, el usuario y el robot.

- 5- **Forma de interacción:** Interfaz física (4 variables: 2 botones sensibles a la fuerza (1gr sensibilidad y rango de 1200gr) y 2 interruptores).

- 6- **Forma de capturar la opinión del usuario (cualitativo):** Encuesta de satisfacción escrita [no se presenta en este artículo].

- 7- **Forma de medir al usuario (cuantitativo):** Fuerza y frecuencia de presión de botones en la interfaz.

- 8- **Usuario (perfil de usuario):** Alumnos de licenciatura y posgrado entre 18 y 40 años.

A.c. Los 3 actores de la interacción: ambiente, usuario y robot.

Durante cualquier interacción entre humano y robot, el ambiente donde ocurre la interacción tiene influencia en la interacción; éste tiene efectos independientes sobre el robot y el humano, por lo que es relevante tener información sobre las características ambientales específicas al momento de realizar las pruebas, además de la información sobre el usuario y el robot.

Es relevante comparar la correlación entre características ambientales y las evaluaciones cualitativas de los usuarios, con la correlación entre las características del robot y las mismas evaluaciones cualitativas de los usuarios como método de autoevaluación del experimento.

A.d. Las 5 secciones de la interacción: pre, inicio, durante, fin y post.

La interacción entre humano y robot es efímera, su existencia consta de 5 secciones delimitadas por características técnicas del robot, como la capacidad sensorial y particularidades del ambiente y usuario. Dichas secciones son: **previo** a la interacción, **inicio** de la interacción, **durante** uso del robot, **fin** de la interacción y **posterior** a la interacción. En otras palabras: “pre” es antes de que el usuario perciba al robot (estado inicial del robot en el que lo encontrará el usuario); el “inicio” es la acción deliberada del usuario de entablar interacción con el robot (por ejemplo, encender el robot); “durante” representa el cuerpo de la interacción, el usuario expresa su intención de ajustar las características del robot por medio de la interfaz y conforme a su gusto personal; el “fin” se marca por la acción deliberada del usuario de concluir la interacción con el robot (por ejemplo, apagar el robot); y “post” representa el estado final del robot (como una rutina de despedida; por ejemplo, algunos automóviles mantienen sus faros prendidos durante un intervalo de tiempo después de apagar el automóvil para iluminar el camino del usuario).

B. Planteamiento experimental.

El banco de pruebas se realiza en el marco de la investigación doctoral de uno de los autores, misma que se enfoca en estudiar la interacción entre humano y robot.

B.a. Presupuesto y recursos disponibles

Se ha estimado un presupuesto de \$10,000 MXN por semestre, durante 4 semestres. Y para la manufactura se dispuso de: taladro de banco, taladro de mano, soldadora multiproceso, esmeril de mano con discos multipropósitos de 4.5 pulgadas, caudín para soldadura de circuitos integrados, osciloscopio digital y multímetro.

El tiempo de desarrollo del proyecto, incluida la manufactura del banco de pruebas, es de 1000 horas.

B.b. Especificaciones

Las especificaciones para el banco de pruebas están orientadas a la precisión mecánica y electrónica del banco de pruebas y a la repetibilidad entre estados experimentales.

A continuación, se enlistan las especificaciones principales para la fabricación del banco de pruebas robotizado:

- Tolerancia de 0.5% de error por variable controlada o sensada.
- Resolución de control por variable de 0.1% sobre su rango de funcionamiento.
- Latencia máxima 50 ms.
- Longitud máxima de cable para transferencia de información analógicamente 10cm. Se requieren protocolos de comunicación digital para distancias mayores a 10 cm.
- Velocidad de muestreo del usuario 20 mps.
- 5 grados de libertad.
- Generar y guardar 18 variables por muestreo: 4 usuario, 7 ambiente, 5 robot y 2 experimento.
- Control de lazo cerrado.
- El control de variables de robot, el sensado del usuario y el ambiente, no deben influir en el almacenamiento de información.
- Se requiere tener control sobre la iluminación del habitáculo donde se realice el experimento, al menos dos luminarias (prendido y apagado).
- Se requiere automatización del experimento: los estados a comparar deben ser seleccionados al inicio de cada prueba por el robot, sin intervención de una persona. Se probarán 72 estados en grupos de 5 personas, las 360 personas involucradas en el experimento deben de probar uno de los 72 estados posibles de manera aleatoria.

B.c. Descripción del formato del experimento

El lugar de experimentación es un habitáculo con únicamente dos fuentes de luz (luminarias controladas por el banco de pruebas), la lámpara robotizada sobre una mesa, frente a una silla.

El usuario entra al habitáculo, se sienta frente a la mesa y comienza a leer las instrucciones del experimento, donde se incluyen: las instrucciones para usar la lámpara robotizada y ajustar la altura, flujo luminoso y ángulo del cabezal según su gusto personal; así como una breve lectura de comprensión con el fin de crear la actividad de uso común que corresponde a una lámpara de mesa. La iluminación del habitáculo cambia durante la prueba para estudiar si el usuario modifica las características de la lámpara para adaptarse a la iluminación ambiental. El inicio de la interacción lo marca el usuario al apretar el botón de encendido de la lámpara robotizada, y finaliza cuando el usuario vuelve a apretar ese botón. La evaluación cualitativa (encuesta) se realiza durante el uso de la lámpara robotizada al incluirse después de las preguntas relacionadas a la lectura de comprensión y antes de llegar a la instrucción de apagar el robot.

Se definió hacer un experimento factorial completo de 72 estados experimentales, con formato 3x3x4x2; 3 estados de comportamiento: manual, asistido y automático; 3 niveles de sensibilidad en la interfaz: 1 N, 2.5N y 8N; 4 opciones de subdivisión de la altura: 3, 9, 27 y 81 niveles; 2 modalidades de interacción: continuo (al dejar apretado un botón, el robot repite la instrucción) y discreto (es necesario presionar y soltar el botón para que el robot repita la instrucción). Se requieren 5 personas por cada estado experimental, resultando en 360 pruebas.

