

TESIS DOCTORAL



**Mondragon**      **Goi Eskola Politeknikoa**  
**Unibertsitatea**   **Escuela Politécnica Superior**

# Metodologías Data-Driven para Optimizar la Interacción Persona-Máquina en Escenarios Industriales

DANIEL REGUERA BAKHACHE

Departamento de Electrónica e Informática  
Mondragon Unibertsitatea

Dirigida por  
**DR. IÑAKI GARITANO**  
Departamento de Electrónica e Informática  
Mondragon Unibertsitatea

Co-dirigida por  
**DR. ROBERTO URIBEETXEBERRIA**  
Departamento de Electrónica e Informática  
Mondragon Unibertsitatea

PROGRAMA DE DOCTORADO EN  
INGENIERÍA APLICADA





**Mondragon  
Unibertsitatea**

**Goi Eskola Politeknikoa  
Escuela Politécnica Superior**

# **Metodologías Data-Driven para Optimizar la Interacción Persona-Máquina en Escenarios Industriales**

**DANIEL REGUERA BAKHACHE**

Departamento de Electrónica e Informática  
Mondragon Unibertsitatea

Dirigida por

**DR. IÑAKI GARITANO**

Departamento de Electrónica e Informática  
Mondragon Unibertsitatea

Co-dirigida por

**DR. ROBERTO URIBEETXEBERRIA**

Departamento de Electrónica e Informática  
Mondragon Unibertsitatea

Tesis dirigida a la obtención del título de Doctor en:

**INGENIERÍA APLICADA**

por

**MONDRAGON UNIBERTSITATEA**

En ARRASATE-MONDRAGÓN, 3 de Junio de 2021

Este trabajo se distribuye bajo una licencia Creative Commons  
Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional





*Eleneri, asko maite zaittut.*



*"La inteligencia es la habilidad de adaptarse a los cambios"*

— Stephen Hawking





---

# DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

---

Yo Daniel Reguera Bakhache, declaro que el trabajo de investigación desarrollado en esta tesis es original, fruto de mi trabajo personal en el departamento de Electrónica e Informática de Mondragon Unibertsitatea, y que no ha sido previamente presentado para obtener otro título o calificación profesional.

Las ideas, formulaciones e ilustraciones tomadas de fuentes ajenas han sido debidamente citadas y referenciadas.

En Arrasate-Mondragón a 3 de Junio de 2021,

*Daniel Reguera Bakhache*



---

## RESUMEN

---

El auge de las nuevas tecnologías y su aplicación en el sector industrial ha generado una transformación de los procesos industriales hacia procesos inteligentes donde la interacción operario-máquina cada vez es más compleja. En este nuevo escenario, la inteligencia artificial se ha convertido en una solución potencial para asistir al operario en el proceso de interacción con la máquina mediante sistemas capaces de adaptarse al contexto. Sin embargo estos sistemas no incorporan la información referente a la interacción operario-máquina, estado del proceso o información del HMI en el proceso de adaptación, tres factores clave para conseguir una interacción personalizada.

En esta tesis se desarrollan un conjunto de metodologías guiadas por datos para obtener una serie de reglas de adaptación temporal inteligentes en los HMI industriales con el objetivo de mejorar el proceso de interacción operario-máquina. Mediante el uso de técnicas de aprendizaje automático las metodologías: i) infieren los diferentes patrones de interacción, ii) identifican los intervalos de tiempo en los cuales las reglas han de ser activadas y por último iii) proponen una serie de acciones a realizar en el diseño del HMI respetando la coherencia e integridad del HMI.

Las metodologías desarrolladas han sido validadas en tres escenarios industriales, demostrando que tomando como datos de entrada: i) los datos de interacción operario-máquina y ii) la información del HMI industrial es posible inferir un conjunto de reglas de adaptación temporal, las cuales una vez implementadas en los mismos consiguen una reducción del 40% en el tiempo de interacción y un decremento del 60% en el número de eventos necesarios para realizar la secuencia, derivando en una mejora el rendimiento del operario a la hora de realizar las tareas de supervisión y control.



---

## ABSTRACT

---

The rapid expansion of new technologies into the industrial sector has transformed traditional industrial processes into intelligent operations, in which operator-machine interaction is becoming increasingly complex. In this new scenario, artificial intelligence is gaining traction as a powerful tool to promote more efficient and effective interactions between operators and machines, by means of systems capable of adapting to the context. However, present day industrial adaptive systems do not incorporate knowledge extracted from operator-machine interaction, process status information, or HMI specifications in the adaptation process; three factors critical to achieving personalized interactions.

In this thesis we focus on improving the interaction between humans and machines in an industrial context. To this end, a series of data-driven methodologies for industrial HMIs were developed to obtain a set of intelligent temporal adaptation rules. By using machine learning techniques the methodologies: i) infer the different interaction patterns utilized in an industrial process, ii) identify the time intervals in which the proposed rules must be activated and iii) propose a set of actions to be performed in the HMI, while respecting the characteristics and integrity of the HMI.

The developed methodologies were validated in three industrial scenarios, demonstrating that by taking as input data: i) the operator-machine interaction data, and ii) industrial HMI information, it is possible to infer a set of temporal set of temporal adaptation rules. These rules, once implemented in the tested scenarios, achieved a reduction in the interaction time and a decrease in the number of events required to perform the sequence, thereby improving operator performance when carrying out supervision and control tasks.



---

# LABURPENA

---

Teknologia berrien gorakadak eta industria sektorean hauek izandako erabilerak, prozesu industrialetan eraldaketa haundia eragin dute: prozesuak gero eta adimentsuagoak dira, honek erabiltzaile eta makinaren arteko interakzioa konplexuagoa bihurtzen duelarik. Eszenatoki berri honetan, adimen artifiziala irtenbide itxaropentsu bezala aurkeztu da, langileei asistentzia adimentsua eskaini baitieziaiekete makinekin elkarrekintzan dabiltzanean, adibidez, testuingurura egokitzeko gai diren sistemen bidez. Hala ere, normalean sistema hauek ez dute aintzat hartzen langile-makinaren arteko elkarrekintzaren inguruko informaziorik, ezta prozesuaren egoeren edo HMI-aren inguruko informaziorik ere adaptazio prozesu horretan.

Tesi honetan, datuetan oinarritutako metodologia multzo bat garatzen da, adaptazio tenporal adimentsuak ahalbidetzeko erregelak sortzen dituztenak. Hauek, langilea eta makinaren arteko elkarrekintza hobetzea dute helburutzat. Ikasketa automatiko bidezko teknikak erabiliz, metodologiek i) interakzio desberdinak ondorioztatzen dituzte, ii) erregelak aktibatu beharreko denbora tartekak identifikatzen dituzte eta azkenik iii) HMI baten diseinuan egin beharreko ekintza sorta bat proposatzen dute, HMI-aren koherentzia eta integritatea errespetatuz.

Garatutako metodologiak hiru kasu industrialetan balioztatu dira, sarrera-datu gisa: i) langile eta makinaren elkarrekintzaren datuak eta ii) HMI industrialaren informazioa hartuz, denborazko adaptazioak ahalbidetzen dituzten erregela multzo bat ondorioztatzea posible dela frogatuz. Behin hauek HMI batean inplementaturik daudela, interakzio denborak murrizten dituzte eta akzio sekuentzia bat exekutatzeko behar diren gertakizun kopurua ere murrizten dute. Modu honetan, erabiltzailearen errendimendua hobetzen da gainbegiratze eta kontroleko atazetan.





---

## AGRADECIMIENTOS

---

Me gustaría comenzar agradeciendo a toda la gente que me ha acompañado en esta bonita etapa. Sois muchos los que de una manera u otra habéis estado a mi lado aguantando y animando. A todos vosotros *eskerrik asko benetan*.

Quiero empezar por mi familia (Marmur, Mario, Ainhoa, Maite, Asun y Javi) que ha estado siempre ahí cuando la he necesitado. Mención especial a mi padre, el señor Eloy, porque su manera de ver la vida es el mejor ejemplo a seguir. A tí Teresa, gracias por curarme todos mis catarritos XY con una sonrisa, por acompañarme en este camino y sobre todo por hacerme la vida más fácil cada día. Y cómo no, gracias a la pequeña Elene por haber llegado a nuestras vidas y llenarlas de alegría en cada momento. *Pila bat gurotzuet*.

No puedo olvidarme de mis amigos de toda la vida. *Eskerrik asko* Alex, García, Larretxi, Polo, Pablo y Miguel. Gracias al señor Angulo por enseñarme tanto, de todo y tan bien. A los entresijos María Bellido, Diego Barreales y Jon Fondevila por haberos convertido en mi pequeña gran familia bilbaína. A mis amigos de Miranda, en especial a Rodrigo y Laura, por haberme enseñado las bondades de Los Monteros, el mejor sitio del mundo para reflexionar.

Agradecer en mayúsculas a mis directores de tesis toda la ayuda, motivación y comprensión brindada en este camino. Roberto, gracias por haber estado siempre disponible dando tu punto de vista cuando lo he necesitado, aquí o en Chicago siempre has creído en mí. E Iñaki... ¡tú si que te has sacado una segunda tesis conmigo! Ha sido un placer realizar este proyecto juntos y sobre todo aprender de ti, eres muy grande pequeño Garitano. *Lortu juau hi!*

Quiero agradecer la oportunidad que me ha brindado Mondragon Goi Eskola Politeknikoa para realizar esta tesis. Agradecer la ayuda de todos mis compañeros del departamento de Electrónica e Informática. He de hacer mención especial a Igor Azkarate, Aitor Osa, Xabier Elkorobarrutia, Joseba Agirre, Joseba Mendiguren, Ganix Lasa, Jon Aranguren, Egoitz Arruti y Maria Ruiz. Del mismo modo, quiero dar las gracias al área de investigación DANZ por las facilidades dadas (Aitor, Ekhi, Urko, Mikel, Enaitz, Carlos, Igor, Antton, Iñaki V., Eneko, Rosa e Iñaki A. *eskerrik asko!*). Gracias a Iban Barrutia y Mikel Mendikute por todos los cafés y debates sobre RF, Fourier y el álgebra '*anormalizada*'. Agradecer a Xabi Esnaola su ayuda con los desarrollos, ha sido un placer tenerte como alumno. También a David Garrido e Igor Baraia-Etxaburu por tener patrones tan claros que quedan perfectos en las figuras. A todos vosotros, ¡gracias de veras!

Y para finalizar, quiero dedicar esta tesis a una persona con la que me hubiese gustado debatir, contrastar y sobre todo aprender de él en las sobremesas de Comunión. Allá donde estés que sepas que este trabajo también es para tí Jose Ignacio.



---

# ÍNDICE GENERAL

---

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación . . . . .	2
1.2	Objetivos de investigación, hipótesis formuladas y contribuciones . . . . .	8
1.2.1	Hipótesis formuladas . . . . .	8
1.2.2	Objetivos asociados a las hipótesis . . . . .	9
1.2.3	Metodología de investigación . . . . .	9
1.2.4	Contribuciones . . . . .	10
1.2.5	Publicaciones . . . . .	11
1.3	Estructura de la Tesis . . . . .	12
2	ESTADO DEL ARTE	13
2.1	Definiciones . . . . .	14
2.2	Visión general de los sistemas de control industrial . . . . .	15
2.2.1	Arquitectura y componentes de los sistemas de control industrial	15
2.2.2	Análisis y diagnóstico de sistemas de monitorización y control industrial . . . . .	17
2.3	Interfaces Humano-Máquina Industriales . . . . .	18
2.4	Adaptación inteligente de interfaces humano-máquina industriales . . . . .	20
2.4.1	Visión general de las interfaces inteligentes de usuario . . . . .	20
2.4.2	Interfaces adaptativas inteligentes de usuario . . . . .	23
2.5	Conclusiones del capítulo . . . . .	25
3	METODOLOGÍA GUIADA POR DATOS PARA LA ADAPTACIÓN DE UN HMI EN BASE A TIEMPO	27
3.1	Introducción . . . . .	28
3.2	Metodología planteada . . . . .	28
3.2.1	Descripción formal de un HMI industrial mediante un lenguaje UIDL ligero . . . . .	30
3.2.2	Especificación formal de un conjunto de datos de interacción operario-máquina . . . . .	31
3.2.3	Filtrado y selección de secuencias válidas de interacción . . . . .	31
3.2.4	Detección automática de intervalos temporales para la activación de las reglas de adaptación . . . . .	35
3.2.5	Filtrado y priorización de secuencias candidatas relevantes para disminuir la sobrecarga de información . . . . .	36
3.2.6	Inferencia de reglas temporales de adaptación mediante minería de secuencias . . . . .	38
3.3	Validación de la metodología para adaptación temporal del HMI . . . . .	38
3.3.1	Experimento . . . . .	38
3.3.2	Diseño del sistema de captura de interacción . . . . .	40
3.3.3	Duración del experimento y descripción de los participantes . . . . .	42
3.3.4	Descripción Formal de las interfaces que componen el HMI . . . . .	42
3.3.5	Descripción del conjunto de datos de interacción operario-máquina . . . . .	44

3.3.6	Procedimiento seguido . . . . .	45
3.4	Análisis y discusión de los resultados obtenidos . . . . .	51
3.4.1	Número de eventos de la secuencia de interacción . . . . .	52
3.4.2	Duración en tiempo de la secuencia de interacción . . . . .	52
3.4.3	Validación por parte del operario de la regla de adaptación . . . . .	52
3.5	Conclusiones del capítulo . . . . .	53
4	METODOLOGÍA GUIADA POR DATOS PARA LA ADAPTACIÓN DE UN HMI EN BASE AL TIEMPO Y POR OPERARIO . . . . .	55
4.1	Introducción . . . . .	56
4.2	Metodología planteada . . . . .	56
4.2.1	Descripción formal del HMI industrial . . . . .	57
4.2.2	Especificación de una secuencia de interacción operario-máquina . . . . .	58
4.2.3	Generación de secuencias válidas de interacción . . . . .	58
4.2.4	Filtrado y selección de secuencias candidatas . . . . .	59
4.2.5	Agrupación de secuencias candidatas en base a su grado de similitud . . . . .	59
4.2.6	Inferencia de reglas temporales de adaptación . . . . .	60
4.3	Validación de la metodología diseñada . . . . .	62
4.3.1	Descripción del conjunto de datos utilizado . . . . .	62
4.3.2	Descripción Formal de las interfaces que componen el HMI . . . . .	62
4.3.3	Procedimiento seguido . . . . .	63
4.4	Análisis y discusión de los resultados obtenidos . . . . .	69
4.4.1	Número de eventos de la secuencia tras la adaptación . . . . .	71
4.4.2	Duración temporal media de la secuencia tras la adaptación . . . . .	71
4.4.3	Validación de la regla de adaptación por parte del operario . . . . .	72
4.5	Conclusiones del capítulo . . . . .	72
5	METODOLOGÍA GUIADA POR DATOS PARA LA ADAPTACIÓN DE UN HMI EN BASE A TIEMPO, OPERARIO Y PROCESO . . . . .	73
5.1	Introducción . . . . .	74
5.2	Metodología Planteada . . . . .	75
5.2.1	Descripción Formal del HMI industrial . . . . .	75
5.2.2	Especificación de una secuencia de interacción operario-máquina . . . . .	76
5.2.3	Filtrado y selección de secuencias candidatas de adaptación . . . . .	77
5.2.4	Detección automática de intervalos temporales para la activa- ción de las reglas de adaptación . . . . .	79
5.2.5	Generación de reglas de adaptación mediante minería de se- cuencias . . . . .	80
5.3	Validación de la metodología planteada . . . . .	81
5.3.1	Descripción de los participantes y del conjunto de datos utilizado . . . . .	83
5.3.2	Descripción Formal de las interfaces que componen el HMI de la máquina . . . . .	83
5.3.3	Procedimiento seguido en la experimentación . . . . .	84
5.4	Análisis y discusión de los resultados obtenidos . . . . .	88
5.4.1	Número de eventos de la secuencia de interacción . . . . .	90
5.4.2	Duración en segundos de la secuencia de interacción . . . . .	90
5.4.3	Validación por parte del operario de la regla de adaptación . . . . .	90
5.5	Conclusiones del capítulo . . . . .	91

6 CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES Y LÍNEAS FUTURAS	93
6.1 Conclusiones de la tesis . . . . .	94
6.2 Contribuciones . . . . .	96
6.3 Líneas Futuras . . . . .	97
Índice de Tablas	101
Referencias Bibliográficas	103



---

## ACRÓNIMOS

---

API	Application Programming Interface
AUI	Adaptive User Interfaces
CSS	Cascade Style Sheet
CBM	Condition Based Monitoring
DSS	Decision Support System
ECA	Event Condition Action
IA	Inteligencia Artificial
ICS	Industrial Control Systems
IUI	Intelligent User Interfaces
PLC	Programmable Logic Controller
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SFI	Sistemas de Fabricación Inteligentes
UCD	User Centered Design
UID	User Interface Design
UIDL	User Interface Description Language
UX	User eXperience
GUI	Graphic User Interface
HCI	Human-Computer Interaction
HMI	Human-Machine Interface
HTML	Hyper Text Markup Language
ML	Machine Learning
CPS	Cyber Physical Systems





# Capítulo 1

---

## INTRODUCCIÓN

---

Este capítulo describe la motivación principal que inspiró al autor a investigar en el área de las Interfaces Inteligentes de Usuario (IUI, 'Intelligent User Interfaces') y más concretamente en la adaptación de las mismas en escenarios industriales mediante técnicas *Data-Driven*, con el objetivo de aportar soluciones a los problemas identificados en los procesos industriales actuales.

A su vez, se establecen los objetivos principales de la investigación, así como las hipótesis planteadas en esta tesis, definiendo el alcance de la misma. Por último, se describe la metodología seguida para alcanzar los objetivos planteados y se resumen las principales aportaciones y contribuciones del trabajo.

## 1.1 MOTIVACIÓN

El mundo del control de los procesos industriales es uno de los ámbitos donde ha surgido un nuevo y emergente paradigma con la incorporación gradual de diferentes tecnologías. Gracias al uso de nuevos métodos, sistemas y procedimientos, se ha evolucionado hacia nuevos escenarios en los cuales las empresas industriales se encuentran completamente conectadas. Éste proceso de transformación digital ha permitido a las empresas evolucionar, transformando los sistemas tradicionales de fabricación en Sistemas de Fabricación Inteligentes (SFI) [1].

En éste nuevo escenario que ofrecen los SFI, la automatización industrial juega un papel clave, permitiendo optimizar los procesos industriales, disminuir los costes y asegurar la calidad. A través de la aplicación de diversas tecnologías en las diferentes etapas del proceso industrial, tareas principalmente repetitivas en las labores de supervisión y control del proceso pueden llegar a realizarse de manera casi autónoma, transformando el modo de intervenir de los operarios [2]. Según previsiones de la Federación Internacional de Robótica (IFR, 'International Federation of Robotics') entre los años 2020 y 2022, más de 2 millones de nuevos robots industriales serán implantados en diferentes fábricas de todo el mundo llegando a 4 millones de robots activos a finales de 2022 [3], transformando progresivamente a su vez el sector industrial mediante: i) la simplificación de los procesos productivos, ii) fomentando la colaboración Humano-Robot y por último iii) mediante la consolidación del proceso de digitalización de la industria.

Tras la crisis sanitaria provocada por la COVID-19, la automatización industrial y la robótica han pasado a jugar papeles clave para hacer frente al impacto económico que ha afectado a todos los sectores y países. Se ha podido observar cómo las empresas industriales que disponían de procesos automatizados o robotizados previos a la crisis, han sufrido un menor impacto que empresas no digitalizadas y acelerando a su vez el proceso de automatización [4]. De la misma manera, estas empresas automatizadas y digitalizadas, se encuentran en una posición mejor a la hora de abordar las futuras consecuencias económicas y sociales producidas por la pandemia.

Por ello, la Unión Europea ha apostado claramente por la digitalización y la automatización, aprobando el fondo de recuperación económico *Recovery and Resilience Facility* para potenciar la transformación digital y construir empresas más competitivas y resilientes [5]. En éste nuevo escenario, las empresas industriales disponen de una oportunidad clara de transformar sus procesos productivos tradicionales en procesos automatizados que les permitan ser más competitivos y por ende reforzar el tejido industrial. Esta futura automatización de las empresas industriales unida a la inclusión de la Inteligencia Artificial (IA) dará como resultado que en el año 2030 un 45 % de los empleos del sector manufacturero donde predominan las tareas manuales y rutinarias estarán automatizados [6]. Esta combinación de la IA y la automatización industrial supondrán en 2030 alrededor del 14 % del PIB mundial [7].