Cada sección de la interacción debe de ser programada, tanto para el ambiente como para la lámpara robótica. Que una sección sea constante en el experimento, quiere decir que el estado inicial y rutina programada en esa sección se repiten en todas las pruebas del experimento. Ver Tabla 1.

Tabla 1 Ubicación de los estados experimentales dentro de las 5 secciones de la interacción.

	Pre	Inicio	Durante	Fin	Post
Ambiente	Const.	Const.	Constante	Const.	Const.
Robot	Const.	Const.	3x3x4x2= 72 estados experimentales	Const.	Const.

C. Descripción de solución final: 6 módulos

El banco de pruebas es una lámpara de mesa robotizada, constituida por 6 módulos: a) procesamiento de información, b) chasis, c) interfaz, d) control iluminación ambiental, e) cabezal de iluminación y f) fuente de poder. En la Figura 1 se muestra una fotografía del banco de pruebas, y en la Figura 2, un diagrama organizacional de los componentes por módulo.

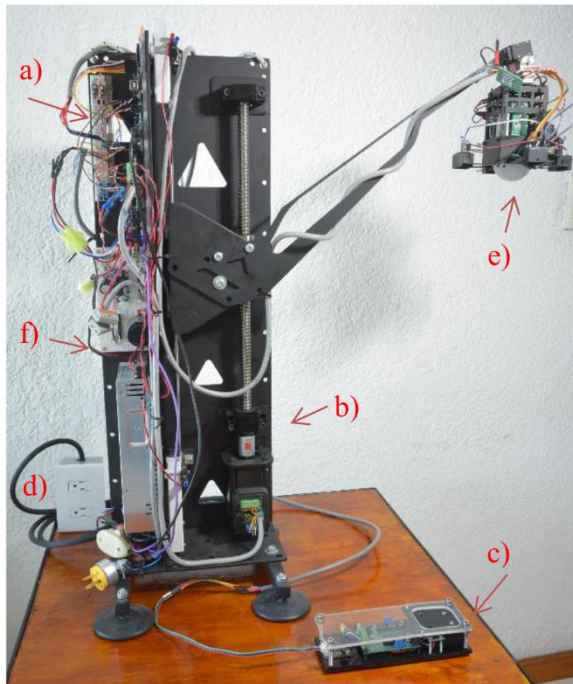


Figura 1. Banco de pruebas para automatización de experimento de interacción entre humano y robot en un ambiente controlado. Se muestra la disposición de los 6 módulos.

C.a. Procesamiento

Se diseñó el robot de manera modular, implementando 4 microcontroladores Arduino (2 Uno y 2 Mega) para controlar las variables en paralelo, y así tener la capacidad de reproducir movimientos en múltiples variables a la vez, mientras se genera y guarda la información de la prueba simultánea e ininterrumpidamente.

Con el fin de preservar la integridad de la información generada durante el experimento, se utilizan protocolos de comunicación digital *i2c* y *MOSI* entre procesadores, dispositivos y módulos.

En el módulo de procesamiento se incluyen los mini-módulos comerciales: módulo de tiempo real (*i2c*), módulo de memoria externa para tarjeta SD (*MOSI*), módulo de temperatura y humedad ambiental (*i2c*), módulo de 4 relevadores para 120v AC.

La información generada y guardada durante el experimento consiste en 18 variables, a 20 muestras por segundo con una resolución por variable mayor a 0.1% sobre el rango de la variable y con una tolerancia entre 0.5% y 1%, con latencia menor a 50 ms.

El procesamiento de los estados experimentales y el control de las pruebas durante las 360 pruebas se realiza en un procesador Arduino Mega, dedicado únicamente a este fin, con el propósito de aislar el control del funcionamiento del robot de la automatización del experimento.

C.b. Chasis.

El chasis contempla la estructura metálica que da cuerpo a la lámpara robot, donde se alojan o conectan el resto de los módulos del banco de pruebas. Además, se considera parte del actuador lineal responsable de la altura del cabezal.

Está diseñado con base en placa de acero al carbón (espesor 4.7mm), formado por 3 piezas provistas de pestañas y orificios que permiten embonar las piezas a modo de rompecabezas en tres dimensiones, lo que facilita el encuadre y soldadura, y promueve la integridad estructural ante la deformación. Se modeló en *Fusion 360*®, se mandó a cortar con chorro de agua (proveedor externo) y se soldó con proceso TIG para minimizar la deformación por efectos térmicos.

El actuador lineal está conformado por tornillo sinfín para bolas (carrera 50cm, paso 5mm) y riel de soporte con rodamientos, acoplado a un motor a pasos con decodificador NEMA 23 (1600 micro pasos por revolución, torque 2Nm).

Las dimensiones generales del chasis (sin contar brazo de cabezal) son 25x13x70 cm.

C.c. Interfaz

El módulo de la interfaz se instrumentó con dos sensores de fuerza FSG15 Honeywell® de alta precisión y repetibilidad, cada uno conectado a un amplificador de instrumentación de alta precisión, *low drift* y ganancia ajustable ($G=66.5$), que desemboca en un convertidor analógico digital de 4 canales a 16 bits que transmite la información por protocolo *i2c*. Los otros dos canales del convertidor tienen conectados interruptores sencillos de tipo *pushbutton* para completar 4 botones en la interfaz.

Se fabricó el amplificador de instrumentación, en lugar de utilizar uno comercial, para tener transparencia y control en cada paso de la adquisición de información.

Se detalla adquisición de información en el Anexo 1.

El tamaño de la interfaz es 18x6.5x3.5 cm.

C.d. Control iluminación habitáculo

Es una caja de tomacorrientes para exteriores con dos entradas estándar a 120 volts AC, controladas independientemente por relevadores acoplados a un Arduino en el módulo de procesamiento. Al utilizar tomacorrientes convencionales, se puede instalar el banco de pruebas en cualquier habitáculo y controlar dos luminarias.

C.e. Cabezal de iluminación.

El cabezal de la lámpara tiene diseño modular, consta de 3 luminarias LED para el control burdo del flujo luminoso, un mecanismo de persianas para el control fino del flujo luminoso accionado por motor servo

Futaba3003, difusor esférico, 4 sensores de luz y un motor servo que controla el ángulo del cabezal.

El chasis del cabezal y mecanismo de persianas se fabricó a partir de lámina negra (1mm de espesor); se realizó el CAD, las piezas se cortaron con láser (proveedor externo), se realizaron dobles y soldadura TIG.

Un disipador de aluminio une el chasis del cabezal con las 3 luminarias LED de 15 W alimentados a 120V AC, extraídos de focos convencionales Phillips® (5600 K, uso doméstico). Las 3 luminarias están conectadas a dos relevadores controlados independientemente; un módulo LED a un relevador y los otros dos comparten el segundo relevador. De esta manera se tienen 4 estados de iluminación: Bajo (1 módulo prendido), Medio (2 módulos prendidos), Alto (3 módulos prendidos) y apagado (ningún módulo prendido). Uno de los difusores extraído de los focos LED se implementó como difusor del cabezal.

C.f. Fuente de poder.

El banco de pruebas utiliza 4 voltajes en su operación, en los cuales es imperante tener estabilidad en su valor inde-

pendientemente de la carga instantánea en el sistema, pues cualquier variación en la alimentación de los circuitos altera la información recolectada.

Para diseñar/seleccionar la fuente de energía se consideró el precio (económico), tamaño (compacto) y potencia (mínimo 300W). Se utilizó una fuente de poder conmutada con 36V DC a 8A, reducción de voltaje con convertidor *Buck* a 6.5V DC a 3A, regulación de voltaje lineal a 5V DC a 1A, filtrado independiente por etapa con capacitores contra ruido por rectificado de corriente y picos en la demanda.

D. Cálculo de error (tolerancia) por variable.

Para conocer la precisión de las variables de control se realizaron tanto mediciones directas como experimentos de precisión y repetibilidad. A continuación, se detalla el procedimiento correspondiente.

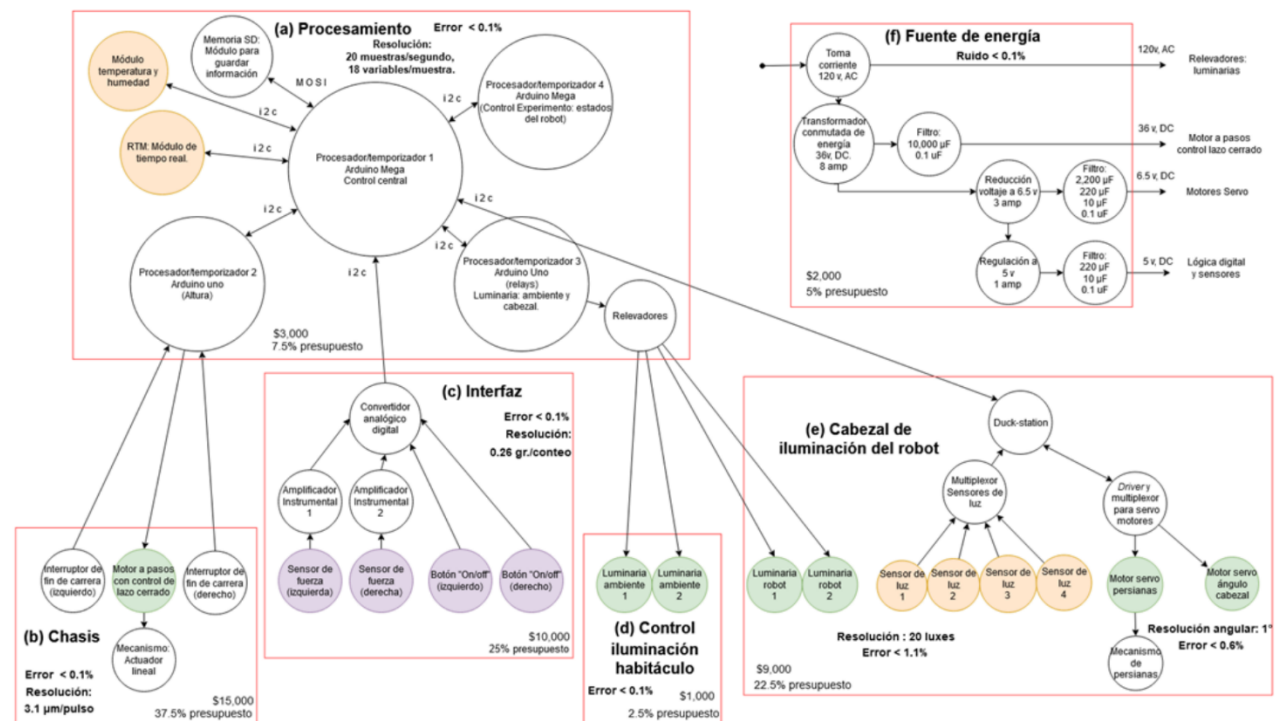


Figura 2. Diagrama organizacional del banco de pruebas robotizado por módulo funcional. Las unidades en color representan las variables a guardar del experimento, entre los tres actores de la interacción: usuario (morado), robot (verde) y ambiente (naranja).

D.a Altura

Resolución 3.1 $\mu\text{m}/\text{paso}$, y error $< 0.1\%$ con rango de 500 mm. A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico de la repetibilidad en el actuador lineal, ver Figura 3.

Experimento: Se acopló un motor a pasos con control de lazo cerrado NEMA23 a un tornillo sinfín con carrera 500mm y paso 5mm/rev. Se hizo el conteo de micropasos entre los interruptores de límite de recorrido (en el caso ideal siempre debería de ser el mismo número de pasos), se realizó el análisis estadístico de 12 muestras de la Tabla 2. No se midió directamente si se pierde paso o no, solo se conoce el error general del arreglo que conforma el actuador lineal.