En la actualidad el sector industrial se vé impulsado por la necesidad de reducir los costes de fabricación, mejorar la calidad y reducir los tiempos. Este escenario resultante ha generado la necesidad de incorporar nuevas tecnologías y

métodos para realizar las tareas de supervisión, monitorización y control. Es aquí donde la aplicación de la IA se ha erigido como una solución óptima para un amplio espectro de aplicaciones industriales. Hasta la fecha, la adopción de la IA por parte del sector manufacturero se ha centrado principalmente en transformar procesos de fabricación tradicionales en otros totalmente inteligentes, mejorando significativamente mejorar su eficacia y eficiencia [8]. Al mismo tiempo, la IA también puede permitir una fabricación más personalizada y eficiente al adaptarse al contexto y a las habilidades y capacidades del operario [9]. De este modo, el operario pasa a adquirir un nuevo rol donde su conocimiento sobre el proceso aporta valor añadido en la toma de decisiones [10]. Sin embargo, esto último sigue aun sin explorarse en profundidad dentro del sector de la fabricación.

Una de las ventajas principales de la automatización industrial es la transformación total o parcial de diversos procesos industriales en procesos inteligentes. Sin embargo, en la actualidad siguen existiendo diferentes tareas las cuales no pueden ser totalmente automatizadas y aún es necesaria una intervención supervisada por parte de los operarios. En estos escenarios, las Interfaces Humano-Máquina (HMI, 'Human-Machine Interface') cobran vital importancia, permitiendo al operario interactuar directamente con el proceso industrial. Esta interacción operario-máquina permite entre otras cosas, consultar la información referente al estado del proceso, analizar la información histórica de los diferentes indicadores y realizar un ajuste de los diferentes parámetros y variables. La información relativa al proceso viene representada de manera visual en el HMI mediante diferentes elementos gráficos informativos. A su vez, el operario puede interactuar con el proceso a través del HMI mediante los elementos interactivos. Es por ello, que disponer de sistemas donde la usabilidad y la experiencia de usuario (UX, 'User Experience') estén contempladas a la hora de diseñar los HMIs industriales, cobra vital importancia [11].

La evolución experimentada por los HMIs industriales en las últimas décadas ha sido notable. No solo desde el punto de vista tecnológico introduciendo por ejemplo tecnologías emergentes, diferentes protocolos de comunicación o nuevos lenguajes de programación, sino desde los diferentes componentes y objetos disponibles con los cuales poder construir la interfaz. En la actualidad el proceso de diseño y desarrollo de HMIs industriales es heterogéneo y diverso, dependiendo de dos factores principalmente: i) los diferentes *software* de automatización industrial disponibles y ii) las características de cada fabricante de sistemas de automatización. Ante esta falta de estandarización por parte de los fabricantes a la hora de diseñar y construir los HMIs industriales, nuevas tecnologías como las arquitecturas web han ido abriéndose camino en el mundo de la automatización industrial haciendo de la inclusión de las tecnologías web en el mundo de la automatización industrial un área muy prometedora en el proceso de transformación de las plantas industriales tradicionales hacia la denominada Industria Inteligente o *Smart Factory* [12, 13]. Aún así, el avance en el ámbito industrial de estas tecnologías es todavía lento dada la poca flexibilidad que otorgan los diferentes fabricantes actuales de HMIs.

Hasta la fecha, el diseño de los HMIs por parte de los diferentes fabricantes de máquinas industriales se ha focalizado principalmente en visualizar la información del proceso y a su vez poder controlarlo. Este diseño, se ha basa-

do principalmente en el desarrollo de interfaces gráficas de usuario las cuales únicamente visualizan las variables del proceso y el impacto de las mismas. Sin embargo, en este proceso de diseño, no se ha tenido en cuenta en ningún momento las características, limitaciones y habilidades de los operarios [14].

El término Industria 4.0 define una nueva revolución tecnológica llevada a cabo por las empresas manufactureras combinando técnicas avanzadas de producción con tecnologías inteligentes, derivando en un nuevo concepto de fábrica inteligente interconectada [15]. Uno de los objetivos de la Industria 4.0 es diseñar sistemas de fabricación que se ajusten a las necesidades de los operarios y no al revés [16]. Por ello, el análisis de las características de los operarios puede ser utilizado para ofrecer sistemas que se adapten a sus necesidades, consiguiendo procesos de fabricación adaptativos [17], ajustándose al operario, y por consiguiente mejorando su desempeño y rendimiento [18]. El avance que ha experimentado la Industria 4.0 en los últimos años, ha dado lugar a un incremento exponencial en la complejidad de los procesos industriales. Esto ha derivado en una necesidad real de disponer de sistemas de visualización de información innovadores, en este caso los HMI industriales, que permitan al operario realizar las tareas de supervisión y control de manera más eficaz [19], añadiendo por ejemplo nuevas técnicas de visualización la información o habilitando nuevas maneras de interacción.

En este aspecto, varios son los fabricantes de HMIs que han apostado por la innovación en el ámbito de la visualización de información e interacción de usuario. Siemens, uno de los fabricantes de automatización con mayor cuota de mercado en Europa, ha incorporado en sus dispositivos Simatic-HMI nuevos modelos de visualización de información respetando la usabilidad y creando nuevos métodos de interacción gestuales [20]. Rockwell Automation, fabricante de componentes de automatización estadounidense, es otra de las compañías que también ha realizado una fuerte innovación en el mercado de los HMIs apostando claramente por la usabilidad y el UX en sus nuevos dispositivos permitiendo nuevas maneras de interacción y visualizando la información de manera que ayude al operario en la toma de decisiones [21].

El análisis y testeo de factores como la usabilidad y UX, son clave para mejorar la interacción entre el operario y la máquina, y por lo tanto, el análisis de la información extraída es clave para optimizar el rendimiento del operario. Las técnicas existentes para el análisis de la Usabilidad y el UX se basan en diferentes métodos de análisis supervisado para entender cómo el operario interactúa con el HMI industrial. La interpretación de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de usabilidad, pueden sugerir un conjunto de cambios a realizar en el HMI industrial para mejorar los posibles puntos débiles detectados. Uno de los procesos existentes para diseñar interfaces teniendo en cuenta criterios de usabilidad y UX es el Diseño Centrado en Usuario (UCD, 'User Centered Design'), el cual describe los procesos de diseño en los que los usuarios finales influyen en la forma del diseño de un sistema [22]. El UCD es un proceso de diseño iterativo donde el diseño está centrado en i) los usuarios que van a utilizar el sistema y ii) los objetivos para los cuales se va a diseñar el sistema. En este proceso, la usabilidad es analizada de manera iterativa proponiendo mejoras

incrementales en el diseño [23]. En la Figura 1.1 se pueden observar las 4 fases del diseño UCD:

- Especificación del contexto de uso: en esta primera fase se identifican que usuarios utilizarán el sistema y en qué condiciones.
- Especificación de los requisitos del sistema: en esta segunda fase se identifican cuales son los objetivos que debe satisfacer el sistema.
- Diseño de solución: en esta tercera fase se realizan los diseños funcionales del sistema de manera que puedan ser testeados con usuarios reales.
- Evaluación del sistema: En esta última fase se evalúa el sistema con usuarios reales y se analizan los problemas de usabilidad detectados.

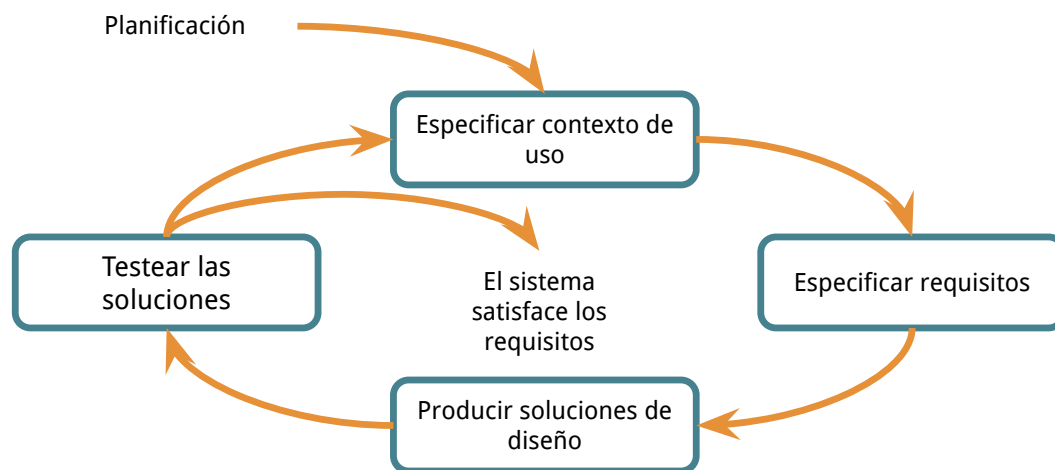


Figura 1.1: Proceso de Diseño Centrado en Usuario (UCD) [24].

Siguiendo este proceso se pueden conseguir soluciones de visualización de información enfocadas al usuario final que mejoran aspectos como por ejemplo: i) usabilidad de la aplicación, ii) credibilidad de la aplicación, iii) eficacia y eficiencia de la aplicación y iv) satisfacción de uso por parte de los usuarios .

Sin embargo, este proceso puede resultar costoso ya que se trata de una labor manual y a su vez los resultados obtenidos difíciles de interpretar y extraer conclusiones si no se dispone de un conocimiento experto en el ámbito de la usabilidad y UX. A su vez, el UCD se centra en el proceso diseño de la interfaz, sin profundizar en cómo y por qué los usuarios interactúan con el HMI y sobre todo en si existen factores externos en el mundo industrial que condicionan la interacción.

El diseño UCD es una metodología generalista muy utilizada en la actualidad para el desarrollo de interfaces, pero que no tiene en cuenta particularidades propias del proceso industrial a la hora de construir o modificar la interfaz. Concibe las diferentes interfaces y la manera de interactuar entre ellas como algo estático, no pudiendo ser modificadas en base a diferentes situaciones que vengan dadas por aspectos del proceso, del usuario o del entorno. En escenarios como el mundo industrial donde los sistemas ciberfísicos generan gran cantidad

de datos o donde la importancia de los mismos varía en el tiempo, este tipo de metodologías no son óptimas. Por ello es necesario disponer de una metodología que analice en profundidad la interacción de operario desde un punto de vista holístico donde se analice la información del usuario, la información del HMI y la información del estado del proceso industrial.

Un análisis exhaustivo de estas tres variables (información de usuario, información del HMI e información del estado del proceso industrial) puede proporcionar una información relevante en relación a la productividad del proceso y por consiguiente proponer una serie de mejoras en el HMI para optimizar la interacción en procesos industriales complejos dando lugar a procesos industriales adaptados a las necesidades, habilidades y capacidades del operario.

Otra problemática a destacar es el desconocimiento del diseñador de la interfaz sobre el proceso industrial en sí. Esto puede dar la posibilidad de no incorporar o destacar información relevante dentro de la interfaz dando pie a la visualización de datos mediante representaciones o interacciones predefinidas, las cuales puede que no sean las más adecuadas para extraer el conocimiento. Poder ofrecer al usuario la representación e interacción de tal modo que su carga cognitiva sea menor a la hora de la toma de decisiones es uno de los mayores retos dentro de la comunidad científica [25]. Varios son los estudios que han analizado exhaustivamente la relación existente entre la carga cognitiva de los operarios a la hora de acometer tareas complejas en diferentes escenarios industriales, revelando una correlación directa entre la complejidad de la tareas y el nivel de carga cognitiva del operario y por consiguiente afectando negativamente en su desempeño en procesos industriales [26, 27].

El proceso industrial y los datos asociados al mismo varían a lo largo del tiempo, es por ello que las interfaces donde representamos la información deberían ser capaces de adaptarse a la situación del proceso. Esta adaptación de la interfaz podría llevarse a cabo por ejemplo ofreciendo los elementos de visualización más adecuados para cada escenario, modificando o añadiendo diferentes maneras de interacción para cada acción o asistiendo al operario en tareas repetitivas que haya detectado el sistema como un patrón. Todas estas adaptaciones se deberían llevar a cabo mediante un sistema inteligente que sea capaz de definir esas adaptaciones pero respetando la coherencia de la interfaz, su integridad y por último y no menos importante, la usabilidad de la misma. En este contexto el uso de las interfaces inteligentes de usuario (IUI - *Intelligent User Interfaces*) pueden ayudar en el proceso de adaptación inteligente de la interfaz a factores como son la interacción del operario y la información relativa al estado del proceso.

Las IUIs tienen como objetivo mejorar la eficiencia, eficacia y naturalidad de la interacción humano-máquina mediante la representación, razonamiento y actuación sobre los modelos de usuario, dominio, tarea, discurso y medio [28]. Es por ello que este tipo de interfaces tienen como principal objetivo mejorar la interacción incluyendo algún componente inteligente a la misma. En el ámbito de esta tesis, mediante el análisis de la información extraída de la interacción del operario con el HMI industrial y de la información referente al estado en el que se encuentra el proceso, se quiere modificar el diseño del HMI industrial a través de una serie de adaptaciones que optimicen la secuencia de interacción para

tareas repetitivas reduciendo el número de pasos y posibles errores. Es en este escenario donde la introducción de las IUI y más concretamente las Interfaces Adaptativas de Usuario (AUI, 'Adaptive User Interfaces'), que se adaptan de manera inteligente en entornos industriales, han surgido como técnica muy prometedora para mejorar la eficiencia de la interacción operario-máquina y reducir el número de errores en el control de procesos industriales.

El uso de técnicas de aprendizaje automático (ML, 'Machine Learning') con los datos obtenidos de las secuencias de interacción operador-máquina e información del proceso industrial, puede proveer información detallada sobre las capacidades y habilidades del operario y a su vez del conocimiento que dispone sobre el proceso industrial. Esta información puede ser transformada en adaptaciones inteligentes que pueden ser integradas en el HMI industrial, ofreciendo una interacción personalizada mejorando la usabilidad. A su vez, a través de estas adaptaciones en el diseño del HMI se consigue reducir el tiempo de interacción, los posibles errores y el número de eventos realizados. Como resultado, las tareas clasificadas como repetitivas en un determinado intervalo de tiempo, y que no generan valor añadido al proceso, pueden ser parcialmente automatizadas gracias a estas adaptaciones inteligentes.

Sin embargo, uno de los aspectos más difíciles de las AUI es inferir el momento óptimo para proponer una adaptación en la interfaz. Si el diseño de la interfaz está constantemente cambiando, la usabilidad de la HMI industrial puede verse penalizada [29], afectando negativamente a la eficacia y productividad del operario, y por consiguiente aumentando el número de errores. Por lo tanto, es fundamental determinar en qué intervalo de tiempo se produce un patrón de interacción operario-máquina con mayor frecuencia. Con esta información, la AUI puede proponer una adaptación en el intervalo de tiempo correcto sin afectar negativamente a la usabilidad del HMI industrial. Cualquier conjunto de acciones repetitivas basadas en el estado del proceso realizado por el operador a lo largo del tiempo, puede considerarse como un patrón de interacción que puede ser automatizado. Estas secuencias de interacción operario-máquina pueden recopilarse y mediante la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático descubrir y aprender los patrones de interacción del operario y sugerir un conjunto de adaptaciones inteligentes temporales en el HMI industrial respetando la usabilidad y la integridad de la interfaz.

Esta tesis doctoral presenta el diseño de un serie de metodologías guiada por datos (*Data-Driven*) que a través del análisis de la información extraída de la interacción operario-máquina, el diseño del HMI y la información referente al estado del proceso infieren una serie de adaptaciones temporales sobre el HMI industrial ayudando al operario en el proceso de toma de decisiones en procesos industriales. A su vez, se demuestra que las adaptaciones propuestas de manera inteligente respetan la integridad y coherencia de la interfaz mediante la detección de patrones de interacción temporal y su posterior uso en el proceso de adaptación. Por último analiza el estado del proceso y la variabilidad del operario a la hora de realizar las secuencias para sugerir las adaptaciones inteligentes. La metodología planteada reduce el tiempo de interacción en secuencias repetitivas de supervisión y control industrial mejorando el rendimiento del operario.

Cabe destacar que la naturaleza y criticidad de los procesos industriales actuales no hace posible que las adaptaciones sean implantadas en tiempo real en diseño del HMI mientras el proceso se encuentra en funcionamiento. Por ello, estas adaptaciones inferidas se describen formalmente como una serie de reglas Evento Condición Acción (ECA, 'Event Condition Action') que han de ser primeramente supervisadas por un experto y posteriormente implementadas por el desarrollador del HMI.

Esta tesis abre un nuevo campo de investigación en el ámbito de las adaptaciones inteligentes de interfaces de usuario en escenarios industriales.

## 1.2 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN, HIPÓTESIS FORMULADAS Y CONTRIBUCIONES

El objetivo principal de esta tesis es el diseño y desarrollo de un conjunto de metodologías guiadas por datos que tomando como entrada: i) los datos de interacción de operario, ii) la descripción formal de un HMI industrial y por último iii) la información referente al estado del proceso, infieran un conjunto de reglas de adaptación temporal para optimizar la interacción operario-máquina.

La mejora en la interacción operario-máquina vendrá dada por una reducción en el número de eventos necesarios para realizar una tarea repetitiva de monitorización y control y a su vez, en una disminución del tiempo en segundos requerido para acometer dicha tarea.

### 1.2.1 Hipótesis formuladas

Las hipótesis que esta tesis trata de demostrar son las siguientes:

- **Hipótesis 1:** Tomando como entrada los datos de interacción y la descripción de un HMI industrial, mediante la aplicación técnicas de aprendizaje automático, es posible inferir un conjunto de reglas de adaptación del HMI en base a tiempo que permiten reducir el número de eventos y el tiempo en segundos necesarios para realizar una tarea de monitorización y control.
- **Hipótesis 2:** Tomando como entrada los datos de interacción y la descripción de un HMI industrial, mediante la aplicación técnicas de aprendizaje automático, es posible inferir un conjunto de reglas de adaptación del HMI en base a tiempo y por operario que permiten reducir el número de eventos y el tiempo en segundos necesarios para realizar una tarea de monitorización y control.
- **Hipótesis 3:** Tomando como entrada los datos de interacción y la descripción de un HMI industrial, mediante la aplicación técnicas de aprendizaje automático, es posible inferir un conjunto de reglas de adaptación del HMI en base a tiempo, operario y estado del proceso que permiten reducir el número de eventos y el tiempo en segundos necesarios para realizar una tarea de monitorización y control.



### 1.2.2 Objetivos asociados a las hipótesis

Para la demostración de las hipótesis formuladas en esta tesis se han establecido una serie de objetivos asociados.

Primeramente, para poder demostrar la hipótesis 1 se han definido los siguientes objetivos:

- **Objetivo 1.1:** Diseño de un sistema de captura datos de interacción operario-máquina de manera no intrusiva.
- **Objetivo 1.2:** Diseño de un lenguaje ligero de descripción formal de interfaz (UIDL, 'User Interface Description Language') que permita indentificar todos los elementos que componen un HMI industrial.
- **Objetivo 1.3:** Diseño de un experimento con usuarios reales para inferir y validar reglas de adaptación en base al tiempo.

A continuación, para poder demostrar la hipótesis 2 se han definido los siguientes objetivos:

- **Objetivo 2.1:** Diseño de un experimento con usuarios reales para inferir y validar reglas de adaptación en base al tiempo por operario.

Por último, para poder demostrar la hipótesis 3 se han definido los siguientes objetivos:

- **Objetivo 3.1:** Diseño de un experimento con usuarios reales para inferir y validar reglas de adaptación en base al tiempo, por operario y estado del proceso.

### 1.2.3 Metodología de investigación

La metodología de investigación seguida en esta tesis se basa en estrategias de diseño, creación, experimentación y la validación de los resultados obtenidos mediante métodos empíricos.

En primer lugar, se ha comenzado haciendo una revisión extensa de la literatura sobre los diferentes campos de investigación en los cuales ésta tesis tiene su encaje. Se han analizado publicaciones recientes en los ámbitos de las Interfaces Inteligentes de Usuario, las Interfaces Adaptativas de Usuario, el análisis de la interacción de usuario con sistemas digitales, la adaptación de procesos industriales desde la perspectiva de operario y por último de la aplicación de diferentes técnicas y métodos Inteligencia Artificial en procesos industriales.

A continuación para obtener los diferentes objetivos asociados a la hipótesis se ha llevado a cabo las siguientes acciones:

- Para la consecución del objetivo 1.1, se ha diseñado un sistema de captura no intrusiva que registra la interacción de un operario con un proceso industrial a través del HMI. Este sistema, almacena los eventos únicos que realiza un operario con el HMI determinados por el *timestamp* y el elemento con el cual ha interactuado.