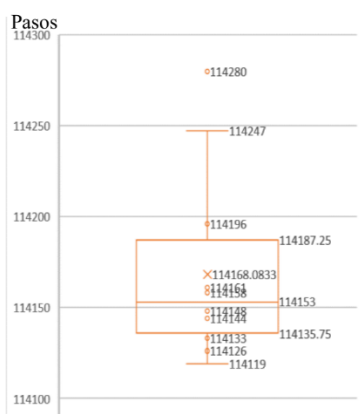


Figura 3. Diagrama de caja de los 12 conteos tomados como muestra experimental.

Tabla 2. Estadística descriptiva para 12 muestras (conteo de número de pasos en el actuador lineal).

Media	114,168.1
Error estándar	14.2
Mediana	114,153
Moda	114,144
Desviación estándar	49.2
Varianza de la muestra	2428.0
Curtosis	1.5
Sesgo	1.4
Rango	161
Conteo	12
Mayor	114,280
Menor	114,119
Nivel de conf. (95.0%)	31.3

La rutina inicial de calibración de la altura del cabezal cuenta los pasos que requiere el motor para activar los dos interruptores de fin de carrera; relaciona el número de

pasos al rango en milímetros y se inicializa la variable "altura" referenciada al chasis del robot. El uso de interruptores de fin de carrera de bajo costo repercute en la repetibilidad; el hecho de tener dos duplica el error. Aun así, el error estándar representa 44.4 μm y en el peor de

los casos se toma el rango total de variación como error máximo y se tiene 0.5 mm en un rango de funcionamiento de 500 mm., es decir 0.1% de error.

D.b. Flujo luminoso

Resolución 20 luxes, ruido 1.4% con rango de 1400 luxes. En la siguiente sección se presentan resultados de 5 experimentos orientados a obtener la resolución de control del flujo luminoso.

Experimento 1: Se mide el flujo luminoso, emitido por la luminaria LED de 45W (3x15W, Phillips®, 5600K), con sensores de luz BH1117, así como el efecto de la variación del ángulo en el mecanismo de persianas, repitiendo para cada una de las 3 intensidades de la luminaria, ver Figura 4.

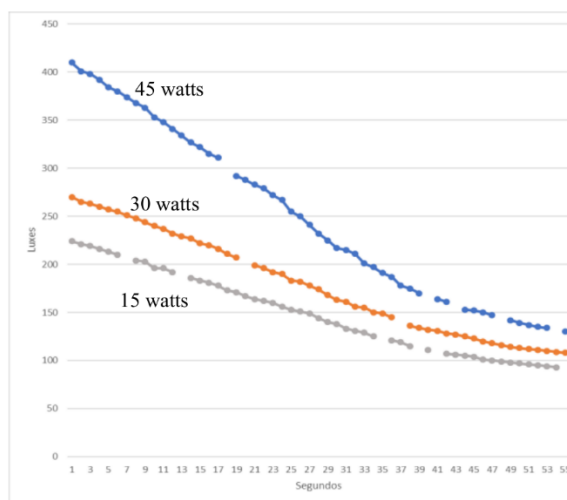


Figura 4. Comparativa de 3 estados de intensidad y su comportamiento conforme al ángulo del mecanismo de persianas. Cada segundo representa un paso en el motor servo que cierra la persiana. (muestreo 1 mps).

En la Figura 4 se aprecian las 3 curvas correspondientes a los 3 estados de intensidad de la luminaria, con tendencia a la baja, lo que indica el impacto que tiene el cierre del mecanismo de persianas; sin embargo, no se aprecia un impacto específico por paso de motor servo, por lo que se realizó el experimento 2.

Experimento 2:

Se mide el efecto del ángulo de la persiana (motor servo) sobre el flujo luminoso; se aumentó 40 veces la velocidad de muestreo de 1 a 40 muestras por segundo, utilizando la intensidad máxima en la luminaria. El motor servo da un paso cada 8 segundos.

En la Figura 5 se aprecia un comportamiento escalonado, correspondiente al comportamiento discreto en el cierre del mecanismo de persianas; a su vez, se distingue la irregularidad de magnitud entre escalones, por lo que se repitió el experimento varias veces más para analizar el comportamiento y repetibilidad del mecanismo de persianas. Se presentan los resultados a continuación en el experimento 3.

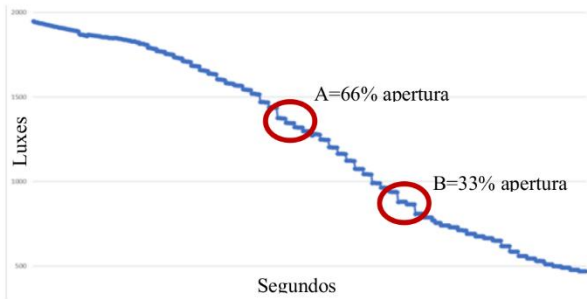


Figura 5. Impacto del ángulo de cierre del mecanismo de persianas (85° en 56 pasos) sobre el flujo luminoso. El punto “A” y “B” representan el 66% y 33% de apertura del mecanismo de persianas.

Experimento 3: Como prueba de repetibilidad y estabilidad del mecanismo de persianas se comparó la magnitud de flujo luminoso bloqueado por cada paso de motor servo en 3 corridas. Ver Figura 6.

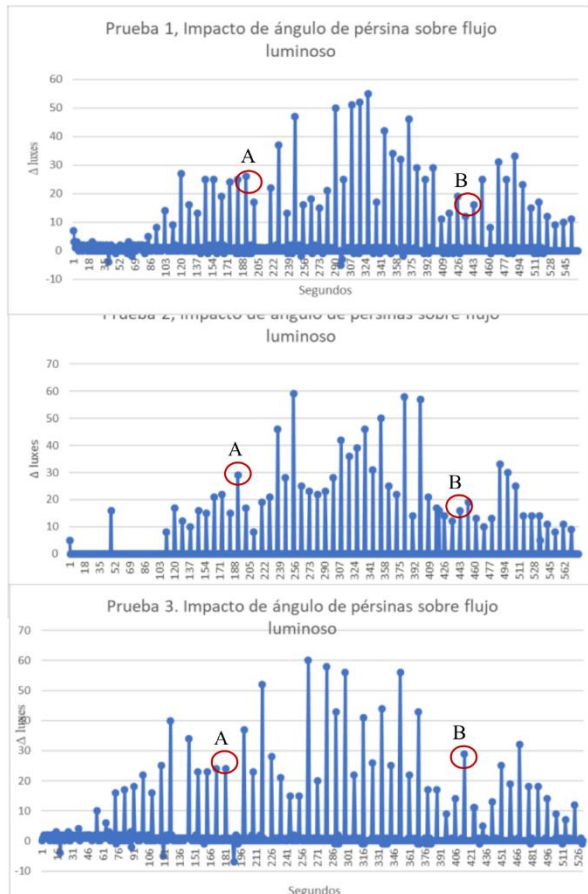


Figura 6. Comparativa de magnitud por paso de motor.

Al comparar la magnitud del flujo luminoso bloqueado por las persianas con respecto al cambio de apertura causado por cada paso de motor en las pruebas 1, 2 y 3, ver Figura 6, se identifica la inestabilidad del mecanismo

de persianas, pues en el caso de un mecanismo perfecto, las 3 gráficas serían idénticas entre sí.

La magnitud de flujo luminoso bloqueado por cada paso del servo oscila entre 5 y 60 luxes, sin embargo, al repetir las pruebas no se obtiene la misma correspondencia entre paso de servo y bloqueo del flujo luminoso. Al rastrear los marcadores “A”, correspondiente al 66% de apertura de las persianas (paso 19 del servo), y “B”, correspondiente al 33% (paso 38 del servo), se ejemplifica la variación aquí descrita. A su vez, se identifica similitud en la tendencia del cambio de magnitud entre las 3 pruebas, las magnitudes de flujo luminoso bloqueado son menores en los extremos y mayores al centro, lo cual corresponde al comportamiento senoidal de la proyección de sombra dada por el ángulo de las persianas.

Después de conocer el comportamiento general del mecanismo de persianas en todo su rango (56 pasos de servo correspondientes a 85° en las persianas), se realizó una prueba de repetibilidad cambiando únicamente entre estado “A” y “B”. Los resultados se muestran a continuación en el experimento 4.

Experimento 4: Con el objetivo de conocer la precisión del mecanismo de persianas cuando el cambio entre dos estados requiere más de un paso de servo. Los dos estados de apertura seleccionados corresponden al paso 19 y 38 del servo (rastreadores “A” y “B”) durante 60 ciclos con 20 segundos por ciclo, duración de la prueba 20 minutos con 40 muestras por segundo. Los resultados se muestran en la Figura 7.

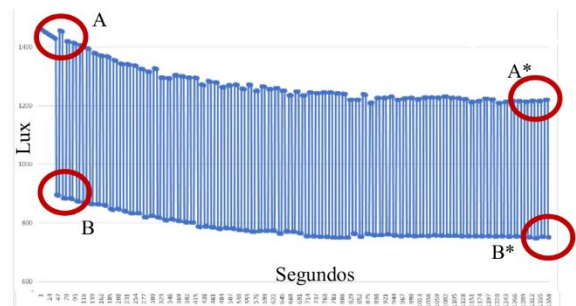


Figura 7. Experimento para conocer la precisión del mecanismo de persianas entre los puntos de interés “A” (66% apertura de persianas) y “B” (33% apertura de persianas).

En la Figura 7 se aprecian 3 efectos: primero, el cambio en el flujo luminoso debido al cambio de apertura del mecanismo de persianas entre el 66% de apertura (“A”) y el 33% (“B”); segundo, la tendencia a la baja en el flujo luminoso correspondiente a la reducción de luminosidad de la luminaria LED debido a su calentamiento, pues la apertura en las persianas en los estados “A” y “B” son las mismas que en “A*” y “B*”, pero el flujo luminoso se

redujo; y tercero, la inestabilidad del mecanismo de persianas al producir brincos en el flujo luminoso que no corresponden al decaimiento natural y continuo de la luminosidad de la luminaria.

Cabe destacar que la caída en el flujo luminoso por efectos térmicos es de aproximadamente 220 luxes (diferencia de flujo luminoso entre “A” y “A*”) lo cual representa 17% de error en esta variable.

Al graficar la magnitud de flujo luminoso bloqueado por el cambio de apertura en las persianas en cada ciclo se aprecia, a pesar de la inestabilidad del mecanismo, que conforme se reduce la luminosidad general de la luminaria, se reduce proporcionalmente la magnitud de flujo luminoso bloqueado entre dos aperturas dadas, ver Figura 8, lo que evidencia la necesidad de utilizar un control de lazo cerrado sobre esta variable para conseguir alta repetibilidad.



Figura 8. Historial de cambio de la magnitud de flujo luminoso bloqueado durante cada uno de los 60 ciclos.

Para determinar la resolución de control se probó con diferentes parámetros de amortiguamiento, a continuación, se presentan los resultados en el experimento 5.

Experimento 5: Se puso a prueba la estabilidad del flujo luminoso durante el control por lazo cerrado; comparación entre parámetro de tolerancia de flujo luminoso y el amortiguamiento del flujo luminoso. Se estableció el valor de 1200 luxes como objetivo de la prueba, debido al resultado del experimento 4, donde se ve el flujo luminoso por encima 1200 luxes después de 20 minutos de funcionamiento.