- Para obtener el objetivo 1.2, una vez investigado los diferentes lenguajes UIDL existentes y vista las limitaciones de cada uno de ellos para formalizar los elementos de cada fabricante, se ha decidido diseñar un UIDL flexible capaz de describir formalmente los elementos del HMI de manera agnóstica al fabricante.
- Para conseguir el objetivo 1.3, se ha diseñado un experimento dentro de un escenario industrial donde diferentes operarios no identificados interactúan de manera repetitiva a lo largo de turno de trabajo sobre el mismo proceso industrial a través del HMI.
- Para conseguir el objetivo 2.1, se ha diseñado un experimento dentro de un escenario industrial donde diferentes operarios identificados interactúan de manera repetitiva a lo largo de turno de trabajo sobre el mismo proceso industrial a través del HMI.
- Para la consecución del objetivo 3.1, se ha diseñado un experimento dentro de un escenario industrial donde diferentes operarios identificados interactúan de manera repetitiva a lo largo de turno de trabajo sobre el mismo proceso industrial a través del HMI registrando la información referente al estado del proceso.

Los experimentos se desarrollaron con operarios reales en un proceso industrial, capturando y analizando la interacción de los mismos por un período de 6 meses. Los resultados obtenidos en los diferentes escenarios se analizaron a través de análisis de datos cuantitativos, utilizando métodos estadísticos y ayudas visuales como tablas y diferentes tipos de gráficos, con el fin de analizar la validez y precisión de los modelos implementados.

Por último, difundimos los conocimientos y experiencias obtenidos en esta tesis a la comunidad científica.

#### 1.2.4 Contribuciones

Las contribuciones principales de ésta tesis se listan a continuación:

- El objetivo 1.1 ha generado como contribución un conjunto de datos de interacción operario-máquina con el registro de todas las acciones realizadas a través del HMI por parte de 34 operarios durante un período de 6 meses a la hora de realizar las tareas de monitorización y control.
- El objetivo 1.2 ha generado como contribución un lenguaje de modelado formal UIDL para el diseño de HMIs industriales. Este lenguaje puede ser utilizado en otro tipo de ámbitos no industriales para poder definir las diferentes interfaces y elementos que constituyen una aplicación de usuario.
- El objetivo 1.3 ha generado como contribución una metodología *Data-Driven* que mediante el análisis de las interacciones realizadas por diferentes operarios en un proceso industrial es capaz de inferir de manera inteligente una serie de adaptaciones en el HMI. Ésta metodología es aplicable en escenarios

industriales donde existen diferentes operarios que interactúan sobre el mismo HMI y no se puede detectar qué operario concreto es.

- El objetivo 2.1 ha generado como contribución una metodología *Data-Driven* que mediante el análisis de la similitud de las interacciones de cada usuario es capaz de detectar la variabilidad del operario a la hora de realizar la tarea de supervisión y control, e inferir una serie de adaptaciones de manera inteligente en el HMI. Ésta metodología permite una personalización para cada operario mejorando el rendimiento.
- El objetivo 3.1 ha generado como contribución una metodología *Data-Driven* que mediante el análisis de las interacciones del operario y el análisis de del estado del proceso es capaz de inferir una serie de adaptaciones. Esta metodología es aplicable en escenarios industriales donde el estado del proceso es variable e influye directamente en la interacción operario-máquina.

### 1.2.5 Publicaciones

A continuación se listan las publicaciones científicas desarrolladas que están directamente relacionadas con el trabajo de esta tesis:

- **Reguera-Bakhache D**, Garitano I, Uribeetxeberria R, Cernuda C, Zurutuza U., Lasa G. An Adaptive Industrial Human-Machine Interface to Optimise Operators Working Performance. In 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) 2021 IEEE.
- **Reguera-Bakhache D**, Garitano I, Uribeetxeberria R, Cernuda C. An Industrial HMI Temporal Adaptation based on Operator-Machine Interaction Sequence Similarity. In 2021 25th IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2021 IEEE.
- **Reguera-Bakhache D**, Garitano I, Uribeetxeberria R, Cernuda C, Zurutuza U. Data-Driven Industrial Human-Machine Interface Temporal Adaptation for Process Optimization. In 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFa) 2020 Sep 8 (Vol. 1, pp. 518-525). IEEE.
- G. Marreiros, P. Craamer, **D. Reguera-Bakhache**, I. Garitano, R. Gonzalez, M. G. Novak, A. Kancilija, R. Uribeetxeberria, J. Valtonen, and A. Vidmar, "From kpi dashboards to advanced visualization," *The MANTIS Book: Cyber Physical System Based Proactive Collaborative Maintenance*, p. 239, 2019.
- Aranburu Zabalo E, Lasa Erle G, **Reguera-Bakhache D**, Gerrikagoitia Arrien J, Iruretagoiena Irazusta G. Metodología UCAD: Nuevo procedimiento de diseño de interfaces centrado en el usuario para la industria 4.0. *Dyna new technologies*. 2017 Jan 1;4(1):15-p.

### 1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente documento está dividido en 6 capítulos. El primer capítulo introduce al lector en el escenario actual de la adaptación inteligente de interfaces industriales y a su vez provee una descripción de la problemática actual junto con la motivación principal que impulsan al autor a dar solución a los problemas identificados. En este capítulo a su vez, se exponen los principales objetivos que debían ser cubiertos durante desarrollo del trabajo de tesis y las hipótesis que responden a los objetivos propuestos. Del mismo modo se describen las principales contribuciones que se han realizado en la tesis así como la metodología que se ha seguido.

En el capítulo 2 se hace una revisión crítica de la literatura científica actual existente en los diferentes ámbitos en los cuales está englobada la tesis. A su vez identifica diferentes cuestiones de investigación abiertas que plantean oportunidades para seguir avanzando la investigación en éste campo.

El capítulo 3 presenta una primera metodología *Data-Driven* para realizar adaptaciones temporales inteligentes en un HMI industrial en un escenario donde no se dispone de información sobre qué usuario está interactuando con el sistema a través del HMI. Esta adaptación temporal inteligente tiene en los criterios de Usabilidad y UX establecido respetando la integridad y coherencia de la interfaz.

En el capítulo 4 se plantea una metodología *Data-Driven* capaz de personalizar la interacción operario-máquina a través del análisis de similitud de las secuencias de interacción proponiendo un conjunto de reglas de adaptación temporal. Esta personalización tiene como objetivo mejorar el rendimiento del operario reduciendo el número de eventos y el tiempo de interacción.

El capítulo 5 presenta una metodología *Data-Driven* la cual analizando la interacción operario-máquina y la información referente al estado del proceso genera una serie de adaptaciones temporales en la interfaz optimizando la interacción operario-máquina en escenarios donde el estado del proceso influye en la interacción del operario.

Para finalizar, el capítulo 6 plantea las conclusiones obtenidas en la tesis, las contribuciones generadas y el trabajo futuro.

# Capítulo 2

---

## **ESTADO DEL ARTE**

---

El trabajo realizado en esta tesis se centra en la adaptación inteligente de los HMIs en escenarios industriales. Por ello, es necesario proveer de contexto y explicar la evolución y naturaleza de las interfaces adaptativas de usuario.

Este capítulo presenta una descripción general de las investigaciones previas realizada por la comunidad científica en el campo de las interfaces adaptativas de usuario mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial, y más concretamente en la adaptación de los HMIs en escenarios industriales, para situar el objetivo de esta tesis. Al final del mismo, se realiza una explicación de los diferentes trabajos encontrados en la literatura académica haciendo una revisión crítica de ellos.

## 2.1 DEFINICIONES

Para introducir al lector en el campo de investigación de la adaptación inteligente de interfaces de usuario en escenarios industriales, en esta sección se van a definir una serie de términos que serán utilizados frecuentemente a lo largo del documento.

Baheti *et al.* [30] definen un sistema ciberfísico (CPS, 'Cyber-Physical System') a "la nueva generación de sistemas con capacidades informáticas y físicas integradas, que permiten interactuar con ellos de diferentes maneras". Esta capacidad de interactuar con ellos es un factor clave para el desarrollo tecnológico dentro de la computación, las comunicaciones o la monitorización y control.

Dentro del ámbito de la automatización industrial, en el cual se engloba esta tesis, y más concretamente dentro de los sistemas de monitorización y control, nos encontramos con los HMI. Bangermann *et al.* [31] definen los HMI como "las diferentes interfaces gráficas que informan al operario sobre el estado proceso industrial". En estas interfaces es donde se representa la información de manera visual y es utilizada por los operarios humanos para supervisar y controlar los procesos vinculados al SCADA.

Maybury [28] describe las interfaces inteligentes de usuario (IUI - 'Intelligent User Interfaces') como "interfaces gráficas de usuario a las cuales añadiéndoles algún tipo de inteligencia son capaces de mejorar el proceso de interacción entre el usuario y la máquina". De esta manera son capaces de determinar el modo óptimo de representación de la información analizando diferentes factores externos como pueden ser usuario o contexto [32]. Esta adaptación del modo de representación, han derivado en el concepto de Interfaces Adaptativas de Usuario (AUI - 'Adaptive User Interfaces') el cual, fue definido por Langley [33] como "una interfaz de usuario la cual mediante adaptaciones inteligentes, en este caso a través del uso de técnicas de *Machine Learning*, se optimice la interacción con el usuario". De esta manera, aprendiendo de la información referente al usuario se pueden ofrecer adaptaciones por ejemplo en el contenido, la navegación o la interacción [34].

Nielsen [35] define el término de usabilidad como "un atributo cualitativo que evalúa la facilidad de uso de las interfaces de usuario". Esta facilidad de uso tiene en cuenta diferentes aspectos como son i) la capacidad de aprendizaje cuando el usuario accede al sistema por primera vez, ii) la eficiencia del usuario a la hora de realizar las tareas una vez conocido el diseño del sistema, iii) la memorabilidad por parte del usuario para realizar las tareas de manera óptima cuando transcurre un período sin utilizar el sistema, iv) el número de errores que comete y gravedad de los mismos y por último v) la satisfacción del usuario a la hora de utilizar el sistema.

La experiencia de usuario (UX - 'User Experience') es uno de los factores más importantes dentro de la interacción Persona-Máquina. Hassenzahl *et al.* [36] definen el UX como "una consecuencia de varios factores como son: i) el estado en el que se encuentra el usuario incluyendo sus predisposiciones, expectativas, necesidades, estado de ánimo, ii) las características del sistema como pueden ser

la complejidad, la usabilidad o la funcionalidad y por último iii) el contexto en el cual produce la interacción”.

Otro de los términos que debemos definir es el de secuencia de interacción operario-máquina. Partiendo de la definición planteada por Perer *et al.* [37] se define una secuencia de interacción como un grupo ordenado de eventos realizados por el operario en una interfaz. En el ámbito de esta tesis las condiciones de inicio de secuencia y final de secuencia son conocidas, por lo que podemos determinar el contenido de la misma.

Para finalizar, tomando como referencia la definición propuesta por Aztiria *et al.* [38] para definir un patrón, definimos patrón de interacción, a un conjunto de eventos realizados por el operario, en este caso secuencias de interacción a través del HMI, que son frecuentes en el tiempo.

## 2.2 VISIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE CONTROL INDUSTRIAL

Los Sistemas de Control Industrial (ICS - 'Industrial Control Systems') son un grupo de sistemas e instrumentación asociada de monitorización y control utilizado en la actualidad en los diferentes procesos industriales automatizados. Estos sistemas ICS, incluyen una variedad de dispositivos como los Sistemas de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA - 'Supervisory Control And Data Acquisition'), los Sistemas de Control Distribuido (DCS - 'Distributed Control Systems'), los Sistemas de Control de Procesos (PCS - 'Process Control Systems'), los Controladores Lógicos Programables (PLC - 'Programmable Logic Controllers') y los HMI. Estos sistemas ICS permiten gestionar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otros dispositivos o sistemas [39].

Los sistemas ICS han evolucionado notoriamente desde los primeros sistemas de control programables diseñados en 1968 por Richard E. Morley [40] y en la actualidad pueden encontrarse en un amplio espectro de campos de aplicación, como son por ejemplo las centrales eléctricas y nucleares, refinerías de petróleo y gas distribuidas por todo el mundo, el sector manufacturero (Por ejemplo: la industria de la automoción, la industria aeroespacial o la industria de la alimentación), el transporte o el control del agua y los residuos, entre otros [31]. El cambio originado en la industria, derivando en la denominada *Smart Factory*, ha hecho que estos sistemas cobren vital importancia no solo para capturar la información en tiempo real referente al proceso sino que para a través del análisis de los datos capturados y almacenados se pueda extraer conocimiento y por consiguiente optimizar el proceso industrial en términos de productividad, reducción de costes o mejora de la calidad [41].

### 2.2.1 Arquitectura y componentes de los sistemas de control industrial

Los amplia mayoría de procesos industriales implantados en la actualidad dependen de los sistemas SCADA y DCS para su correcto funcionamiento. Los sistemas

SCADA tienen como objetivo capturar la información en tiempo real referente al proceso automatizado desde ubicaciones remotas para permitir su control y supervisión, incluyendo su presentación visual al operario a través de los HMIs. Las primeras arquitecturas de los sistemas SCADA/DCS fueron diseñadas para ser implementadas en entornos industriales controlados, sin embargo el diseño e implementación de estas arquitecturas ha evolucionado considerablemente mejorando su funcionalidad a través de nuevos dispositivos y minimizando los costes de integración mediante nuevas arquitecturas y estándares [42,43].

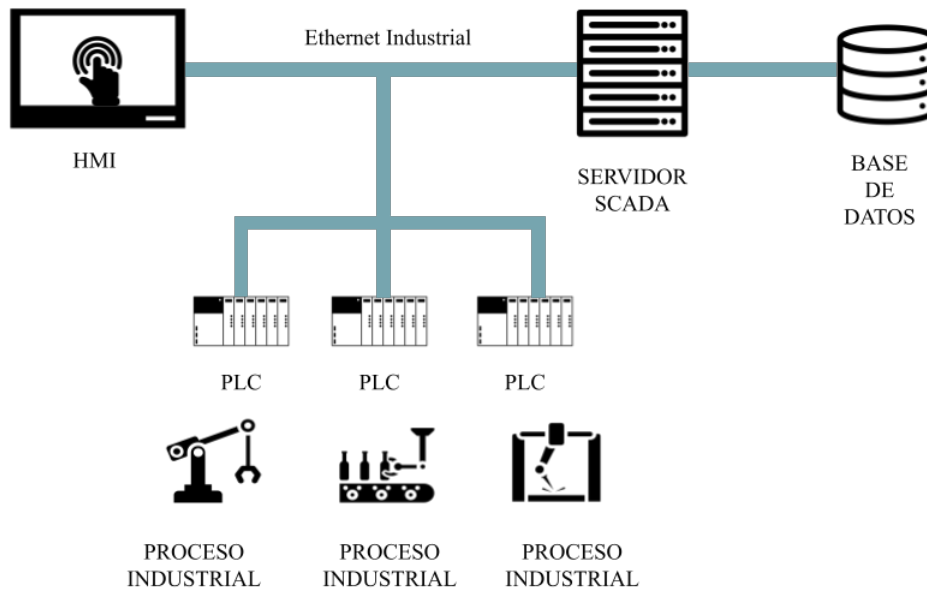


Figura 2.1: Arquitectura simple de un sistema de monitorización y control industrial

En la figura 2.1 se puede observar una arquitectura simple de un proceso automatizado. Esta arquitectura está compuesta por una serie de procesos industriales con sus diferentes actuadores y sensores conectados a los PLC. Los PLC son dispositivos industriales que tienen la capacidad de controlar procesos complejos mediante instrucciones almacenadas que han sido programadas por el usuario. El servidor SCADA contiene la lógica de control y es el encargado de controlar los dispositivos PLC. El servidor SCADA integra los sistemas de adquisición de datos con los sistemas de transmisión de datos y software HMI para proporcionar un sistema de supervisión y control centralizado de numerosas entradas y salidas de procesos. La base de datos se encarga de registrar y almacenar toda la información referente al proceso para que pueda ser accedida a posteriori para realizar diversos análisis. Por último los HMI permiten la monitorización de manera visual de la información referente al proceso.

La información mostrada al operario puede contener información relativa al estado del proceso industrial, información histórica de las diferentes variables, alarmas e informes. A su vez, permite al operario interactuar directamente con el proceso mediante el ajuste y configuración de diferentes parámetros o por ejemplo para realizar diferentes secuencias procedimentadas. Es por ello que la manera en cómo se representa la información y los mecanismos de interacción ofrecidos al operario deben respetar criterios de usabilidad y UX reduciendo su complejidad para así ayudarle en el proceso crucial de toma de decisiones [44].



### 2.2.2 Análisis y diagnóstico de sistemas de monitorización y control industrial

En la actualidad, un amplio conjunto de los proyectos relacionados con la monitorización y diagnóstico de sistemas CPS se basan en entender qué está pasando o predecir que va a pasar en base a datos históricos [45–47]. Para tal fin se necesita trabajar con modelos de datos. Estos modelos de datos, como plantean Niggerman *et al.* [48], son difíciles de identificar, verificar, comprender y a menudo se encuentran incompletos.

Una alternativa muy prometedora cuando se trabaja en este tipo de proyectos es el enfoque basado en datos o *Data-driven* [49], donde se aprovecha la gran cantidad de datos generados y almacenados para crear, entrenar y testear nuestros modelos. Este enfoque ofrece numerosas ventajas a la hora de monitorizar y diagnosticar CPS como pueden ser en la detección de fallos o en la identificación de diferentes anomalías [50].

Por otro lado, cuando se utilizan este tipo de enfoques se ha de hacer frente a diferentes retos como puede ser el diseño y desarrollo de sistemas de adquisición y almacenamiento de datos en tiempo real, el análisis de los datos para la construcción de modelos o la inclusión de factores humanos en el diseño y desarrollo de los HMI [51] con el objetivo de transmitir la información del proceso de manera clara, concisa y eficaz al operario.

Estos retos que se plantean han dado pie a contribuciones muy interesantes dentro de la comunidad científica en diversos campos como puede ser la inteligencia artificial enfocada a análisis de datos de procesos industriales [52, 53] o la combinación de la analítica visual y aprendizaje automático [54] a las tareas de monitorización y diagnóstico de procesos industriales [55, 56].

Esta tesis tiene como objetivo analizar la información referente al proceso junto con la interacción realizada por el operario con el HMI para que mediante una serie de adaptaciones inteligentes mejorar la interacción humano-máquina en escenarios industriales. Esta mejora de la interacción dará pie a una disminución en la complejidad del proceso de toma de decisiones por parte del operario.

Para ello, mediante técnicas de análisis de datos se van a analizar diferentes variables y factores agrupados en dos grandes bloques:

- Por una parte se va a analizar el proceso industrial y su relación directa en la interacción operario-máquina. Las adaptaciones basadas en el proceso industrial se enfocan principalmente en mejorar el entendimiento del proceso por parte del operario simplificando la visualización de información.
- Un segundo bloque es el análisis de la interacción operario-máquina. Entender y aprender del operario para ofrecerle información no solo personalizada sino que le permita realizar su cometido de manera más sencilla respetando los criterios de usabilidad establecidos y la integridad del HMI.

## 2.3 INTERFACES HUMANO-MÁQUINA INDUSTRIALES

Los HMI son una serie de dispositivos industriales en los cuales, mediante una interfaz gráfica de usuario, se visualiza y se establece la información referente a los procesos de control industrial. Estos dispositivos HMI permiten una comunicación eficaz con los diferentes dispositivos industriales, como por ejemplo los PLC, para monitorizar y controlar el proceso, presentando la información de manera entendible al operario.

Los HMIs industriales abarcan un grupo de dispositivos tecnológicos que van desde paneles de control físico con diferentes botones hasta pantallas gráficas en las cuales se ejecuta un software HMI específico de cada fabricante. Cabe destacar que **el dispositivo HMI engloba todos los elementos visuales y objetos interactivos que un operario verá, interactuará para realizar las tareas de monitorización y control recibir respuesta sobre esas acciones.** A su vez, son dispositivos vitales dentro del proceso de control industrial puesto que ayudan al operario en la toma de decisiones.

Son muchos los fabricantes de dispositivos de control industrial que desarrollan HMIs propietarios para incorporarlos a nivel de planta y así poder monitorizar y controlar el proceso. Las características de estos HMIs han evolucionado a lo largo de los años pasando de los primeros dispositivos donde la interacción operario-máquina se basaba en diodos luminosos y botones físicos a los sistemas actuales donde se incorporan nuevos modelos de visualización o nuevas tecnologías como son la realidad virtual (VR - 'Virtual Reality'), la realidad aumentada (AR - 'Augmented Reality') o la inteligencia artificial. La inclusión de estas tecnologías en el diseño y desarrollo de los HMI ha cambiado por completo el concepto de entorno de trabajo, derivando en el término conocido como operador 4.0, que tiene como objetivo hacer partícipe al operario en el proceso industrial, obteniendo como resultado empresas más eficientes [57].