Debido a la variación de flujo luminoso por efectos térmicos, se realizó el experimento dejando una hora entre pruebas y utilizando la misma rutina: pasa de nivel “bajo” de flujo luminoso (aproximadamente 600 luxes) a nivel “alto” (mayor a 1200luxes) comienza alrededor de los 1400 lux. Velocidad de muestreo 0.1 segundos, duración de prueba 50 segundos, para todas las pruebas. En la figura 9 se presenta el resultado de 3 casos representativos con tolerancias de: 5, 10 y 20 luxes.

El resultado de las pruebas para estabilizar el flujo luminoso compensando por la caída de flujo luminoso por efectos térmicos, consistió en los siguientes tiempos de estabilización: con tolerancia de 5 luxes la variable se estabilizó a los 34 segundos; con tolerancia de 10 luxes se

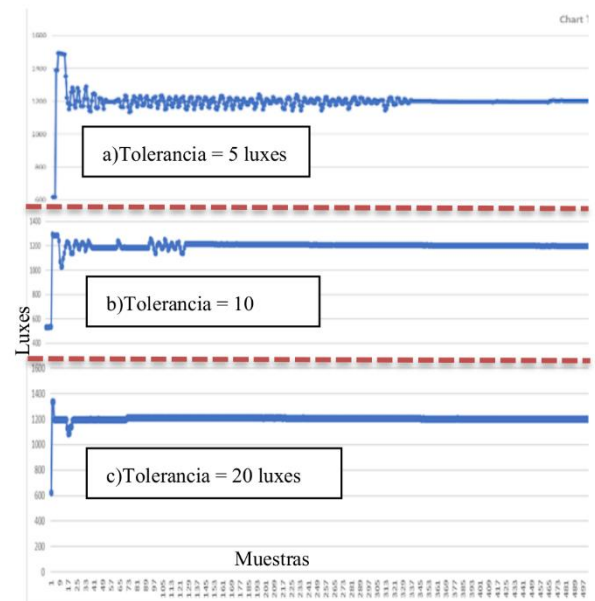


Figura 9. Comparación entre parámetros de tolerancia para el amortiguamiento del flujo luminoso. Velocidad de muestreo 0.1 s.

estabilizó a los 10 segundos; mientras que con 20 luxes se estabilizó en menos de 1 segundo. Se considera la resolución de control del flujo luminoso en 20 luxes, lo que representa 1.4% de error sobre un rango de 1400 luxes.

D.c. Ángulo cabezal

Para controlar el ángulo del cabezal se utilizó un motor servo con tren de potencia de metal montado directamente entre el brazo de la lámpara y el cabezal. El ángulo del cabezal es el ángulo del motor servo, por lo que se consideró el efecto de la holgura entre engranes y flexión del chasis de lámina del cabezal como la máxima fuente de incertidumbre. Se midió la holgura en el tren de transmisión de potencia del servo indirectamente al obtener el cambio de ángulo en el cabezal sin dar pasos en el servo, 1.1°, equivalente a 0.6% ruido en 180° de recorrido. El motor servo no perdió paso en 100 ciclos (no se presenta prueba en este artículo).

D.d. Sensado de usuario

Para obtener la resolución y ruido con la que se puede sensar la fuerza del usuario, se caracterizó la instrumentación analógico-digital de la interfaz correlacionando el número de conteos obtenidos en el convertidor analógico/digital cuando se aplicaron 0 y 13N en los botones; se obtuvieron 9 y 4680 conteos correspondientemente en el convertidor A/D, resultando en una resolución 0.26 gr/conteos, con ruido menor a 2 conteos (0.04% con rango de 1.2kg). En el Anexo 1 se detalla la adquisición de información.

6- Conclusiones

Se logró el objetivo. Se diseñó y fabricó un banco de pruebas robótico para investigar la interacción entre humano y robot, mediante adquisición de información del ambiente, del usuario y del robot; proporcionando precisión y tolerancia en cada variable.

La experiencia en el desarrollo de este banco de pruebas robótico utilizando la perspectiva de la experiencia del usuario, nos aporta que es necesario definir desde el diseño experimental el momento en el que se debe realizar la evaluación cualitativa (encuesta) para determinar qué datos cuantitativos pueden ser correlacionados con la evaluación cualitativa del usuario, por consecuencia en la temporalidad de los sucesos.

Así mismo, es necesario marcar un inicio mutuo en la interacción entre robot y usuario, para delimitar temporalmente la información cuantitativa recabada por el robot, de sí mismo y del ambiente, conforme a la experiencia de cada usuario.

Al comparar la reacción humana a los diferentes estados experimentales, es necesario alinear la intencionalidad del usuario de comenzar la interacción de “uso común del dispositivo robótico”, al presionar el botón de “encendido”, con el inicio de la prueba experimental (el robot comienza a recabar información del ambiente, del usuario y de sí mismo); lo cual vuelve significativa la reacción del usuario no solo en el cómo presiona los botones de la interfaz sino también en el cuándo, en relación con la rutina de bienvenida del robot, variación en la iluminación ambiental durante la prueba y al comportamiento específico del robot conforme a cada estado experimental.

De esta manera, la información recabada durante cada prueba podría representar una grabación de la respuesta intencional, consciente o inconsciente del usuario mediante estímulos controlados por el robot. Por lo que, de obtener una correlación fuerte entre la evaluación cualitativa del usuario y la información cuantitativa, a tal grado de confianza que sea considerado sustituto, el resultado permitirá desarrollar robots que controlen el ambiente del humano a la vez que lo sensan física y, en cierto grado, emocionalmente, permitiendo mejor adaptabilidad y ergonomía para el usuario y una mayor eficiencia combinada humano-robot.

Por otro lado, de ser posible sensar la “opinión” del usuario, se abre la puerta a dispositivos que manipulen al usuario al presentar características que promuevan una reacción del usuario, no por intención del usuario sino de un tercero, es decir, *-alguien más decide dónde me quieren tener cómodo y haciendo qué-*. Lo que preocupa en cuestión de privacidad y seguridad de los usuarios con un futuro prolífero para los robots.