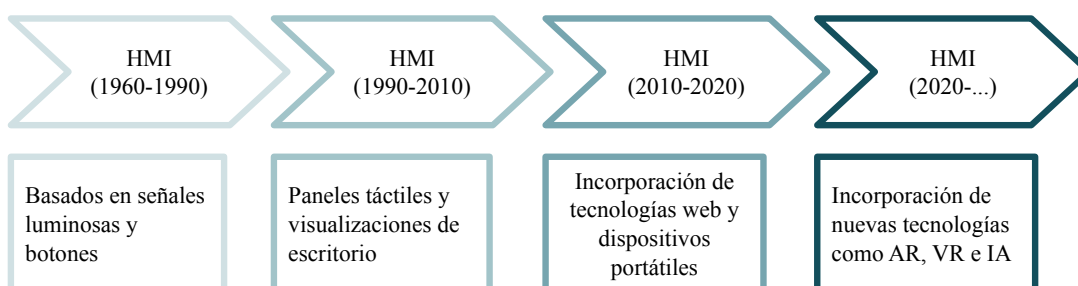


Figura 2.2: Evolución tecnológica de los HMIs desde 1960 hasta la actualidad [58].

La figura 2.2 resume la evolución experimentada por los HMIs industriales desde sus primeras versiones en los años 60 hasta los HMIs que incorporarán las empresas en el futuro. Las primeras versiones de los HMIs eran dispositivos situados en las salas de control los cuales mediante señales luminosas y botones físicas permitían al operario supervisar y controlar el proceso industrial. A partir de los años 90, la evolución de los HMIs industriales viene dada por

la incorporación de pantallas táctiles y el desarrollo de aplicaciones de escritorio, permitiendo al operario supervisar el proceso mediante la visualización de información. Sin embargo, estas aplicaciones se basaban exclusivamente en visualizar información de proceso dejando al margen aspectos importantes como son la usabilidad y la experiencia de usuario. En los últimos años, el auge de las tecnologías web así como la inclusión de nuevos dispositivos portátiles en los escenarios industriales, han supuesto una evolución en los HMIs, permitiendo nuevas maneras de interacción gestual y una supervisión y control del proceso de manera remota. Por último, nuevas tecnologías emergentes como son la AR, la VR y la IA, han transformado los HMIs hacia sistemas que permiten realizar las tareas de supervisión y control de manera más eficiente, asistiendo al operario en tareas complejas y mejorando su rendimiento.

El diseño actual del *software* que utilizan los HMIs se encuentra influenciado por varios aspectos como son la ergonomía en el proceso de interacción del operario [59], el análisis de factores psicológicos a la hora de diseñar [60] o la inclusión de nuevas tecnologías [61] en el proceso de implementación, permitiendo un funcionamiento eficiente y usable que tiene como objetivo reducir el número de posibles errores. Del mismo modo, en términos de *hardware*, entornos hostiles como son los escenarios industriales donde el polvo, la suciedad o la temperatura son factores ambientales habituales, han hecho que los diferentes fabricantes hagan especial hincapié en mejorar la longevidad y durabilidad de los mismos.

Esta tesis se centra en el análisis de la interacción operario-máquina a través del HMI para proveer una serie de adaptaciones inteligentes en la interfaz. Mediante el uso de técnicas de Inteligencia Artificial, y de manera agnóstica al fabricante del HMI, analizar los datos obtenidos de la interacción operario-máquina e inferir una serie de adaptaciones en la interfaz para mejorar la eficiencia del operario facilitándole las tareas de monitorización y control de procesos industriales respetando los criterios de usabilidad y experiencia de usuario.

## 2.4 ADAPTACIÓN INTELIGENTE DE INTERFACES HUMANO-MÁQUINA INDUSTRIALES

A la hora de diseñar y desarrollar las interfaces de usuario una de las metodologías más utilizadas hoy en día por los diseñadores es el diseño UCD. Esta metodología se centra en el usuario final teniéndolo en cuenta en todas las fases del diseño, entendiendo sus necesidades y haciendo especial énfasis en ofrecerle soluciones usables y entendibles [62].

Este enfoque plantea desarrollar unas soluciones basadas en los requisitos de usuario y que sean evaluadas, todo ello de una manera iterativa. De esta manera, incorporamos a la solución final esas soluciones ya testeadas y probadas con usuarios reales. Gracias a ello conseguimos que los principios de usabilidad se vean cumplidos. También utilizando esta metodología a la hora de crear interfaces podemos ver el impacto positivo en términos de efectividad y eficiencia [63].

Como se explica en la sección 1.1, la problemática reside en cuando existe una sobrecarga de información o cuando la información del proceso a visualizar no es algo estático y varía en el tiempo [64]. El enfoque de UCD a la hora de diseñar y crear interfaces no contempla que el escenario puede ser algo dinámico como son los entornos industriales y por ello las interfaces diseñadas para visualizar la información pueden variar en contenido, presentación o métodos de interacción. Esta variación no es solo referente a la cantidad o diversidad de la información sino que también por ejemplo a la importancia de la misma que pueden afectar a la arquitectura de información de la interfaz. La arquitectura de información es la definición de los elementos que vamos a representar (mapeo de dato a forma) y la manera representar (uso de fuentes y colores) en la pantalla, su posición y jerarquía en la misma.

Técnicas de prototipado rápido de interfaces [65,66] nos pueden ayudar a la hora de priorizar, ordenar y categorizar los contenidos a representar en la interfaz pero cuando el contenido es variable, estas aproximaciones no son óptimas puesto que no podemos redefinir la arquitectura de información en tiempo real.

El área de investigación de las IUI y más concretamente mediante la adaptación inteligente de las interfaces de usuario consigue hacer frente a estos problemas. De esta manera conseguimos generar una serie de adaptaciones en base a los cambios que puedan haber en el proceso o por ejemplo al operario que esté interactuando con la interfaz, aspectos que nos son contemplados en enfoques como el diseño centrado en usuario. Para estas adaptaciones nos podemos ayudar de técnicas de análisis de datos.

### 2.4.1 Visión general de las interfaces inteligentes de usuario

A través de la adaptación inteligente se consigue que las interfaces gráficas de usuario (GUI - 'Graphic User Interface') dispongan de una flexibilidad para poder adaptarse al usuario y así conseguir una reducción en el número de errores y un decremento en el tiempo de y número de eventos de interacción anticipándose

a las necesidades del operario [67]. Estas adaptaciones inteligentes llevadas a cabo mediante la aplicación de técnicas de IA, dotan a la GUI de la capacidad para adaptarse al usuario, contexto y situación, y a su vez poseer la habilidad de resolver diferentes problemas como puede ser la sobrecarga de información, mejorando notablemente la usabilidad, la flexibilidad y la experiencia de usuario [68].

Son varias las áreas de investigación las que influyen directamente sobre el estudio de las IUI. Ehlert [69] plantea la investigación de las IUI como una combinación de aspectos relacionados con la psicología, la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y el estudio de la interacción Humano-Máquina (HCI - 'Human Computer Interaction'). De este modo, todos los avances y desarrollos relacionados en estos tres campos, pueden influenciar positivamente en este área.

Las IUI se focalizan principalmente en mejorar la interacción entre el usuario y el sistema. Varios son los estudios realizados que plantean abordar esta mejora de diferentes maneras, como por ejemplo:

- Añadiendo nuevas formas de interacción como pueden ser por ejemplo el reconocimiento facial para analizar las emociones del usuario [70], procesamiento del habla para el diseño de interfaces conversacionales [71] o la incorporación del *eye-tracking* para interactuar con la interfaz [72].
- Utilizando la visualización avanzada de datos para una mejor comprensión de la información mostrada mediante por ejemplo la visualización interactiva de datos en procesos complejos [73] o la inclusión de técnicas de realidad virtual y realidad aumentada para una visualización de información más efectiva [74,75].
- Generando de nuevas interfaces de usuario personalizadas mediante técnicas inteligentes [76] con el objetivo de mostrar la información de forma clara al usuario mejorando su satisfacción [77].

Gracias al uso de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático (ML - 'Machine Learning'), las IUI pueden lidiar con diferentes *inputs* y *outputs* para asistir al usuario y solucionar distintas problemáticas que las interfaces no inteligentes no pueden.

Una primera problemática a la cual las interfaces tradicionales no pueden dar solución es la creación de sistemas personalizados mediante la adaptación de las interfaces a los usuarios y sus necesidades. Mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial se pueden conseguir interfaces personalizadas que mejoren la experiencia de usuario. Mezhoudi *et al.* [78] plantearon un sistema basado en reglas capaz de definir una serie de personalizaciones en la interfaz basándose en el *feedback* proporcionado por el usuario y por consiguiente mejorando notablemente la experiencia de usuario. El aprendizaje profundo también ha sido utilizado para los procesos de personalización inteligente. Soh *et al.* [79] plantearon un sistema que mediante el uso de Redes Neuronales Recurrentes (RNN - 'Recurrent Neural Network'), analizaba la interacción realizada por el

usuario y posteriormente generaba una serie de adaptaciones de contenido en la interfaz basándose en métodos *nearest-neighbor* en espacios euclídeos.

Otra de las problemáticas actuales en las interfaces tradicionales es la gestión de la sobrecarga de la información mostrada. Las interfaces no inteligentes no son capaces de gestionarla repercutiendo negativamente en la interacción Humano-Máquina [64]. Una manera de solventar esta problemática puede ser la arquitectura de información variable, que consiste en categorizar, priorizar y seleccionar los contenidos e información más relevantes para ese momento. En este contexto, la visualización adaptativa de información cobra especial interés. Son varios los trabajos que plantean adaptar la información en base al análisis del usuario. En [80] los autores planetaron un sistema capaz de analizar las características de los datos y seleccionar la visualización más adecuada al usuario. Toker *et al.* [81] analizaron el impacto de las visualizaciones adaptativas entre gráficos de barras y gráficos de radar focalizándose principalmente en el análisis de factores de usuario como la rapidez perceptiva, la memoria verbal y visual y por último el grado de *expertise* de usuario. Steichen *et al.* [82] mediante el análisis de la información obtenida a través del trackeo de mirada (*eye-tracking*) inferían información referente a características de usuario y de contexto para definir una serie de adaptaciones en la visualización de información. El impacto en términos de rendimiento y satisfacción de usuario de las visualizaciones adaptativas ha sido a su vez estudiado en diferentes trabajos [83,84] demostrando una mejora en la experiencia de usuario a través del uso de estas técnicas.

Asistir a los usuarios en tareas complejas para obtener un decremento en el tiempo de interacción o minimizar el número de errores es otro de los aspectos que las interfaces tradicionales no pueden resolver. En estos escenarios, las IUI hacen uso de técnicas de inteligencia artificial para el reconocimiento de patrones de interacción y así definir una serie de modificaciones en la interfaz para automatizar tareas repetitivas. Liu *et al.* [85] mediante el análisis de la interacción de usuario e identificación de patrones de comportamiento eran capaces de asistir al usuario en diferentes tareas reduciendo el número de posibles errores de interacción. En [86] los autores implementaron un sistema, el cual a través de un algoritmo era capaz de sugerir geometrías a la hora de diseñar piezas 3D reduciendo considerablemente el tiempo de interacción. En el ámbito de la robótica se ha utilizado la detección de patrones para la automatización parcial de las tareas. Bosco *et al.* [87] diseñaron un sistema que analizaba las interacciones de los usuarios para descubrir rutinas totalmente deterministas y, por consiguiente, susceptibles de ser automatizadas reduciendo los posibles errores.

Por último, la incorporación nuevas maneras de interacción ha dado pie a las denominadas interfaces multimodales [88]. Estas interfaces permiten la interacción con el usuario de diferentes maneras y métodos teniendo en cuenta sus capacidades y limitaciones. Este concepto de multimodalidad ha sido incorporado satisfactoriamente en ámbitos como la accesibilidad, permitiendo un acceso universal independientemente de las limitaciones físicas o sensoriales de los usuarios [89]. El uso de herramientas como Egoki, han permitido diseñar y crear interfaces de usuario a medida permitiendo un acceso universal de los sistemas interactivos [90,91]. Katan *et al.* [92] mediante la aplicación del aprendizaje automático interactivo (IML - 'Interactive Machine Learning') desarrollaron un

sistema capaz de crear y customizar interfaces controladas gestualmente para usuarios con diversidad cognitiva y física. En [93], los autores presentaron el sistema llamado *Adaptation Integration System* basado en el *framework* de referencia Cameleon [94]. Este sistema era capaz de generar una serie de reglas de adaptación en tiempo de diseño y ejecución, permitiendo generar interfaces de usuario a medida mejorando la accesibilidad de las mismas. Valencia *et al.* [95], mediante el uso de técnicas de *transcoding*, permitían la adaptación de interfaces táctiles a personas con limitaciones motrices.

Como conclusión, podemos afirmar que el uso de las IUI aportan numerosas ventajas en el proceso de personalización de interfaces y por consiguiente consiguiendo interfaces más flexibles que mejoran la interacción Humano-Máquina. Sin embargo, como argumenta Höök [96] es necesario tener en cuenta varios aspectos como son i) la necesidad de disponer de métodos estandarizados para desarrollar IUIs, ii) analizar y mejorar los principios de usabilidad de las IUI, y, por último, iii) comprender las diferentes maneras en que la interfaz puede utilizar la inteligencia artificial para mejorar la interacción.

### 2.4.2 Interfaces adaptativas inteligentes de usuario

Las AUI son aquellas GUI que pueden modificar su comportamiento para adaptarse tanto al usuario, como al proceso y al contexto, modificando no solo el contenido a mostrar, sino que también qué acciones puedes realizar con ella sin penalizar la usabilidad de la misma [97,98].

En los últimos años, ha habido un especial interés en la investigación de las AUI y su aplicación a diferentes ámbitos como puede ser la mejora de la accesibilidad [99,100] o la obtención de interfaces personalizadas para mejorar la experiencia de usuario y la usabilidad [101,102].

Una de las metodologías más utilizadas para el desarrollo de AUI se ha centrado en el análisis del contexto de uso como factor principal en el proceso de adaptación. Son varios los estudios encontrados en la literatura que analizan el contexto para determinar las adaptaciones a realizar en la interfaz. El sistema SUPPLE presentado en [103], generaba una serie de interfaces automáticas capaces de adaptarse al contexto centrándose en la especificaciones de la interfaz, las características del dispositivo y la información del usuario.

Genaro *et al.* [104] presentaron un marco de referencia para diseñar un sistema de adaptación de interfaces haciendo especial énfasis en el análisis de la plataforma, el modelo de usuario y la información del entorno. Garzon *et al.* [105] trabajaron la adaptación basada en contexto utilizando un modelo de usuario aumentado mediante la incorporación de directrices a seguir en el proceso de personalización de la interfaz. En [106], los autores analizaron la variabilidad del contexto en escenarios cambiantes y también aspectos emocionales del usuario como *inputs* en el proceso de adaptación. Aunque estos trabajos basados en el análisis de contexto mejoran la usabilidad y la UX de las interfaces mediante la adaptación, ninguno de ellos utiliza la información extraída del análisis de interacción del operario en el proceso de adaptación.

El análisis de la interacción de usuario como *input* en el proceso de adaptación, puede proveer información relevante sobre su comportamiento, de esta manera se pueden conseguir sistemas personalizados mejorando el rendimiento del operario. Varios son los trabajos que se han centrado en el estudio de la interacción del usuario en el proceso de adaptación de la interfaz. Mediante el análisis de cómo interactúa el usuario con la interfaz, comúnmente denominado *clickstream analysis*, se consigue entender el comportamiento del usuario [107] y por consiguiente obtener interfaces más personalizadas reduciendo el número de posibles errores. El término *clickstream* puede ser definido como la secuencia de interacción que el usuario realiza con los diferentes elementos de la interfaz. Gotz *et al.* [108] plantearon mediante el análisis del comportamiento del usuario a través de la interacción con la interfaz, inferir una serie de recomendaciones en la interfaz. En [109] se presentó un *framework* capaz de rediseñar los componentes de una interfaz web mediante el análisis de la interacción de usuario. El *framework* analizaba el comportamiento del usuario y generaba una serie de adaptaciones en la interfaz mediante la generación de reglas de estilo CSS. Bouzit *et al.* [110] se centraron en la adaptación inteligente de los elementos de un menú. Su sistema identificaba los elementos más y menos seleccionados por parte de los usuarios, y posteriormente, proponía una re-ordenación de los elementos que constituían el menú.

Si bien el uso del conocimiento extraído del análisis de la interacción Humano-Máquina puede ayudar en el proceso de adaptación, los trabajos mencionados no tienen en cuenta las limitaciones y características de los escenarios industriales actuales que se caracterizan dos factores fundamentalmente: i) una alta especialización de los operarios que supervisan y controlan los procesos industriales y ii) la alta complejidad de los mismos que influyen directamente en la actividad y el rendimiento del operario.

Por otro lado, la aplicación de la AUI en escenarios industriales ha sido examinada en varios trabajos. En [111] se presentó un *framework* multimodal adaptativo que permitía ayudar a los operarios en procesos complejos de ensamblaje. Mediante el uso de diferentes dispositivos periféricos que reconocían los gestos de los operarios el sistema se adaptaba guiando al operario en las tareas catalogadas como complejas. Neira *et al.* [112] desarrollaron y testearon un sistema para desarrollar AUI en escenarios industriales. El sistema de adaptación contemplaba como factores relevantes la información de los operarios, sus roles y el estado del proceso productivo. Por otro lado, en [113], los autores presentaron un sistema que mediante el análisis del contexto industrial presentaba la información más relevante al operario encargado del proceso industrial. Tervo *et al.* [114] analizaron el impacto de la adaptación de las variables estáticas del HMI en el rendimiento del operario. En [115], los autores presentaron un sistema adaptativo para las tareas de *scheduling* en planta el cual facilitaba al operario las tareas de toma de decisiones. En [116] se presentó el *framework* INCLUSIVE, el cual a través del análisis de las características y limitaciones del operador, realizaba una serie de adaptaciones para mejorar la usabilidad del sistema y la satisfacción del operador, y por consiguiente mejorar su rendimiento.

Hemos de añadir que una vez realizado el proceso de adaptación inteligente, estos cambios o recomendaciones han de ser supervisados por los desarrollados-



res del HMI para analizar su validez. Las adaptaciones realizadas de manera inteligente, deben respetar los criterios de integridad, usabilidad y coherencia establecidos. Varios son los trabajos que analizan el impacto de las AUI en la satisfacción final del usuario. Findlater *et al.* [117] planteron un estudio de la influencia de las adaptaciones sobre las satisfacción del usuario final. Trabajos como [118, 119] han demostrado como las AUI tienen un impacto positivo en la usabilidad puesto que el uso de estas interfaces en tareas complejas facilita el uso al usuario final.

## 2.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se ha planteado una revisión exhaustiva de la literatura académica aportando una visión general de los diferentes ámbitos en los que queda englobada la tesis.

Primeramente se ha presentado una visión general de los sistemas de control industrial y más concretamente de los HMI actuales. En esta sección se ha analizado la evolución que han sufrido los dispositivos HMI no solo desde el punto de vista de componentes sino también de nuevas funcionalidades y tecnologías emergentes que están siendo introducidas.

A continuación se han descrito los trabajos más relevantes en los campos de las IUI y de las adaptaciones inteligentes de interfaces, identificando sus características y limitaciones. Los primeros trabajos analizados, los cuales se centran en adaptaciones basadas en modelos, son aproximaciones válidas puesto que tienen en cuenta para la adaptación la interacción del usuario y el contenido, dos de los elementos principales dentro de un proceso de visualización de información. Sin embargo, en el ámbito en el que se centra esta tesis, se quiere poder aprender del usuario y proceso a lo largo de tiempo pudiendo ofrecer diferentes adaptaciones en base a patrones detectados. Es por este motivo que el enfoque basado en modelos no sería una opción completa.

Por otro lado, los trabajos analizados que se basan en adaptaciones mediante técnicas de aprendizaje automático son enfoques válidos puesto que permiten aprender del usuario para ofrecer adaptaciones personalizadas, sin embargo no contemplan las características y limitaciones de los escenarios industriales y más concretamente de los HMI. Todos estos trabajos analizados plantean la incorporación de las AUI en escenarios industriales, sin embargo ninguno de ellos analiza la interacción Humano-Máquina a través de los HMIs industriales para realizar el proceso de adaptación inteligente.

Por último, en este capítulo se han descrito las áreas de trabajo de investigación futuras en relación a la carencias identificadas en la aplicación de las AUI en escenarios industriales.



# Capítulo 3

---

## **METODOLOGÍA GUIADA POR DATOS PARA LA ADAPTACIÓN DE UN HMI EN BASE A TIEMPO**

---

En la actualidad, existen escenarios industriales donde diferentes operarios sin una identificación previa con el HMI industrial, interactúan sobre el mismo proceso industrial en el mismo intervalo de tiempo realizando las tareas de supervisión y control.