Comentarios

En la cotización de material y servicios se encontró fluctuación de precios de hasta el 100% para el mismo producto o servicio.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y por la

Universidad Nacional Autónoma de México a través del proyecto DGAPA-PAPIIT IT 103320 e IT IT101718.

REFERENCIAS

- [1] Mortier, R., et al., 2015, "Human-Data Interaction: The human face of the Data-Driven society", SSRN Elec. J.
- [2] Campbell, A. T. et al., 2008, "The Rise of People-Centric Sensing", IEEE Internet Computing Vol.12, Issue 4. pp. 12-21.
- [3] Mortier, R., et al., 2016, "Human-Data Interaction", The encyclopedia of Human-Computer Interaction. Hershey PA: Idea Group Reference.
- [4] Bordegoni M, et al., 2013, "User Experience (UX) Upstream to Design: A Sensing Based Approach". ASME. IDETC-CIE.
- [5] Fokkinga, S.F., et al., 2014, "From Product to Effect: Towards a human-centered model of product impact." 6th DRS Conf.
- [6] Hancock, P. A., et al. 2011, "A Meta-Analysis of Factors Affecting Trust in Human-Robot Interaction.", Human Factors, Vol.53, No.5. pp. 517-527.
- [7] Goetz, J., et al., 2003, "Matching Robot Appearance and Behaviour to Tasks to Improve Human-Robot Cooperation". 12th IEEE RO-MAN, USA.
- [8] Laugwitz, B., et al., 2008, "Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire." USAB.
- [9] Weiss, A., et al., 2009, "The USUS Evaluation Framework for Human-Robot Interaction.", New Frontiers in HRI. pp. 89-110.
- [10] Ghosh, D, et al., 2017, "Cyber-Empathic Design: A Data-Driven Framework for Product Design". ASME. J. Mech. Des.
- [11] Alenljung, B., et al., 2017, "User experience of conveying emotions by touch,", 26th IEEE RO-MAN.
- [12] Petruck H., et al., 2016, "Increasing Safety in Human-Robot Collaboration by Using Anthropomorphic Speed Profiles of Robot Movements.", Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 490. Springer.
- [13] ISO 9241-210, 2010, "Human Centred Design for interactive systems", Ergonomics of human-system interaction, Part 210.
- [14] Gómez-Monroy et al., 2019, "Recomendaciones para la experimentación en el área de interacción entre humano y robot utilizando el concepto de Experiencia del Usuario", SOMIM 2019, México.
- [15] Tonkin, M., et al., 2018. "Design Methodology for the UX of HRI: A Field Study of a Commercial Social Robot at an Airport.", HRI'18, USA.
- [16] Everett, Y. J., et al., 2011. "Evaluating Human-Robot Interaction - Focusing on the Holistic Interaction Experience.". Social Robotics. 3. pp. 53-67.