Este capítulo, presenta una metodología para dar solución a escenarios industriales donde no es posible identificar al operario para ofrecerle una adaptación personalizada. Mediante la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, esta metodología infiere reglas ECA de adaptación temporal por máquina, consiguiendo una reducción del tiempo de interacción y número de eventos de los diferentes operarios, y por ende, optimiza el rendimiento de los mismos.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La necesidad creciente de una reducción de costes en los procesos industriales actuales ha derivado en la necesidad de incorporar nuevas tecnologías que simplifiquen las tareas a los operarios. En este ámbito, la incorporación de técnicas de inteligencia artificial ha permitido asistir a los operarios en el proceso de toma de decisiones en diversas aplicaciones industriales.

Un análisis exhaustivo de la manera en que los operarios interactúan con los procesos industriales, bajo qué condiciones y en qué contexto puede proporcionar una información relevante de la efectividad de los mismos. La aplicación de este conocimiento al rediseño de los HMI industriales puede dar lugar a procesos industriales adaptados a las necesidades, habilidades y capacidades de los operarios, y por tanto, procesos más eficientes.

Mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje automático sobre los datos obtenidos de las secuencias de interacción operador-máquina, podemos extraer información detallada sobre las capacidades del operador y el conocimiento del proceso. Cuando estos datos se integran en adaptaciones temporales sobre los HMI industriales, se consigue una interacción más personalizada al reducir el tiempo de interacción, los posibles errores cometidos y el número de eventos realizados dentro del HMI.

Sin embargo, la forma de integrar una adaptación inteligente en un proceso industrial debe ser considerada cuidadosamente. La complejidad y criticidad de los procesos industriales hace que estas adaptaciones no puedan ser incorporadas automáticamente. Por lo tanto, es necesario: i) evaluar la viabilidad de la adaptación [120], ii) analizar la coherencia de la interfaz adaptada [121], y por último iii) implementarla progresivamente para minimizar el impacto en el operador [122].

Este capítulo se centra en escenarios industriales donde diferentes operarios en un mismo intervalo de tiempo interactúan con un proceso industrial a través del HMI pero sin necesidad de identificarse. Por lo tanto no existe la posibilidad de detectar al usuario para ofrecerle una adaptación personalizada y es por ello que las reglas inferidas son presentadas a nivel de HMI para todos los operarios.

Para ello, en este capítulo se plantea una metodología guiada por datos capaz de inferir una serie de reglas de adaptación temporal por HMI en escenarios industriales donde múltiples operarios pueden interactuar con la misma máquina y no es posible identificar al operario.

### 3.2 METODOLOGÍA PLANTEADA

En esta sección proponemos una metodología guiada por datos para generar adaptaciones temporales de un HMI industrial en escenarios donde no es posible identificar al operario.

Esta metodología, mediante la captura y el análisis de la interacción operario-máquina: i) genera un conjunto de secuencias válidas de interacción, ii) identifica de manera no supervisada patrones temporales de interacción operario-máquina

y finalmente, iii) infiere un conjunto de reglas ECA de adaptación sobre el diseño del HMI, asegurando la usabilidad, consistencia e integridad del mismo.

Utilizando como entradas por una parte i) la descripción formal del HMI industrial y por otro ii) un conjunto de datos de interacción operario-máquina sin procesar, mediante el uso de técnicas guiadas por datos se genera una lista de reglas de adaptación temporal por máquina. Estas adaptaciones inteligentes sugieren acciones a realizar en el proceso de diseño de la interfaz mediante el desplazamiento de los diferentes elementos de la misma en los intervalos de tiempo detectados.

Al no disponer de la identificación del operario que se encuentra realizando las tareas de monitorización y control para proveerle de una adaptación personalizada, las adaptaciones son presentadas a los diferentes operarios que interactúan con el proceso en un intervalo de tiempo específico. Cabe destacar que en el escenario analizado, no puede haber más de un operario interactuando de manera simultánea con el HMI, mientras se esté dando una secuencia de interacción.

Con el objetivo de evitar el exceso de información mostrado en el HMI y no saturar con múltiples adaptaciones de interfaz al operario, la metodología selecciona y filtra las reglas más representativas que serán transformadas en adaptaciones sobre el HMI. De esta manera, se garantiza que el HMI industrial no se vea sobrecargado de información, dando pie a comprometer el rendimiento laboral del operario [123].

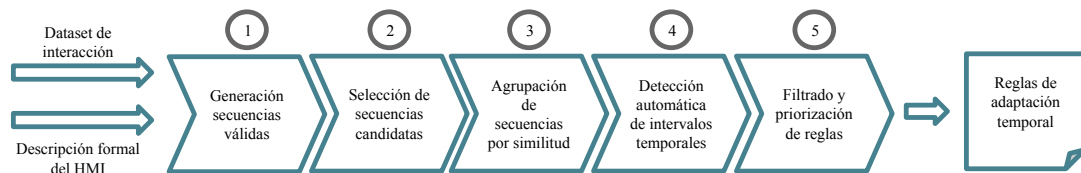


Figura 3.1: Metodología guiada por datos propuesta para la generación de reglas de adaptación temporal por máquina.

La Figura 3.1 muestra las diferentes etapas de la metodología. Partiendo de las entradas definidas previamente, la metodología sigue una serie de pasos para:

1. Generar secuencias de interacción válidas de un operario-máquina donde éste no se identifica a través del HMI.
2. Descubrir los patrones de interacción operario-máquina.
3. Agrupar las secuencias por su grado de similitud.
4. Detectar automáticamente los intervalos de tiempo en los que los patrones de interacción se repiten con mayor frecuencia.
5. Generar las reglas ECA de adaptación del HMI por máquina filtrando las más representativas.

Tabla 3.1: Descripción de los diferentes elementos que componen cada pantalla del HMI

Campo	Descripción
Identificador	Identificador único del elemento
Tipo	Tipo de Elemento (Informativo o interactivo)
Contenido	Contenido mostrado (Texto, imagen, alarma)
Evento	Diferentes eventos que pueden ser disparados ( <i>Click</i> )

### 3.2.1 Descripción formal de un HMI industrial mediante un lenguaje UIDL ligero

La composición actual de los HMIs que se utilizan en los diferentes procesos industriales, viene dada por un conjunto de elementos informativos y una serie de objetos interactivos. Estos elementos componen las diferentes pantallas que se ejecutan en las máquinas industriales permitiendo la supervisión y control del proceso industrial en tiempo real por parte del operario.

A su vez, los HMI permiten la interacción por parte del operario, por ejemplo, para navegar entre diferentes pantallas o modificar variables del proceso. Por lo tanto, es necesario identificar los elementos que componen todas las interfaces, especificando si son elementos informativos (por ejemplo, elementos de texto, etiquetas) o interactivos (por ejemplo, botones y enlaces).

Como se hace referencia en el Capítulo 2, en la actualidad los HMI industriales dependen en gran medida del fabricante en cuanto a las opciones de diseño y los elementos disponibles. Es por ello que se necesita disponer de un lenguaje de definición formal de los distintos elementos de la interfaz, el cual, sea agnóstico al fabricante del HMI. En esta tesis, se ha optado por el diseño de un lenguaje ligero y personalizado de descripción de interfaz UIDL, que permite describir formalmente los diferentes elementos que componen el HMI. De esta manera, se dispone de toda la información necesaria del HMI industrial descrita de manera formal.

Mediante el uso de este UIDL ligero se definen todas las pantallas que componen el HMI industrial y para cada interfaz se extraen los elementos que son mostrados. La información más relevante de cada elemento, como el tipo, el contenido y el evento, se describen en la Tabla 3.1.

Como resultado de este paso preliminar se obtiene una descripción formal de todas las interfaces  $\mathcal{H} = [hmi_1, hmi_2, \dots, hmi_n]$  y los diferentes elementos  $\mathcal{I} = [item_1, item_2, \dots, item_n]$  que las componen. Cabe mencionar que, cada  $item_i$  puede ser informativo o interactivo y solo puede pertenecer a una única interfaz  $hmi_i$ .

Tabla 3.2: Especificación del conjunto de datos de interacción operario-máquina sin procesar.

Marca de tiempo	Acción	Variables de proceso
$t_0$	$a_0^2$	$[v_0^1, v_0^2, \dots, v_0^m]$
$t_1$	$a_1^1$	$[v_1^1, v_1^2, \dots, v_1^m]$
$t_3$	$a_3^6$	$[v_3^1, v_3^2, \dots, v_3^m]$
$t_7$	$a_7^5$	$[v_7^1, v_7^2, \dots, v_7^m]$
$t_8$	$a_8^1$	$[v_8^1, v_8^2, \dots, v_8^m]$

### 3.2.2 Especificación formal de un conjunto de datos de interacción operario-máquina

Una de las carencias existentes en los entornos de producción industrial es que los HMI industriales son diseñados sin conocer previamente cómo interactúa cada operario con la interfaz para el control y la supervisión del proceso. La ausencia de esta información en el proceso de diseño puede hacer que la interacción no sea óptima en términos de número de *clicks* o duración en tiempo de la secuencia de interacción.

Por defecto, los HMIs industriales no registran las interacciones del operador. Sin embargo, actualmente algunos fabricantes ofrecen herramientas adicionales que permiten capturar y registrar las interacciones de los operarios y las variables del proceso.

En esta tesis, se considera un conjunto de datos de interacción operario-máquina sin procesar como un registro secuencial de elementos únicos, en el que cada fila se compone de un evento  $e_i := [t_i, a_i^j, p_i]$  donde:

- $t \in \mathbb{N}$  es la marca de tiempo (*timestamp*).
- $a \in A = \{a_1^j, a_2^j, \dots, a_{n-1}^j, a_n^j\}$  donde  $A$  es un conjunto finito de interacciones conocidas, indexadas por  $j$ , en los diferentes elementos que componen la interfaz.
- $p_i = (v_1, \dots, v_m) : i \in I$  son los valores de las variables del proceso.

El resultado de este segundo paso preliminar es un registro de toda la interacción de cada operador (incluidos los valores de la marca de tiempo y de las variables del proceso), como se puede observar en la tabla 3.2.

### 3.2.3 Filtrado y selección de secuencias válidas de interacción

Esta fase de la metodología se divide en tres sub-etapas. Primeramente i) se deben generar las secuencias de interacción válidas a partir del conjunto de datos  $\mathcal{S}$  en el que no disponemos de la información sobre qué operario está operando con el proceso, posteriormente ii) descubrir los patrones temporales de

interacción operario-máquina más frecuentes, y por último iii) filtrar y agrupar por similitud las diferentes secuencias que se realizan para la misma tarea de control y supervisión.

### 3.2.3.1 Generación de secuencias válidas de interacción operario-máquina

En este paso de la metodología, se analiza el conjunto de datos de interacción sin procesar, transformándolo en un grupo de secuencias válidas de interacción operario-máquina.

Perer *et al.* [37] definen una secuencia de eventos  $\mathcal{E} = \langle e_1, e_2, \dots, e_m \rangle$  ( $e_i \in \mathcal{D}$ ) como una lista ordenada de eventos  $e_i$ , donde  $\mathcal{D}$  es un conjunto de eventos conocido y el orden viene definido por  $i$ . Esto significa que el evento  $e_i$  ocurre antes que el evento  $e_{i+1}$ . A su vez  $\mathcal{E}$  debe contener como mínimo dos eventos  $e$  para ser considerada como una secuencia.

Utilizando la definición anterior, así como el conjunto de datos de interacción sin procesar descrito en la sección 3.2.2 como entrada, es posible extraer secuencias de interacción válidas. Consideramos como una secuencia válida de interacción operario-máquina  $s_i = [e_{init}, e_1^i, \dots, e_{k_i}^i, e_{final}]$  a un grupo de eventos  $e_i$  donde:

- Las acciones  $e_{init}$  y  $e_{final}$  son conocidas, determinando el inicio y finalización de la secuencia de interacción.
- La variable  $l$  determina la longitud de la secuencia de interacción operario-máquina y su valor debe ser  $\geq 2$ .

Para la generación de las secuencias válidas de interacción operario-máquina se ha diseñado el Algoritmo 1 que extrae de manera secuencial dichas secuencias. A continuación se describe su funcionamiento.

- Primeramente, se definen cuales son las condiciones  $cond_u$  y  $cond_v$  que definen el inicio y el final de la secuencia de interacción.
- Una vez definidas estas acciones, el algoritmo analiza el *dataset*  $\mathcal{E}$  buscando la posición  $p_u$  de la primera acción  $a_i^j$  que satisface la condición  $cond_u$ .
- A continuación, el algoritmo localiza la posición  $p_v$  de la primera acción  $a_i^j$  definida por la  $cond_v$ , actualizando  $p_u$  si encuentra una nueva.
- Finalmente, la sub-secuencia  $s := E[e_{p_u}, e_{p_v}]$  es añadida al conjunto de secuencias válidas  $\mathcal{S}$ .

Esta etapa de la metodología genera como salida un conjunto de datos  $\mathcal{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , el cual contiene todas las secuencias válidas de interacción operario-máquina.



---

**Algoritmo 1** Extracción de secuencias válidas de interacción operario-máquina.

---

**Data:**  $\langle \mathcal{E} = (e_1, e_2, \dots, e_n), cond_u, cond_v \rangle$

**Result:**  $\mathcal{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$

$n \leftarrow len(\mathcal{E})$

$i \leftarrow 1$

**while**  $(i \leq n)$  **do**

**while**  $(i \leq n) \mathbf{and}(e_i \neq cond_u)$  **do**

$i \leftarrow i + 1$

**end**

$p_u \leftarrow i$

**while**  $(i \leq n) \mathbf{and}(e_i \neq cond_v)$  **do**

**if**  $(e_i = cond_u)$  **then**

$p_u = i$

**end**

$i \leftarrow i + 1$

**end**

$p_v \leftarrow i$

**if**  $(i \leq n)$  **then**

    Append  $\mathcal{E}[e_{p_u}, e_{p_v}]$  to  $\mathcal{S}$

**end**

$i \leftarrow i + 1$

**end**

---

### 3.2.3.2 Filtrado de secuencias de interacción operario-maquina frecuentes

El objetivo principal de esa fase es identificar secuencias válidas de interacción que ocurren con una frecuencia alta a lo largo del tiempo y, por lo tanto, son candidatas a generar una adaptación. Clasificamos una secuencia  $s$  como frecuente si su ratio de repetición  $r$  en un intervalo de tiempo finito está por encima de un umbral predefinido  $\alpha$ .

Para el filtrado y selección de secuencias candidatas se ha diseñado el Algoritmo 2, el cual tomando como entrada el conjunto de datos  $\mathcal{S}$  y estableciendo el umbral de repetición  $\alpha$  genera como salida un conjunto de secuencias  $\mathcal{C}$  con las secuencias de interacción operario-máquina candidatas a la adaptación.

---

**Algoritmo 2** Filtrado de secuencias candidatas basadas en su ratio de repetición.

---

**Data:**  $\mathcal{S} = [s_1, s_2, \dots, s_n]$

**Result:**  $\mathcal{C}$

Initialize  $\alpha$

**for**  $(i = 0, i < len(\mathcal{S}), i++)$  **do**

  Calculate  $r$  of  $s_i$

**if**  $r > \alpha$  **then**

    Append  $s_i$  to  $\mathcal{C}$

**end**

**end**

---

El funcionamiento de este algoritmo 2 se describe a continuación:

- Primeramente se establece el valor del umbral  $\alpha$  como el número mínimo de repeticiones de una secuencia  $s_i$  que ha de darse en un intervalo de tiempo.
- A continuación, se calcula el valor de  $r$  para cada secuencia válida de interacción  $s_i$ .
- Posteriormente, se recorre de manera secuencial  $\mathcal{S}$ . Si el valor de  $r$  es superior a  $\alpha$ , la secuencia  $s_i$  se añade al conjunto de secuencias candidatas  $\mathcal{C}$ .

Como salida de esta fase, se obtiene el conjunto de secuencias candidatas  $\mathcal{C} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ .

### 3.2.3.3 *Detección y agrupamiento de secuencias de interacción operario-máquina similares*

La variabilidad del operario puede afectar a la secuencia de interacción en cuanto al número de acciones realizadas y al orden en que se genera la secuencia. La habilidad y conocimiento del proceso y del HMI por parte del operario condiciona la manera y el orden de los eventos a la hora de realizar las tareas de monitorización y control. Por lo tanto, es necesario analizar la similitud entre las secuencias para garantizar que la variabilidad del operador no influya en la selección de las secuencias de interacción operador-máquina que serán candidatas a la adaptación.

En el escenario analizado en este capítulo, se clasifican como similares dos secuencias de interacción operario-máquina  $\mathcal{S} = (a_0, a_1, \dots, a_{n-2}, a_{n-1})$  y  $\mathcal{S}' = (a'_0, a'_1, \dots, a'_{n-2}, a'_{n-1})$  si se cumplen las siguientes premisas:

- Premisa 1:  $a_0 = a'_0$ . Esto significa que la acción inicial de  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  son la misma. Las acciones iniciales  $a_0$  y  $a'_0$  vienen determinadas por el cambio de estado del HMI de "en reposo" a "en activo".
- Premisa 2:  $a_n = a'_n$ . Las acciones finales de las secuencias  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  son las mismas.
- Premisa 3:  $\mathcal{S} \cap \mathcal{S}' \neq \emptyset$ . Esto significa que la variabilidad del operario (por ejemplo: los errores de interacción, eventos duplicados no intencionados, errores involuntarios o las trayectorias de interacción diferentes) puede influir en la generación de la secuencia válida de interacción para la misma tarea de monitorización y control.
- Premisa 4: El grado de similitud, determinado por la similitud del coseno  $\cos(\theta)$ , de  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  está por encima de un umbral predefinido  $\beta$ .

La similitud del coseno es una de las técnicas más utilizadas para comparar documentos en el análisis de textos [124]. Esta métrica calcula el coseno del ángulo que forman dos secuencias vectorizadas, en este caso  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$ , proyectadas en un espacio multi-dimensional. Valores cercanos a 1 determinan que las secuencias son similares, y a la inversa, los valores cercanos a 0, determinan que son diferentes.

Para la agrupación de las secuencias candidatas de interacción en base al grado de similitud se ha desarrollado el Algoritmo 3. El objetivo de este algoritmo es

---

**Algoritmo 3** Agrupación de secuencias candidatas basadas en su grado de similitud.

---

**Data:**  $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ,  $\mathcal{C} = \{s'_i / i \in I\} \subseteq \mathcal{S}$ ,  $\beta$

**Result:**  $\mathcal{V}$

```

for ( $i = 0, i < \text{len}(\mathcal{S}), i++$ ) do
   $A_i = []$ 
  foreach  $s'_i \in \mathcal{C}$  do
     $d = \text{Calculate\_similarity\_degree}(s_i, s'_i)$ 
    if  $d > \beta$  then
      | Append  $s_i$  to  $A_i$ 
    end
  end
  Append  $A_i$  to  $\mathcal{V}$ 
end

```

---

comparar y agrupar por grado de similitud todas las secuencias candidatas  $\mathcal{C}$  que hemos generado en la sección anterior mediante el Algoritmo 2.

El funcionamiento del Algoritmo 3 es el siguiente:

- En primer lugar, se define  $\beta$  con el umbral específico para determinar el grado de similitud de dos secuencias.
- A continuación, una vez fijado el umbral de similitud  $\beta$ , el algoritmo calcula el grado de similitud  $d$  de cada  $s'_i$  con las diferentes secuencias que componen  $\mathcal{S}$ .
- El grado de similitud  $d$  viene dado por el coseno del ángulo  $\theta$  formado por las secuencias vectorizadas  $s_i$  y  $s'_i$ . Si el valor de  $d$  está por encima de  $\beta$ , el elemento  $s_i$  se añade a una lista  $A_i$ . De esta manera  $A_i$  contendrá un grupo de secuencias similares.
- Por último, el conjunto  $A_i$  se añade a  $\mathcal{V}$ .

Estas secuencias similares que componen el conjunto de datos  $\mathcal{V}$  generado como salida en esta etapa de la metodología son las secuencias desde las cuales se inferirán las reglas de adaptación.

### 3.2.4 Detección automática de intervalos temporales para la activación de las reglas de adaptación

Para identificar de manera automática los intervalos de tiempo  $\mathcal{T}$  en los cuales debe activarse la regla, es necesario determinar en qué momento temporal la interacción del operario es más frecuente. Esto puede abordarse mediante el uso de algoritmos de agrupamiento basados en densidad.

Este tipo de técnica de aprendizaje no supervisado identifica diferentes grupos basándose en la densidad de los puntos sobre el espacio. Las áreas densas se consideran como un grupo y las no densas como una separación. Estos grupos indican los intervalos de tiempo en los que las interacciones de los operarios

son más frecuentes y, por lo tanto, determinan cuando debe activarse la regla de adaptación.

En este paso de la metodología, se determina de manera no supervisada los grupos del conjunto de datos  $\mathcal{V}$  que determinan los intervalos temporales. Una vez obtenidos los grupos, se seleccionan el primer y el último elemento de cada grupo, los cuales determinan el inicio y el final del intervalo de tiempo.

Detectando estos intervalos de tiempo, nos aseguramos de que la regla de adaptación solo será activada cuando la secuencia candidata es frecuente consiguiendo respetar la integridad y coherencia del HMI.

### 3.2.5 Filtrado y priorización de secuencias candidatas relevantes para disminuir la sobrecarga de información

En el escenario industrial analizado en este capítulo, donde varios son los operarios no identificados que pueden interactuar con el HMI en un mismo intervalo de tiempo de manera no simultánea, puede darse la situación que haya más de una secuencia de interacción candidata a generar una adaptación.

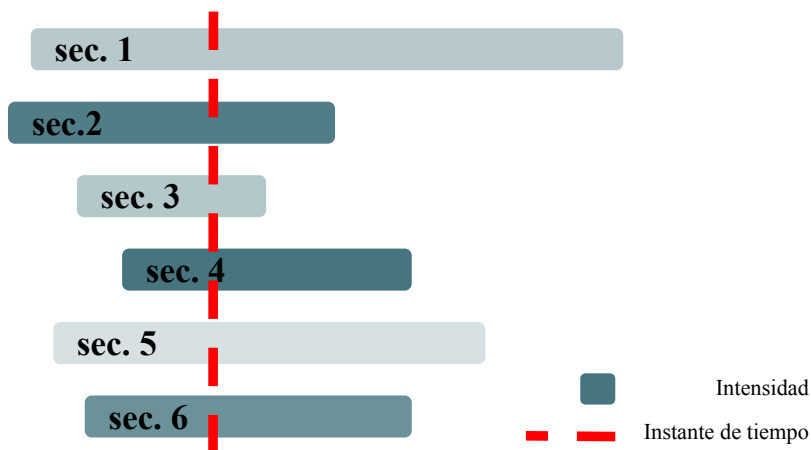


Figura 3.2: Ejemplo de intervalos de adaptación que se solapan para un momento concreto del turno de trabajo.

Como se puede observar en la Figura 3.2, puede darse el caso en el que cuando el HMI pasa de estado "en reposo" a "en activo", haya varias secuencias candidatas a generar una regla de adaptación. Si se integrasen todas las reglas de adaptación inferidas en el HMI, la sobrecarga de información puede tener un efecto negativo en la coherencia e integridad de la interfaz y, como consecuencia, la usabilidad y la UX podrían verse comprometidas. En el ejemplo mostrado en la Figura 3.2 se puede observar cómo la densidad de cada secuencia, visualizada con diferentes intensidades de color, no es la misma. Por lo cual se debe descartar las secuencias que no son representativas para realizar la adaptación en el HMI.

En este paso de la metodología, el Algoritmo 4 filtra las secuencias candidatas más relevantes basándose en la densidad de los grupos. El Algoritmo 4 tiene el siguiente funcionamiento:

**Algoritmo 4** Priorización de secuencias candidatas basada en la densidad.

---

**Data:**  $\mathcal{T} = [t_1, t_2, \dots, t_n]$   
**Result:**  $\mathcal{C} = [c_1, c_2, \dots, c_k]$   
Initialize  $p, m$   
 $OC = \text{OverlappedClusters}(\mathcal{T})$   
**foreach**  $oc_i$  in  $OC$  **do**  
|  $\mathcal{D} = \text{CalculateDensity}(oc_i)$   
**end**  
 $dMax = \text{Max}(\mathcal{D})$   
**for** ( $i = 0, i < \text{len}(\mathcal{D}), i++$ ) **do**  
|  $\mathcal{D}_{norm} = \left\{ \frac{\text{densidad}(D_i)}{dMax} \right\}$   
**end**  
 $D_{norm} = \text{GenerateDescendingRanking}(D_{norm})$   
 $\hat{p} = i / D_{norm_i} > p \geq D_{norm_{i+1}}$   
 $k = \min\{m, \hat{p}\}$   
**return**  $\mathcal{C} = [c_1, c_2, \dots, c_k]$

---

- Una vez calculados los intervalos de tiempo  $\mathcal{T}$  mediante el agrupamiento por densidad, identificamos qué grupos se solapan en el tiempo.
- Para cada uno de los grupos que se solapan en el tiempo calculamos su densidad de puntos, viniendo dada por el número de repeticiones que se da la secuencia en un intervalo de tiempo concreto. Cabe recordar, que al estar utilizando en un espacio unidimensional, en este caso la dimensión temporal, la longitud del intervalo viene determinada por su duración.
- Una vez inicializados los valores de  $p$  como nivel de representabilidad que se establece como umbral y  $m$  como el número máximo de adaptaciones posibles, a continuación, se selecciona el grupo cuya densidad es mayor  $dMax$ .
- Tomando  $dMax$  como referencia, normalizamos todas las densidades de los grupos dividiéndolas entre  $dMax$ .
- Seguidamente, ordenamos de mayor a menor densidad normalizada lo grupos solapados. El siguiente paso es calcular la posición  $\hat{p}$  del ranking a partir de la cual la densidad de los grupos es menor que  $p$ .
- Por último calculamos el valor  $k$  que consiste en el valor mínimo entre  $\hat{p}$  y  $m$  para devolver el número de grupos representativos. De este modo, se selecciona un conjunto de secuencias candidatas de adaptación con un grado de representabilidad definido descartando las restantes.

Estableciendo el mencionado número máximo  $m$  de adaptaciones que pueden darse en la interfaz así como el nivel de representabilidad definido por  $p$  de los diferentes grupos solapados garantizamos que el HMI industrial no se vea sobrecargado con un volumen alto de adaptaciones comprometiendo así el rendimiento del operario.

Una vez concluida esta etapa, obtenemos un conjunto de secuencias candidatas más representativas por cada intervalo de tiempo detectado,  $\mathcal{C}$ .

### 3.2.6 Inferencia de reglas temporales de adaptación mediante minería de secuencias

Las reglas de adaptación inferidas en esta fase de la metodología se describen formalmente como reglas ECA donde:

- E: Evento  $a_1^j$  es activado. En este escenario, la interfaz  $hmi_i$  pasa de estado "en reposo" a estado "en activo".
- C:  $t_i \in \mathcal{T}$ . El momento de tiempo actual esta en alguno de los intervalos detectados cuya densidad es representativa.
- A: Mueve el elemento  $item_i$  a la interfaz  $hmi_1$ .

En esta etapa final, se analiza la secuencia de interacción analizando cada  $elemento_i$  con el que ha interactuado el operario. Cuando se llega al final de la secuencia, se comprueba qué elementos de información existen en esta interfaz  $hmi_n$ , y si no están en la primera interfaz se propone una adaptación.

---

**Algoritmo 5** Generador de acciones de adaptación.

---

**Data:**  $\langle C = (s_1, s_2, \dots, s_n) \rangle$

**Result:**  $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$

**foreach**  $s_i$  *in*  $C$  **do**

    extract different steps of  $s_i$

**if**  $item_i$  of  $hmi_n$  is informative and not in  $hmi_1$  **then**

            move  $item_i$  to  $hmi_1$

**end**

**end**

---

Para la generación de las adaptaciones se ha diseñado el Algoritmo 5. Este algoritmo toma como entrada el conjunto de datos  $\mathcal{V}$  y lo analiza de manera secuencial. Una vez alcanzado el final de la secuencia, propone una adaptación de los elementos informativos que se encuentran en la ultima pantalla  $hmi_n$  siempre y cuando no estén en la primera interfaz  $hmi_1$ .

Al final de este paso se genera un conjunto de reglas de adaptación ECA  $\mathcal{R} = [regla_1, regla_2, \dots, regla_n]$ . La aplicación de este conjunto de reglas  $\mathcal{R}$  en el diseño de los HMIs, modificará las interfaces que lo componen, dando lugar a una reducción del número de *clicks* en las tareas repetitivas realizadas por el operador para la supervisión y control de procesos industriales.

## 3.3 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA ADAPTACIÓN TEMPORAL DEL HMI

### 3.3.1 Experimento

La validación de la metodología propuesta se ha realizado mediante un experimento teniendo en mente dos objetivos: i) inferir una serie de reglas de adaptación

del HMI basadas en las interacciones operador-máquina y ii) validar las reglas de adaptación inferidas mediante la aplicación en un HMI industrial.

Este experimento consta dos fases:

1. La fase 1, o fase de entrenamiento, encargada de reunir los datos de interacción operario-máquina suficientes para aprender y generar las reglas de adaptación.
2. La fase 2, o fase de validación, que comprende la validación de los cambios realizados en la interfaz tras aplicar las reglas de adaptación.

El experimento consiste en una máquina en el que varios operarios interactúan con proceso a través de un mismo HMI industrial para realizar una serie de tareas. En este contexto, se ha utilizado en el experimento una máquina expendedora de café.

Mediante el uso de esta máquina aseguramos que diferentes usuarios interactúan con un proceso de manera regular a lo largo del día para detectar los patrones de interacción y posteriormente inferir las reglas de adaptación que serán aplicadas a la interfaz. De esta forma, disponemos de los datos suficientes para entrenar y validar el modelo diseñado en la metodología.



Figura 3.3: Interfaz principal de la máquina de café utilizada en el experimento.

La Figura 3.3 ilustra la interfaz principal de la máquina de café, en la que el operario puede ajustar diferentes parámetros haciendo *click* en los elementos interactivos representados como botones verdes a la izquierda de la interfaz. Cada vez que se pide un café, el operario realiza un conjunto de interacciones individuales con el HMI. Estas interacciones son las que se necesitan para realizar el ajuste de los diferentes parámetros, como pueden ser la cantidad de azúcar o el tipo de café que se desea.

El proceso de interacción necesario para la preparación de un café puede describirse como una máquina de estados finitos (FSM - 'Finite State Machine') en la que el operario ajusta diferentes parámetros hasta que los valores se consideran correctos. La Figura 3.4 muestra el diagrama FSM del proceso de interacción operario-máquina con la máquina de café para obtener una mezcla personalizada.

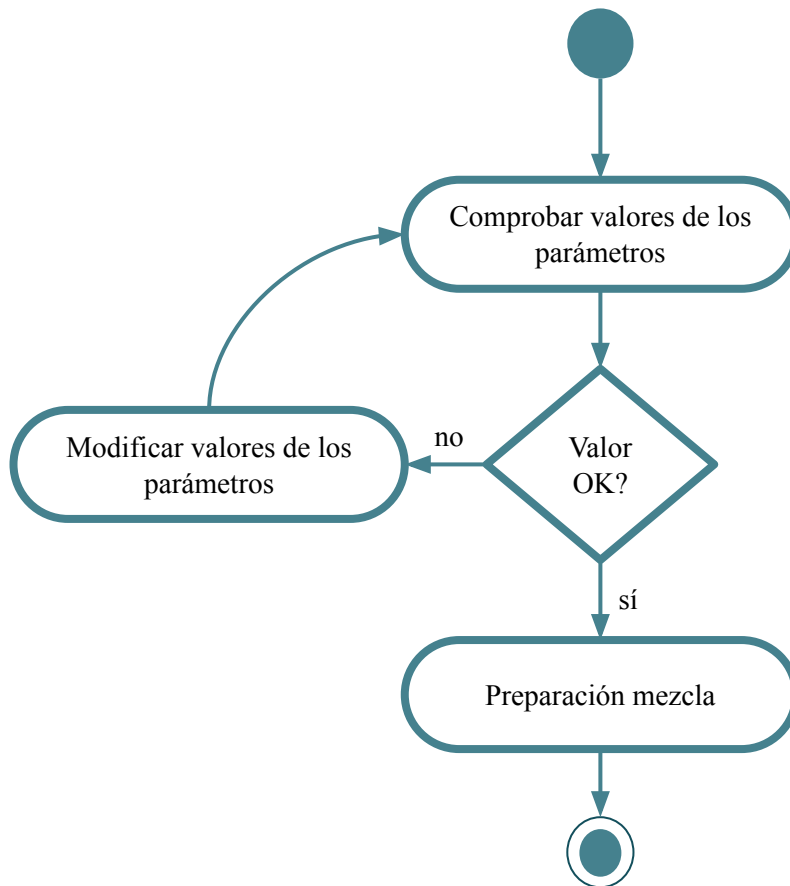


Figura 3.4: Diagrama FSM que representa el proceso de interacción operario-máquina en la máquina de café.

### 3.3.2 Diseño del sistema de captura de interacción

Para poder capturar las diferentes interacciones que realizan los operarios con la máquina se ha diseñado una aplicación móvil que simula el funcionamiento de la máquina real. El principal motivo de diseñar esta aplicación ha sido la imposibilidad de acceder al sistema interno de la máquina industrial.

Esta aplicación de usuario diseñada, contiene las mismas pantallas con la misma arquitectura de información que componen el HMI. De esta manera, el operario participante no tiene que familiarizarse con la aplicación y sobre todo la usabilidad y UX de la misma no se ve distorsionada.

El operario, mediante un código QR accede a la aplicación y replica la misma interacción que realiza sobre la máquina para seleccionar su café en las diferentes pantallas, respetando: i) el orden de la secuencia que ha seguido y ii) el intervalo



de tiempo en el que ha interactuado con la máquina. De esta manera el sistema captura las interacciones en el mismo orden e intervalo de tiempo realizadas para su posterior transformación a secuencias válidas de interacción. Las interfaces que componen la aplicación de usuario son las siguientes:

- **Interfaz de inicio:** Una vez autenticado la interfaz pasa de estado "en reposo" a estado "en activo", se muestra interfaz donde aparecen recogidos los valores por defecto de los diferentes parámetros de la mezcla.
- **Selección de máquina:** Esta interfaz permite al operario seleccionar qué dispositivo solicitaría el café. La selección se podía realizar mediante un desplegable con las opciones existentes.
- **Selección de recipiente:** Mediante un elemento interactivo (*toggle*) el operario puede modificar el valor de la variable booleana *Recipiente*.
- **Selección de azúcar:** El operario puede ajustar el valor del parámetro numérico "Nivel de azúcar" mediante dos botones *incrementar* o *decrementar*. Los valores de este parámetro se encuentran comprendidos entre 0 y 5.
- **Selección de café:** En esta interfaz el operario selecciona de una lista con todas las opciones disponibles la que desee tomar en ese momento.

La aplicación permite al operario configurar los diferentes valores mediante la acciones en los elementos interactivos y a su vez navegar por las diferentes pantallas mediante enlaces.

Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación

Figura 3.5: Ejemplo de secuencia de acciones realizadas por un operario siguiendo la arquitectura de información diseñada.

La Figura 3.5 muestra una secuencia de acciones realizadas por un operario para seleccionar un café. En este caso, la navegación e interacción del operario sigue el orden establecido por la arquitectura de información diseñada. El operario realiza las diferentes acciones necesarias en cada una de las pantallas que la aplicación le va mostrando hasta completar la secuencia.

Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación

Figura 3.6: Ejemplo de secuencia de acciones realizadas por un operario sin seguir la arquitectura de información diseñada.

Sin embargo, cada operario puede tener un flujo de navegación diferente. Como se puede ver en la Figura 3.6, no siempre la secuencia sigue el orden definido en la arquitectura de información diseñada. En este caso, el operario realiza las diferentes acciones necesarias para la selección de un café pero siguiendo un orden que viene condicionado por sus preferencias, conocimiento del proceso o estado del mismo.

### 3.3.3 Duración del experimento y descripción de los participantes

Para la realización del experimento se reclutaron treinta y cuatro operarios voluntarios (21 hombres y 13 mujeres) con edades comprendidas entre 23 y 45 años. Previo al experimento, se solicitó permiso a cada uno de los operarios participantes para que sus interacciones fuesen capturadas a través de la aplicación de usuario y posteriormente analizadas para inferir las reglas de adaptación.

El experimento capturó la interacción diaria de los 34 operarios con la máquina de café a través de la aplicación durante un período de 151 días. Durante este período, todos los participantes utilizaron la misma aplicación para obtener sus diferentes cafés y el sistema recogió y almacenó 10,008 interacciones con la interfaz.

### 3.3.4 Descripción Formal de las interfaces que componen el HMI

Mediante el uso del lenguaje UIDL descrito en la sección 3.2.1 se genera un archivo JSON que describe las seis interfaces y todos los elementos que las componen. Cada elemento que compone las diferentes interfaces de la aplicación tiene un identificador numérico único y solo puede pertenecer a una única interfaz.



Figura 3.7: Interfaz n°4 de selección de recipiente.

La Figura 3.7 muestra el diseño de la interfaz que gestiona la selección de recipiente. En este caso, el operario puede modificar el valor del parámetro *container* mediante un elemento interactivo, en este caso el *toggle* llamado *Container*. Utilizando el lenguaje UIDL, podemos ver a continuación la descripción formal de la interfaz y el fichero JSON resultante.

```
interface4:{
  elements:{
    INF5Container:{
      type:text,
      text:"Container",
      editable:no,
      style:{
        background-color:white,
        text-color:#45818e
      }
    }
    TG5Container:{
      type:toggle,
      event:click,
      action:togglevalue}
    BTN5Container:{
      type:button,
      text:"OK",
      event:click,
      action:navigate,
      style:{
        background-color:#45818e,
        text-color:white
      }
    }
  }
}
```

La interfaz #4 contiene tres elementos (#45, #46 y #47) de los cuales dos son interactivos (#46 y #47) puesto que tienen el campo *event*, el cual define qué evento interactivo realizar el operario, y el campo *action* que define que acción se realizará una vez disparado el evento.

### 3.3.5 Descripción del conjunto de datos de interacción operario-máquina

Una vez descritas formalmente todas las interfaces de la aplicación, el siguiente paso es poner en funcionamiento el sistema de captura de manera no intrusiva de las interacciones realizadas por los operarios con los distintos elementos de la aplicación.

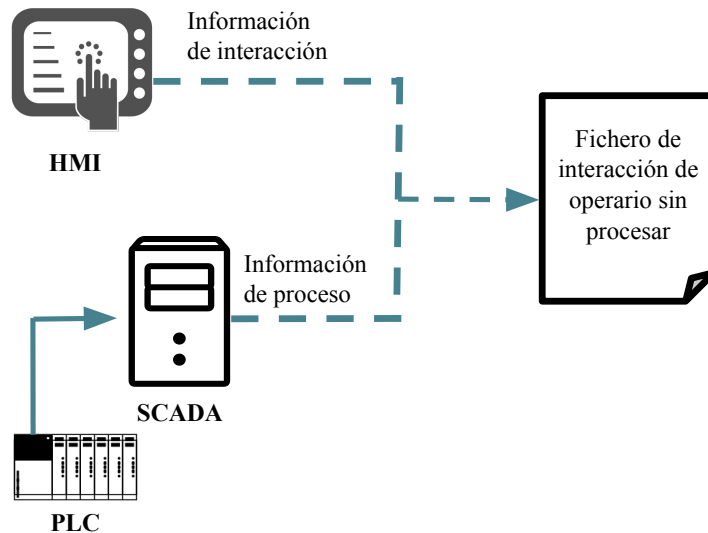


Figura 3.8: Arquitectura del sistema de captura no intrusiva de la interacción de operario

La Figura 3.8 muestra la arquitectura del sistema de captura no intrusiva. Cada vez que el operario interactúa con la aplicación el sistema recoge por un lado la información referente al proceso industrial y por otro las acciones realizadas sobre el HMI.

La información es guardada en un fichero que sirve como entrada para generar las secuencias válidas de interacción. La información recogida es la siguiente:

- **Marca de tiempo (*timestamp*):** De esta manera se asegura la trazabilidad temporal. El valor viene dado en formato EPOCH.
- **Elemento:** Guardamos el identificador del elemento con el cual el operario ha interactuado.
- **Variables de proceso:** Se almacena la información referente al estado del proceso.

La Tabla 3.3 recoge un ejemplo de captura de datos de interacción sin procesar. Cada registro de esta tabla contiene el evento que realiza el operario indexado por tiempo. Cada vez que el operario interactúa con el HMI se añade un nuevo registro de manera secuencial.

Tabla 3.3: Ejemplo de captura de interacción de operario sin procesar recogida por el sistema.

<b>Id</b>	<b>Marca de Tiempo</b>	<b>Elemento</b>
...	...	...
55	1557994085106	BTN10K
56	1557994221803	BTN1Container
57	1557994230690	BTN1Azucar
58	1557994231974	BTN3ReduceAzucar
...	...	...

### 3.3.6 Procedimiento seguido

Partiendo de la descripción formal de las interfaces que componen el HMI descrito en la sección 3.2.1 y del conjunto de datos sin procesar de la interacción operario-máquina descrito en la sección 3.2.2, se ha seguido la metodología planteada para inferir una serie de reglas de adaptación temporal del HMI.

Estas adaptaciones se realizan a nivel de máquina para todos los operarios que interactúan en el mismo intervalo de tiempo.