- [17] Alenljung, B., et al., 2017. "User Experience in Social Human-Robot Interaction.", *IJACI*. Vol.8. pp.12-31.
- [18] Palinko, O., et al., 2016, "Robot reading human gaze: Why eye tracking is better than head tracking for human-robot collaboration," *IEEE/RSJ IROS*, pp. 5048-5054.
- [19] Mollahosseini, A., Chan, D. and Mahoor, M.H., 2016, "Going deeper in facial expression recognition using deep neural networks.", *IEEE (WACV)*, USA. pp. 1-10.
- [20] Deuse, J., et al., 2016, "A Customizable Digital Human Model for Assembly System Design.", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 490. Springer.
- [21] Konstan, J. and Riedl, J., 2012. "Recommender systems: From algorithms to user experience.", *UMUAI* vol. 22. pp. 101-123.
- [22] Forlizzi, J. & Ford, S., 2000, "The Building Blocks of Experience: An Early Framework for Interaction Designers.", *Designing Interactive Systems (DIS)*. pp. 419-423.
- [23] Forlizzi, J. & Battarbee, K. 2004. "Understanding experience in interactive systems.", *DIS*. pp. 261-268.
- [24] Sasabuchi, K., Ikeuchi, K. & Inaba, M. 2018. "Agreeing to Interact: Understanding Interaction as Human-Robot Goal Conflicts.", *HRI'18*. pp. 21-28.
- [25] Moon, A., et al., 2014, "Meet Me where I'm Gazing: How Shared Attention Gaze Affects Human-Robot Handover Timing.", *HRI'14*. pp. 334-341.
- [26] Xu, Q., Zhou, F. and Jiao, J., 2011. "Affective-Cognitive Modeling for User Experience With Modular Colored Fuzzy Petri Nets.", *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*
- [27] Bonin, D., et al., 2016. "Digital Assessment of Anthropometric and Kinematic Parameters for the Individualization of Direct Human-Robot Collaborations.", *3DBODY.TECH*, pp.171-181.
- [28] Vitale, J., et al., 2018, "Privacy by Design in Machine Learning Data Collection: A User Experience Experimentation", *AAAI Symposium on Designing the User Experience of Machine Learning Systems*. Pp. 439-442.
- [29] Tonkin M. et al., 2017, "Embodiment, Privacy and Social Robots: May I Remember You?", *Social Robotics*. ICSR.
- [30] Krol, K., et al., 2016, "Towards robust experimental design for user studies in security and privacy.", *LASER*.
- [31] Vitale, J., et al., 2018, "Be More Transparent and Users Will Like You: A Robot Privacy and User Experience Design Experiment." *HRI'18*.
- [32] Kanade, Takeo. 1973, "Picture Processing System by Computer Complex and Recognition of Human Faces", *Doctoral Dissertation*, Kyoto University. Japan.
- [33] Amos, B., et al., "OpenFace: A general-purpose face recognition library with mobile applications."
- [34] Aarts, A., et al., 2015, "Estimating the Reproducibility of Psychological Science.", *Science*. Vol. 349.
- [35] Irfan, B., et al., 2018, "Social Psychology and Human-Robot Interaction: An Uneasy Marriage." *HRI'18*.
- [36] Shotton, J., et al., 2011, "Real-time human pose recognition in parts from single depth images," *CVPR*.
- [37] Hassenzahl, M., Tractinsky, N., 2006, "User experience-a research agenda." *Behaviour & IT* 25.
- [38] Haddadin, S., et al., 2007, "Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing." *Robotics: Science and Systems*.
- [39] Thomas, C., et al., 2016, "Intuitive Work Assistance by Reciprocal Human-robot Interaction in the Subject Area of Direct Human-robot Collaboration.", *CIRP*. 44. 275-280.
- [40] Karabegović, I., Doleček, V., 2017, "The Role of Service Robots and Robotic Systems in the Treatment of Patients in Medical Institutions.", *Advanced Technologies, Systems, and Applications*. Vol 3. Springer, Cham.
- [41] Nelles, J., et al., 2019, "Evaluation Metrics Regarding Human Well-Being and System Performance in Human-Robot Interaction – A Literature Review.", *20th Cong. IEA*. Vol. 825.
- [42] Shen, W. et al., 2017, "Regulating Highly Automated Robot Ecologies: Insights from Three User Studies.", *Proceedings HAI 17*.
- [43] Marche, C., et al., 2017, "Energy efficiency in smart building: A comfort aware approach based on Social Internet of Things.", *Global Internet of Things Summit*.
- [44] Wei, Z., et al., 2018, "Thermal Comfort Modeling for Smart Buildings: A Fine-Grained Deep Learning Approach.", *IEEE Internet of Things Journal*.
- [45] Fosch Villaronga, E. & Albo Canals, J., 2018. "Implications of the Google's US 8,996,429 B1 Patent in Cloud Robotics-Based Therapeutic Researches." *Service Robots*, Intech.
- [46] De Santis, A., et al., 2008. "An atlas of physical human-robot interaction." *J. Mech. Mach. Theory*. V.43.
- [47] Bajcsy, A., et al., 2017, "Learning Robot Objectives from Physical Human Interaction.", *CoRL*.
- [48] De Luca, A. and Flacco, F., 2012, "Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration," *IEEE RAS & EMBS (BioRob)*, pp. 288-295
- [49] Lin, H., et al., 2017, "Real-time collision avoidance algorithm on industrial manipulators," *IEEE (CCTA)*.
- [50] Girardin, F. and Lathia, N., 2017, "When User Experience Designers Partner with Data Scientists", *AAAI Spring Symposium on Designing the User Experience of Machine Learning Systems*.
- [51] Baxter, P., et al., 2016, "From characterising three years of HRI to methodology and reporting recommendations," *HRI'16*.
- [52] Lindblom, J., Andreasson, R., 2016, "Current Challenges for UX Evaluation of Human-Robot Interaction.", *Advances in Ergonomics of Manufacturing*, vol 490. Springer, Cham.
- [53] Lee, M.K., et al., 2009, "The Snackbot: Documenting the design of a robot for long-term Human-Robot Interaction." *HRI'09*, pp. 7-14.
- [54] Bornmann, Lutz., 2013, "What is social impact of research and how can it be assessed? A literature survey.", *JASIST*. Vol. 64

Anexo 1. Detalle de la instrumentación de los sensores de fuerza como botones, pasando por el amplificador de instrumentación o transformación eléctrica/análogica para ganar resolución antes de la conversión analógico/digital.

Instrumentación de la interfaz de usuario: botón sensor de fuerza. módulo (c)			
Acondicionamiento Eléctrica/Analogica			
Transformación Variable de interés/señal eléctrica	Conversión Analógica/Digital	Transformación lógica:	Trans. Temporal/ espacial (memoria / transmisión)
Dispositivo	AD620 Amplificador de instrumentación (\$200)	ADS1115 Module 16bit ADC. (\$400)	Almacenamiento en tarjeta SD (\$250)
Señal	AD705 Op. Amp. (\$100)	INA122 Amplificador de instrumentación (\$250)	Protocolo de comunicación: MOSI
Alimentación *El rango de salida depende del voltaje de alimentación. 5V*	Entrada: (0, 13) Newton Salida: (-5, 70) mV	Entrada: (0, 5) v. Discreto Digital 80SPS, 20SPS Data (6,4920) {1 variable} 12c	Salida: (0, 5) v. Discreto Digital Data (0,13N) {18 variables}
Potencia de la señal y resolución	AD620 Amplificador de instrumentación (\$200)	ADS1115 Module 16bit ADC. (\$400)	Operación Matemática: Fuerza= (#conteos)(Res. N/conteo)
Convierte la fuerza en corriente eléctrica. Efecto Piezoeléctrico. Repetibilidad +0.2% (datasheet) Uso industrial (instrumentación médica) Low drift. Tipo de sensor: puente H	AD705 Op. Amp. (\$100)	ADS1115 Module 16bit ADC. (\$400)	*Nota* De haber usado el convertidor an/dig integrado en el Arduino mega (10 bits) sin amplificador instrumental, se hubiera obtenido una muy baja resolución de 100 gr/conteo. Mientras que sin convertidor an/dig externo, pero con amplificador instrumental mejora la resolución a 1.28 gr/conteo. Lo que explica la necesidad de utilizar convertidor an/dig externo (16 bits) y amplificador instrumental para obtener 0.26 gr/cont.
Características principales	AD620 Amplificador de instrumentación (\$200)	ADS1115 Module 16bit ADC. (\$400)	Económico Fácil de implementar
	AD620 Amplificador de instrumentación (\$200)	ADS1115 Module 16bit ADC. (\$400)	La señal se tiene una variación de 2 conteos con carga constante en el sensor de fuerza.

Página dejada en blanco intencionalmente.