#### 3.3.6.1 Generación de las secuencias válidas de interacción

Tomando como entrada el fichero de interacción sin procesar, mediante la aplicación del Algoritmo 1 se generan las secuencias válidas de interacción operario-máquina. Para el escenario actual que estamos analizando en este capítulo, la condición de entrada viene determinada por el paso del estado "en reposo" a estado "en activo" del HMI.

En la Tabla 3.4 se puede observar un ejemplo de secuencia válida de interacción generada por el Algoritmo 1. La secuencia comienza cuando el operario hace *click* sobre el botón 'BTN1Azucar' y acaba cuando el operario selecciona el botón 'BTN100K' de la pantalla de confirmación. Se puede observar como existen unos períodos donde la interfaz está "en reposo" entre los eventos [1558333013800, 'BTN100K'] y [1558333063933, 'BTN1Azucar'] de unos 30 segundos y de 20 minutos entre los eventos [1558333077809, 'BTN100K'] y [1558334107608, 'BTN1Bebida'].

Al finalizar esta fase de la metodología las 9191 interacciones registradas por el sistema se transformaron en 894 secuencias válidas de interacción operario-máquina.

#### 3.3.6.2 Selección de las Secuencias Candidatas

Las secuencias válidas de interacción operador-máquina han sido procesadas posteriormente por el Algoritmo 2 definiendo en este caso el umbral de repetición  $\alpha$  en el percentil 30. Debemos recordar que el umbral de repetición  $\alpha$  define ratio

Tabla 3.4: Ejemplo de secuencia válida de interacción operario-máquina para la obtención de un café.

<b>Id</b>	<b>Marca de tiempo</b>	<b>Elemento</b>
56	1558333013800	BTN100K
...	...	...
333	1558333063933	BTN1Azucar
334	1558333065139	BTN3ReduceAzucar
335	1558333067140	BTN30K
336	1558333069447	BTN1Bebida
337	1558333074628	BTN5Bebida-A
338	1558333075149	BTN50K
339	1558333077809	BTN100K
...	...	...
399	1558334107608	BTN1Bebida

minimo de repetición que debe tener una secuencia válida para ser considerada frecuente en un intervalo específico de tiempo.

La selección del umbral  $\alpha$  al percentil 30 viene dado puesto que al ordenar de menor a mayor número de repeticiones las secuencias válidas se observa una tendencia exponencial (Figura 3.9) por lo que los valores estadísticos como la mediana o la media no son representativos pudiendo distorsionar los resultados.

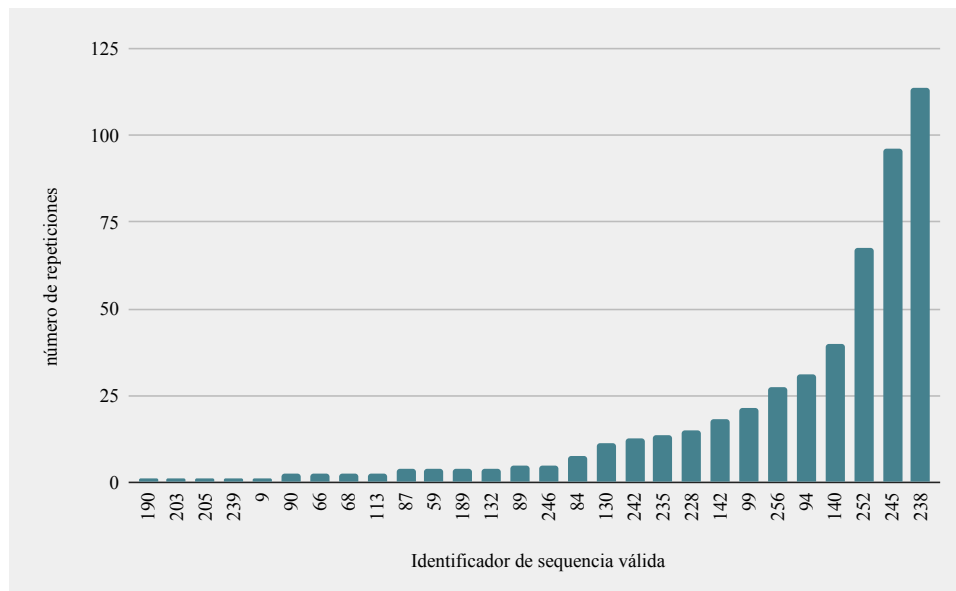


Figura 3.9: Número de repeticiones de las secuencias válidas de la máquina de café.

Al final de esta etapa, se han obtenido las secuencias candidatas de adaptación por máquina. Estas secuencias son las que su número de repeticiones está por encima del umbral  $\alpha$  definido al percentil 30.

### 3.3.6.3 Identificación y agrupación de secuencias válidas similares

En este paso de la metodología, mediante el uso del algoritmo 3, se han analizado el conjunto de secuencias frecuentes de interacción operador-máquina. Cada una de las secuencias de este conjunto se ha tomado como secuencia de referencia, y se han identificado sus secuencias similares dentro del conjunto de secuencias válidas.

La realidad de los escenarios industriales actuales implica que las tareas de monitorización y control que puede realizar un operario están predeterminadas, por lo que la variabilidad intrínseca del operario no suele ser elevada. Por esta razón, el umbral de similitud  $\beta$  se ha fijado para este experimento en 0.85.

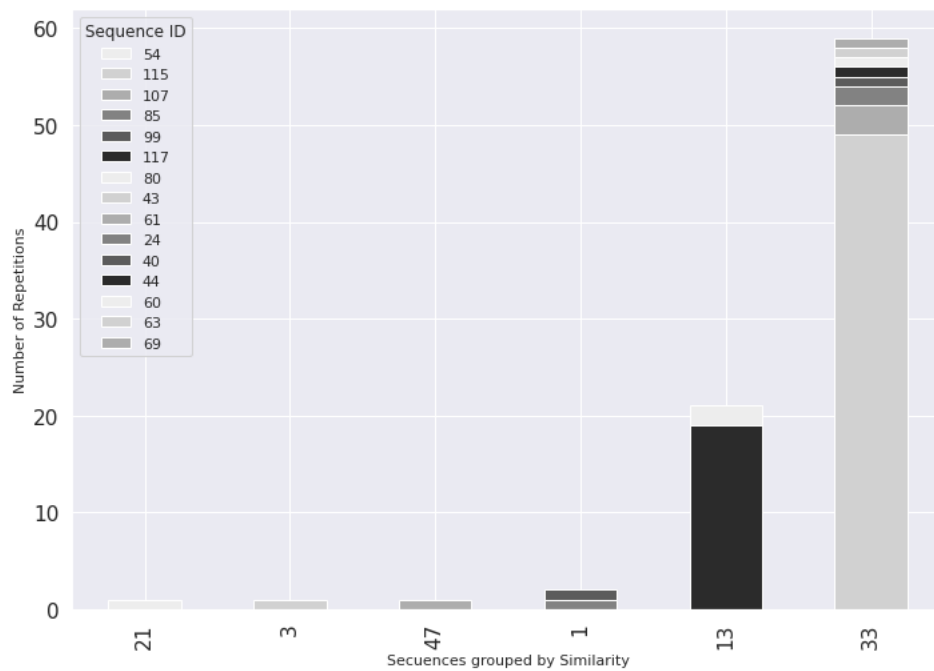


Figura 3.10: Número de repeticiones de los grupos de secuencias identificadas como similares.

Como se puede observar en la figura 3.10 una vez aplicado el algoritmo 3, se generan grupos de secuencias similares de interacción para una misma tarea de monitorización y control. En el ejemplo mostrado, el grupo de secuencias similares #33 contiene todas las repeticiones de las secuencias válidas #69, #66, #44, #54, #115, #80, #43 y #117, por que su grado de similitud es mayor que  $\beta$ . Esto significa que para seleccionar las mismas características del producto, los operarios pueden realizarlo de manera diferente pero llegando a la misma selección.

Al final de este paso, las 893 secuencias válidas de interacción operario-máquina han generado 791 grupos de secuencias similares.

### 3.3.6.4 Agrupamiento basado en densidad para determinar intervalos temporales de adaptación

Para determinar de manera no supervisada los intervalos dinámicos de tiempo donde las reglas de adaptación deben ser activadas, se han analizado diferentes algoritmos existentes de agrupamiento basados en densidad.

En primer lugar se ha analizado el uso del algoritmo HDBSCAN [125] y del algoritmo OPTICS [126] para la detección automática de los grupos respectivamente. La problemática del uso de estos dos algoritmos reside en la necesidad de una primera configuración de los parámetros de los mismos. Esta configuración de los parámetros es dependiente del problema, por lo que un ajuste incorrecto puede distorsionar los resultados. Por éste motivo, se ha decidido utilizar el algoritmo MeanShift [127] especificando que no agrupe todos los puntos. De esta manera se descartan los valores *outliers* y por consiguiente los intervalos detectados son más precisos.

Al representar en un eje temporal cada una de las secuencias agrupadas a lo largo del tiempo con un punto, el algoritmo MeanShift detecta de manera no supervisada los grupos y descarta los valores *outliers*. Las zonas de alta densidad de puntos indican un grupo, y de cada uno de ellos, el punto más a la izquierda y el más a la derecha de cada grupo determina el inicio y el final del intervalo temporal de adaptación.

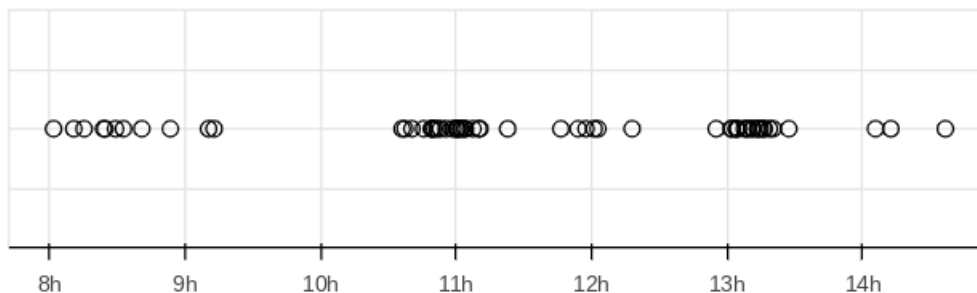


Figura 3.11: Distribución de un conjunto de secuencias similares de interacción a lo largo del tiempo.

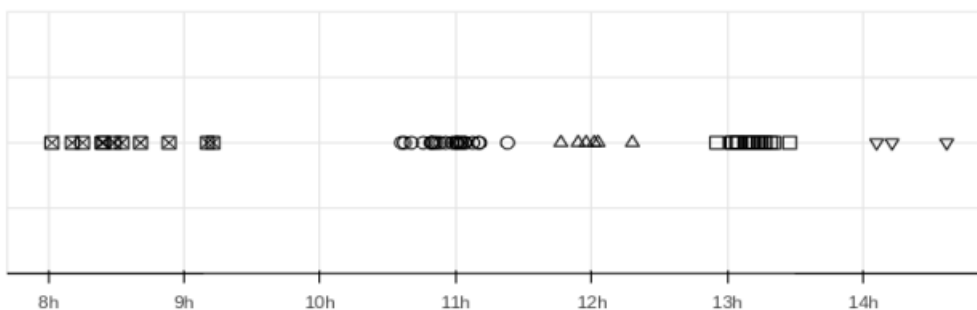


Figura 3.12: Grupos identificados por el algoritmo MeanShift para un conjunto de secuencias similares.

En la Figura 3.11, se puede observar la distribución de las repeticiones de un grupo de secuencias similares a lo largo del tiempo. Una vez aplicado el algoritmo MeanShift, la Figura 3.12 muestra los diferentes grupos detectados.



Cada uno de estos grupos son los intervalos temporales donde la regla de adaptación ha de ser activada. De esta manera, se respeta la integridad y coherencia de la interfaz evitando realizar adaptaciones en el HMI continuamente y por consiguiente, no repercute negativamente en la usabilidad de la misma.

### 3.3.6.5 Filtrado basado en densidad de puntos de los intervalos de tiempo solapados

En la Figura 3.13 se muestra los momentos del día donde más se interactúa con la máquina de café. Como se puede observar, hay momentos concretos por ejemplo de 8:00 a 9:00 o de 11:00 a 12:00 donde se dan diferentes secuencias de interacción.

Al no disponer de información del operario para ofrecerle una personalización, cuando la interfaz se activa, puede sugerir varias reglas de adaptación, una por cada una de las secuencias candidatas identificadas. Si el volumen de secuencias candidatas es alta, las adaptaciones pueden acarrear sobrecarga de información. Para solventar esta problemática, mediante la aplicación del Algoritmo 4, se filtran las secuencias candidatas más representativas en base a su densidad.

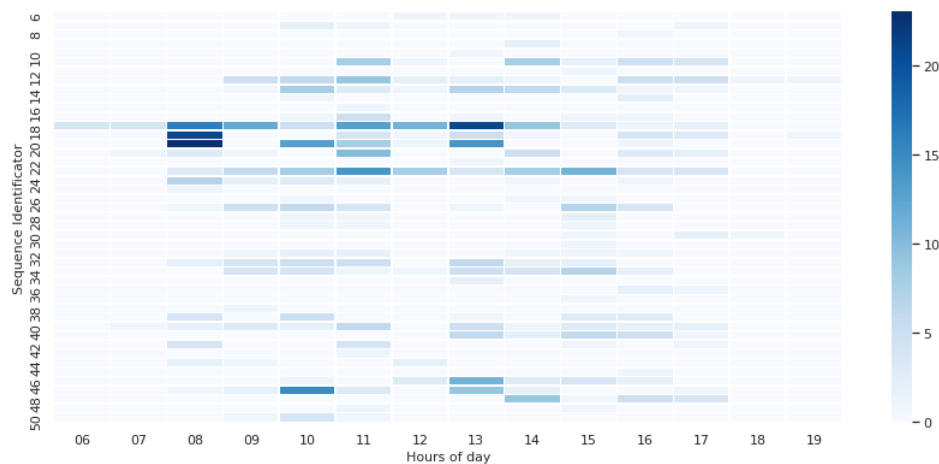


Figura 3.13: Intervalos del día donde más se interactúa con la máquina de café.

En este escenario, se establece el parámetro  $m$  que identifica el número máximo de adaptaciones que se pueden dar en la interfaz a 3 y el parámetro  $p$  que indica la proporción sobre la densidad máxima al 75%. Estos dos valores se han establecido de manera arbitraria, asumiendo que más de 3 adaptaciones puede influir negativamente en el rendimiento del operario puesto que puede distraer su atención y que si la densidad de los diferentes grupos solapados es menor del 75% de la densidad máxima, podríamos estar activando adaptaciones no lo suficientemente representativas.

La Figura 3.14 muestra cómo cuando la interfaz pasa de estado "en reposo" a "estado activo" (08:27 AM) existen varias secuencias candidatas de adaptación (Secuencia #19, secuencia #23, secuencia #20, secuencia #2 y secuencia #18).

Aplicando el Algoritmo 4, se calculan las densidades de los diferentes grupos detectados y la densidad máxima ( $dMax$ ). Estableciendo el valor de  $p$  al 75%

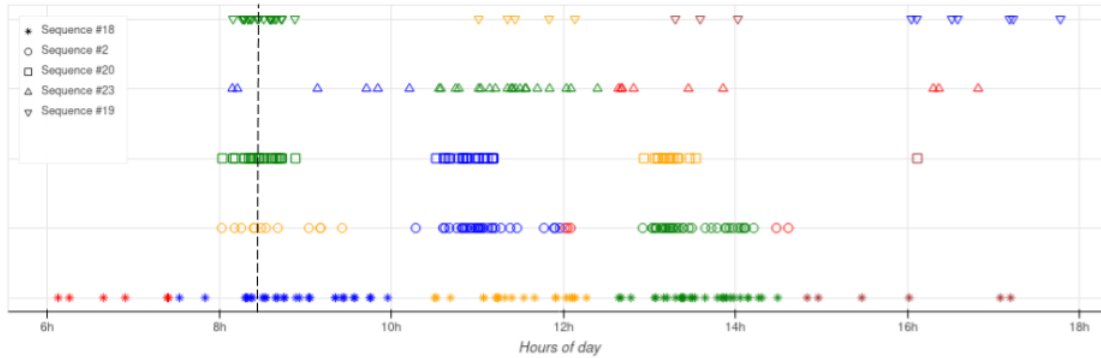


Figura 3.14: Secuencias candidatas de adaptación solapadas en un momento concreto del día.

y de  $m$  a 3 adaptaciones, el algoritmo filtra como secuencias representativas la secuencia #20, la secuencia #19 y la secuencia #18 por lo que se generan tres reglas de adaptación: la *regla*<sub>20</sub>, la *regla*<sub>18</sub> y la *regla*<sub>19</sub>.

### 3.3.6.6 Generación de regla ECA de adaptación

En este último paso de la metodología, se han generado las reglas de adaptación temporal analizando las secuencias candidatas agrupadas y filtrando por el grado de representatividad.

Los elementos informativos de la interfaz final de la máquina de café se han trasladado a la interfaz de inicio, y una vez aplicadas las adaptaciones obre la interfaz se ha conseguido una importante reducción del tiempo de interacción y del número de *clicks* por parte de los operarios que participaron en el experimento.

Un ejemplo de regla ECA generada por la metodología es:

- Event: interface1 is active.
- Condition: [08:27:16 AM] is in:
  - ["07:51:21AM", "08:33:54AM"]
  - ["08:16:18AM", "11:32:27AM"]
- Actions:
  - [Move element BTN4Azucar to interface2]
  - [Move element BTN3Recipiente to interface2]

Esta regla inferida determina que cuando el operario activa la interfaz, detecta cual es el momento actual y le sugiere una serie de adaptaciones en base a las diferentes secuencias que se dan frecuentemente en ese momento del día. En este caso, la interfaz le sugiere dos adaptaciones diferentes: i) Move element BTN4Azucar to interface2 y ii) Move element BTN3Recipiente to interface2.

Al finalizar esta última etapa de la metodología se ha generado un fichero con todas las reglas de adaptación temporal inferidas para ser implementadas posteriormente en el HMI de la máquina.

Tabla 3.5: Resultados obtenidos en la fase 1 del experimento (Entrenamiento del modelo por máquina).

Descripción	Valor
Interacciones de operario	9.191 clicks
Secuencias válidas	894
Número máximo de adaptaciones mostradas en pantalla	3
Media del nº eventos por secuencia	10.23 clicks
Duración media de la secuencia	27.84 segundos
Precisión del modelo	91.84 %

Tabla 3.6: Resultados obtenidos en la fase 2 del experimento (Validación del modelo por máquina).

Descripción	Valor
Interacciones de operario	1.024 clicks
Secuencias candidatas	92
Grupo de secuencias similares	81
Reglas de adaptación generadas	92
Número máximo de adaptaciones mostradas en pantalla	3
Media del nº eventos por secuencia	4.27 clicks
Duración media de la secuencia	16.42 segundos
Precisión del modelo	83.18 %

### 3.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Como se puede comprobar en la Tabla 3.5, partiendo de un total de 9.191 interacciones únicas se han generado 894 secuencias válidas de interacción operario-máquina utilizadas para entrenar el modelo.

Para la fase de validación del modelo, como resume la Tabla 3.6, se han utilizado 1.024 interacciones únicas que han derivado en 92 secuencias candidatas, estableciendo el umbral de repetición  $\alpha$  al percentil 30. Analizando el grado de similitud de las secuencias candidatas, establecido por el parámetro  $\beta$  a 0.85 se han generado 81 grupos de secuencias similares.

Para evaluar la mejora en la interacción operario-máquina mediante la aplicación de las reglas de adaptación temporal inferidas se han definido tres métricas de evaluación cuantitativas diferentes:

- **Número de eventos de la secuencia:** Número de clicks requeridos por el operario para realizar la acción dentro del intervalo de tiempo detectado.

- **Duración temporal de la secuencia:** Tiempo en segundos que necesita el operario para realizar la secuencia de interacción dentro del intervalo temporal detectado.
- **Validación de la regla de adaptación por parte del operario:** Evaluación por parte del operador de la adaptación temporal propuesta.

### 3.4.1 Número de eventos de la secuencia de interacción

Como se puede observar en las Tablas 3.5 y 3.6, una vez activada e implementada la regla de adaptación, existe un decremento del 43.73 % en el número de eventos que necesita el operario para seleccionar el café.

Esta reducción de casi 5.16 *clicks*, pasando de 10.23 a solo 4.27, se da puesto que cuando la regla es activada y propuesta en la interfaz, el número de eventos necesarios por parte del operario se reduce. Mostrando los elementos en la primera interfaz de la navegación, reduce las acciones necesarias para ajustar los diferentes parámetros del café.

A su vez, una reducción en el número de eventos implica una menor posibilidad de cometer algún error de interacción, puesto que a menor interacción menor probabilidad de error de interacción. De esta manera, el rendimiento del operario en términos de número de errores cometidos se ve mejorado.

### 3.4.2 Duración en tiempo de la secuencia de interacción

Los resultados obtenidos para esta métrica, revelan una reducción del tiempo de interacción de casi 11 segundos (Tablas 3.5 y 3.6). Pasando de un tiempo medio de interacción de 27.84 segundos a 16.42 segundos cuando la regla de adaptación era activada e implementada en el demostrador.

Este decremento del 58.97 % se da puesto que al igual que con la métrica  $M_1$  una reducción en el número de eventos implica un menor tiempo de interacción. De ésta manera, cuando la interfaz propone alguna adaptación al operario, el tiempo de interacción se ve notablemente reducido.

Una reducción en el tiempo de interacción implica a su vez que el operario puede realizar las tareas de monitorización y control del proceso industrial en una duración menor, por lo que el rendimiento puede verse mejorado.

Cabe destacar que, este resultado también demuestra que las adaptaciones de la interfaz no generaron una sobrecarga de información para los operarios, ya que el tiempo de interacción con la adaptación propuesta fue menor que sin ella.

### 3.4.3 Validación por parte del operario de la regla de adaptación

Para validar esta última métrica, los operarios participantes en el experimento tuvieron que validar las reglas de adaptación temporal propuestas.

Para ello, cada vez que una adaptación era propuesta e implementada en la interfaz a los operarios, éstos tenían que validarla dando a un botón de

confirmación en caso de ser satisfactoria. Por el contrario, si la regla de adaptación no era satisfactoria pulsaban en el botón 'Volver' y generaban su secuencia de interacción. Esta nueva secuencia de interacción se utilizaría para entrenar el modelo y mejorar la precisión del mismo.

Como podemos ver en la tabla 3.6, el modelo por máquina implementado obtuvo en la fase de validación una precisión del 83.18 %, esto significa que de 100 adaptaciones propuestas en la interfaz de la máquina de café 83.18 fueron satisfactorias para los operarios. En el 16.82 % restante, la regla fue considerada satisfactoria por los operarios por lo que tenían que volver a generar la secuencia de interacción.

Esta casuística puede darse puesto que al no disponer de información relativa al operario, la máquina de café presentaba las adaptaciones más representativas en las cuales no se encontraba la preferencia de ese operario en cuestión.

### 3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En el presente capítulo se ha diseñado una metodología guiada por datos para generar adaptaciones temporales de un HMI por máquina. Esta metodología se centra en escenarios industriales donde no se dispone de identificación del operario para mostrarle una regla de adaptación personalizada.

Como se ha podido observar, la aplicación de interfaces adaptativas de usuario permiten mejorar la interacción operario-máquina en tareas que son catalogadas como repetitivas. Esta mejora viene dada por la reducción notable del número de eventos necesarios y del tiempo de interacción requerido para desempeñar las tareas de monitorización y control.

La contribución principal de este capítulo es una metodología guiada por datos que permite inferir un conjunto de reglas de adaptación temporal en escenarios industriales donde varios operarios interactúan sobre el mismo proceso industrial y no existe manera de identificar al operario. Tomando como entradas la descripción formal de las interfaces y el conjunto de datos de interacción operario-máquina, la metodología genera una serie de reglas de adaptación consiguiendo una reducción del 41.73 % en el número de interacciones y una reducción del 58.97 % en el tiempo de interacción.

A su vez, para evitar la sobrecarga de información en la interfaz y con el ánimo de respetar la integridad y coherencia de la interfaz, se ha diseñado un algoritmo que permite filtrar y seleccionar las reglas más representativas en los momentos temporales donde co-existan varias secuencias candidatas a generar una adaptación en la interfaz.



# Capítulo 4

---

## **METODOLOGÍA GUIADA POR DATOS PARA LA ADAPTACIÓN DE UN HMI EN BASE AL TIEMPO Y POR OPERARIO**

---

Este capítulo presenta el diseño de una metodología guiada por datos que tomando como datos de entrada: i) la interacción Humano-Máquina y ii) la descripción formal de los elementos de la interfaz, infiere una serie de adaptaciones en un HMI industrial. La metodología diseñada en este capítulo, se centra en un escenario industrial en el cual, existen diferentes operarios que interactúan sobre el mismo proceso industrial a través del mismo HMI para realizar diversas tareas de supervisión y control.

Mediante técnicas de aprendizaje automático, la metodología infiere de manera no supervisada diferentes patrones de interacción y propone una serie de reglas de adaptación para conseguir reducir el tiempo de interacción de cada operario en tareas repetitivas de supervisión y control. A su vez, la metodología contempla la variabilidad en la interacción del operario a la hora de ejecutar la secuencia, reduciendo de esta manera los posibles errores cometidos y por consiguiente mejorando el rendimiento del operario.

## 4.1 INTRODUCCIÓN

La aplicación de técnicas de IA se ha focalizado casi de manera exclusiva en el ámbito de la fabricación inteligente dando lugar a procesos industriales altamente optimizados [128]. Sin embargo, existe una carencia a la hora de entender el comportamiento de los operarios con los diferentes procesos industriales.

Cualquier conjunto de acciones repetitivas en una franja de tiempo definida realizadas por un operario puede considerarse un patrón de interacción temporal [129]. La detección y análisis de dichos patrones de interacción temporal mediante técnicas de aprendizaje automático, proporciona información clave para determinar las reglas de adaptación en el intervalo de tiempo correcto. De este modo, la adaptación solo se producirá en aquellos intervalos de tiempo específicos en los que se produzcan los patrones de interacción sin penalizar la usabilidad e integridad del HMI.

A su vez, debemos destacar que existen diferentes escenarios industriales en los que las habilidades, las capacidades, las preferencias y el conocimiento del proceso de los operadores hacen que las secuencias de interacción operador-máquina resultantes no sean siempre idénticas cuando se realiza la misma tarea de supervisión y control. El error humano también puede ser un factor, y los operadores que cometen errores en tareas rutinarias pueden variar el número y el orden de las acciones que componen la secuencia de interacción operador-máquina. Esta variabilidad en las secuencias de interacción operador-máquina debe tenerse en cuenta en el proceso de adaptación inteligente del HMI, ya que proporciona información crítica sobre cómo, cuándo y bajo qué circunstancias el operario realiza una interacción.

Por último, la criticidad y las características de los procesos industriales actuales implica que la adaptación de las interfaces no siempre puede llevarse a cabo en tiempo real sin asumir ciertos riesgos. Es por ello que, la metodología diseñada presenta la adaptación de la interfaz como una serie de reglas ECA que primero han de ser revisadas y posteriormente implementadas.

## 4.2 METODOLOGÍA PLANTEADA

Tomando como referencia la metodología planteada en 3.2, en este capítulo se presenta una nueva metodología que define una serie de pasos para inferir un conjunto de reglas ECA de adaptación temporal en base a tiempo y por operario.

Esta metodología planteada toma como datos de entrada: i) la definición de la HMI industrial y ii) los datos de interacción, y mediante el uso de técnicas guiadas por datos (*Data-Driven*), genera como salida una lista de reglas ECA temporales. Estas adaptaciones inteligentes consisten en acciones de rediseño de la interfaz y de desplazamiento de los elementos de la interfaz.

Comenzamos con la definición de las entradas, que incluye una descripción formal del industrial y el conjunto de datos de interacción del operario. A continuación, se explican los diferentes pasos de la metodología propuesta para

1. Construir secuencias de interacción válidas.



2. Determinar cuáles son las secuencias más frecuentes y por tanto candidatas a la adaptación.
3. Analizar la similitud de las secuencias candidatas.
4. Identificar los intervalos de tiempo en los que las secuencias se producen con mayor frecuencia.
5. Generar la regla de adaptación temporal formalizada como regla ECA.

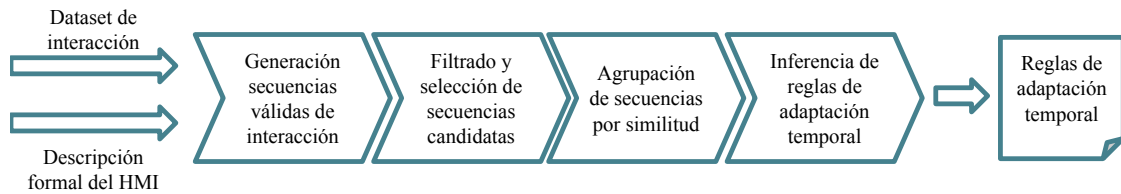


Figura 4.1: Metodología guiada por datos propuesta para la generación de reglas de adaptación temporal por operario

La Figura 4.1 muestra las diferentes etapas de la metodología propuesta. Partiendo del conjunto de datos de interacción operario-máquina y de la descripción formal de las interfaces que componen el HMI industrial, se infieren una serie de reglas de adaptación temporal que permiten optimizar la interacción en tareas repetitivas de cada operario para realizar las tareas de monitorización y control. A su vez, la metodología a través del análisis de similitud, agrupa las secuencias similares, de esta manera los posibles errores de interacción o duplicidad de los eventos quedan corregidos.

### 4.2.1 Descripción formal del HMI industrial

En los procesos de fabricación actuales, los operarios realizan tareas de supervisión y control a través de los HMI industriales pudiendo navegar, consultar y modificar las diferentes variables del proceso industrial mediante botones y enlaces.

Mediante el uso del lenguaje UIDL diseñado en la sección 3.2.1, en esta fase se describen formalmente todas las interfaces que componen el HMI industrial así como los diferentes elementos de cada una de ellas. De esta manera se generan los conjuntos  $\mathcal{H} = [hmi_1, hmi_2, \dots, hmi_n]$  que contiene la descripción formal de las interfaces e  $\mathcal{I} = [item_1, item_2, \dots, item_n]$  con los elementos que las constituyen.

Se debe recordar que el uso de este UIDL define que un elemento  $item_i$  solo puede pertenecer a una única interfaz  $hmi_i$ . ( $item_i \in hmi_j \rightarrow item_i \notin hmi_k \forall k \neq j$ ).

### 4.2.2 Especificación de una secuencia de interacción operario-máquina

En esta etapa de la metodología se especifica qué campos debemos capturar de manera no intrusiva en relación a la interacción operario-máquina para su posterior análisis.

Utilizando la misma definición de secuencia de interacción operario-máquina planteada en 3.2.2, definimos  $\mathcal{S} = [e_1, e_2, \dots, e_n] (e_i \in \mathcal{D})$  como un conjunto ordenado de eventos  $e_i := [t_i, a_i^j, p_i]$  que el operario lleva a cabo sobre una las diferentes interfaces que componen el HMI, donde:

- $t \in \mathbb{N}$  define el momento temporal.
- $a \in A = \{a_1^j, a_2^j, \dots, a_{n-1}^j, a_n^j\}$  donde  $A$  es un conjunto finito de interacciones conocidas y  $j$  es el identificador único del elemento interactivo.
- $p_i = (v_1, \dots, v_m) : i \in I$  son los valores almacenados de las diferentes variables de proceso.

Capturando y almacenando la información de esta manera, podemos identificar cada acción realizada por los operarios en cualquier tarea de supervisión y control.

Al final de esta fase, se obtiene un conjunto de datos de interacción operario-máquina  $\mathcal{S} = [e_1, e_2, \dots, e_n]$  con todas las acciones realizadas por el operario incluyendo la marca temporal y la información de las variables del proceso.

### 4.2.3 Generación de secuencias válidas de interacción

Este capítulo se centra en escenarios industriales donde los operarios se identifican con el HMI para realizar las tareas de supervisión y control. De esta manera, al disponer de esta información, se puede ofrecer una regla de adaptación personalizada por operario.

La acción inicial de identificación con el HMI implica que las condiciones de inicio y fin de secuencia difieran de las expuestas en la sección 3.2.3.1.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, definimos como una secuencia válida de interacción operario-máquina  $s_i = [e_{init}, e_1^i, \dots, e_{k_i}^i, e_{final}]$  a un conjunto de eventos  $e_i$  realizados por un operario sobre un HMI, donde:

- Los eventos  $e_{init}$  y  $e_{final}$  son conocidos y determinan el inicio y final de la secuencia. En este escenario  $e_{init}$  viene determinado por la identificación del operario con el HMI.
- El parámetro  $l$  determina la longitud de la secuencia y debe ser  $\geq 2$ .
- El evento  $e_i^j$  debe realizarse previamente a  $e_{i+1}^j$ , determinando el orden de la secuencia operario-máquina.

Con estas condiciones definidas, a través del uso del Algoritmo 1 descrito en la sección 3.2.3.1 se genera como salida el conjunto de datos  $\mathcal{V} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ . Este conjunto  $\mathcal{V}$  contiene todas las secuencias válidas de interacción operario-máquina que serán posteriormente analizadas para inferir las reglas de adaptación temporal por máquina.

#### 4.2.4 Filtrado y selección de secuencias candidatas

En este segundo paso, utilizando el conjunto de datos  $\mathcal{V}$  se determina primero y posteriormente se filtras qué secuencias válidas de interacción operario-máquina se repiten con mayor frecuencia. De esta manera, se identifican qué secuencias  $s_i$  pueden ser clasificadas como patrones de interacción y por consiguiente inferir una regla de adaptación sobre el HMI.

Cabe recordar que se debe establecer el umbral de repetición, definido por  $\alpha$  para discriminar que secuencias son frecuentes. Si el ratio de repetición de una secuencia  $s_i$ , definido por  $r$  como el número de veces que se repite en un intervalo concreto de tiempo, es superior al umbral  $\alpha$  establecido, la secuencia  $s_i$  se clasifica como frecuente.

Utilizando el Algoritmo 2, cuyo funcionamiento está explicado en la sección 3.2.3.2 de esta tesis, se puede detectar qué secuencias válidas de interacción son más frecuentes y así obtener las candidatas para generar una regla de adaptación. Para ello, el Algoritmo 2 analiza secuencialmente el conjunto de datos  $\mathcal{V}$  hasta que se llega a la última secuencia  $s_n$ . Si el ratio de repetición  $r$  de cada secuencia  $s_i$  es mayor que  $\alpha$ , ésta secuencia es seleccionada.

De esta manera, al finalizar este paso, se genera un conjunto de datos  $\mathcal{P} = [s_i] (i \in I \subseteq \{1, \dots, n\})$  donde  $I$  es un conjunto de índices con secuencias frecuentes válidas, que corresponden a patrones de interacción operador-máquina.

#### 4.2.5 Agrupación de secuencias candidatas en base a su grado de similitud

Como se discute en la sección 3.2.3.3, cualquier secuencia de interacción operario-máquina puede estar sujeta a la variabilidad por parte del mismo. Como resultado, el número de acciones realizadas, y/o el orden en que se genera la secuencia puede cambiar de tarea a tarea, y de operario a operario.

Esta variabilidad puede ser consecuencia de la destreza y las habilidades del operario, de sus errores de interacción o de posibles eventos duplicados no intencionados. Para garantizar que la variabilidad del operario no influye a la hora de seleccionar las secuencias de interacción operador-máquina para su adaptación, es importante analizar la similitud entre las mismas agrupándolas en caso de ser similares.

Es por ello que asumimos que dos secuencias válidas de interacción  $\mathcal{S} = (a_0, a_1, \dots, a_{n-2}, a_{n-1})$  y  $\mathcal{S}' = (a'_0, a'_1, \dots, a'_{n-2}, a'_{n-1})$  son similares y por consiguiente agrupadas si se cumplen las siguientes premisas:

- Premisa 1:  $a_0 = a'_0$  y  $a_n = a'_n$ . Las acciones iniciales y finales de  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  llevadas a cabo por el operario son las mismas.
- Premisa 2:  $\mathcal{S} \cap \mathcal{S}' \neq \emptyset$ . La variabilidad del operario (por ejemplo: errores de interacción o diferentes trayectorias tomadas) puede influir en la generación de la secuencia de interacción para la misma tarea de control y supervisión.
- Premisa 3: El grado de similitud, medido por el valor de la similitud del coseno, de  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  es mayor a un umbral predefinido  $\beta$ .

Mediante el uso del Algoritmo 3, en este paso de la metodología se analiza de manera secuencial el conjunto de datos  $\mathcal{S}$ , comparando cada elemento que lo compone con cada uno de los elementos del conjunto de datos  $\mathcal{P}$ . Cuando el grado de similitud entre  $s_i$  y  $s'_i$  es mayor que un umbral predefinido, definido  $\beta$ , el elemento  $s_i$  se añade a  $A_i$ , dando lugar a un grupo de secuencias similares. Finalmente el conjunto  $A_i$  se añade entonces a  $\mathcal{C}$  conteniendo todos los grupos de secuencias similares.

Al finalizar esta etapa, se obtiene un conjunto de datos  $\mathcal{C}$  que está formado por todas las secuencias candidatas para inferir una adaptación agrupadas por grado de similitud. Cada uno de los elementos de  $\mathcal{C}$  contiene el grupo de secuencias similares para cada una de las tareas de monitorización y control por parte de los operarios.

#### 4.2.6 Inferencia de reglas temporales de adaptación

Las reglas de adaptación inferidas en esta fase de la metodología se describen formalmente como reglas ECA donde:

- **E:** Determina el evento  $a_1^j$  que activa la regla.
- **C:**  $t_i \in T$ . Se comprueba si el momento en el que se active la regla está comprendido en alguno de los intervalos detectados .
- **A:** Se propone la adaptación: Mueve el elemento  $item_i$  al  $hmi_1$ .

Utilizando el conjunto de datos  $\mathcal{V}$  como entrada, en este paso de la metodología se generan las reglas de adaptación temporal en dos fases: i) detección automática de los intervalos de tiempo en los cuales se da más a menudo el patrón de interacción y ii) generación de las reglas de adaptación basadas en minería de secuencias.

De esta manera, se identifican por un lado el intervalo de tiempo  $\mathcal{T}$  en el que la interacción es más frecuente y después se analiza la secuencia de interacción completa para determinar qué *elemento<sub>i</sub>* podría adaptarse en el HMI.

La regla de adaptación ECA que se inferirá en esta etapa va a determinar qué *elemento<sub>i</sub>* debe trasladarse a qué interfaz *hmi<sub>i</sub>* en que intervalo de tiempo  $t_i$ . De este modo, se reduce el número de eventos del operario para realizar la acción y, por tanto, se optimiza la interacción.

#### 4.2.6.1 *Detección automática de los intervalos de tiempo*

En esta etapa de la metodología se detectan los intervalos de tiempo  $\mathcal{T}$  donde la regla debe ser activada. De esta manera se consigue que el HMI se adapte solo en los momentos del turno donde se da un patrón de interacción consiguiendo respetar la coherencia e integridad de la interfaz.

Para ello, mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje no supervisado como es el agrupamiento por densidad, conseguimos detectar de manera automática los intervalos de tiempo en los cuales la regla ha de ser activada.

Como se exponía en la sección 3.2.4 de esta tesis, el agrupamiento basado en densidad es un método de minería de datos no supervisado basado en funciones de conectividad y de densidad. Los grupos se determinan a partir de la densidad de los puntos, siguiendo la premisa de que las regiones con alta densidad de puntos están separadas entre sí por regiones de baja densidad. Los puntos que se encuentran fuera de un grupo se consideran valores *outliers*.

Se debe recalcar que un gran número de valores *outlier* en el conjunto de datos puede afectar negativamente a la precisión de las reglas de adaptación y, a su vez, en la usabilidad. Por esta razón, es importante mantener el número de *outliers* al mínimo.

De esta manera, en esta etapa de la metodología, aplicando técnicas de agrupamiento por densidad identificamos los diferentes intervalos de tiempo (grupos) en los cuales la regla ha de ser activada. El punto más a la izquierda del grupo y el punto más a la derecha del grupo determinan el inicio y fin del intervalo temporal.

#### 4.2.6.2 *Acciones de adaptación basadas en la minería de secuencias*

Una vez definidos los intervalos de adaptación  $\mathcal{T}$  en esta etapa se generan las reglas de adaptación temporal descritas formalmente como reglas ECA, donde:

- E: Evento  $a_1^j$  es activado. En este escenario, la interfaz  $hmi_i$  pasa de estado *en reposo* a estado *en activo*.
- C:  $t_i \in \mathcal{T}$ . El momento de tiempo actual está en alguno de los intervalos detectados cuya densidad es representativa.
- A: Mueve el elemento  $item_i$  a la interfaz  $hmi_1$ .

En esta última etapa de la metodología, mediante el uso del Algoritmo 5 definido en la sección 3.2.6, se analizan secuencialmente el conjunto de secuencias candidatas. El algoritmo analiza que elemento informativo  $item_i$  se encuentra en la interfaz  $hmi_n$ . En caso de que ese elemento no se encuentre en la interfaz  $hmi_1$ , el algoritmo propone una regla de adaptación sugiriendo mover ese elemento a la primera interfaz.

Como resultado de esta última etapa se genera un conjunto de reglas de adaptación por máquina  $\mathcal{R} = [rule_1, rule_2, \dots, rule_n]$ . Cuando estas reglas  $\mathcal{R}$  son implementadas a nivel de máquina para los diferentes operarios del mismo turno,

el HMI se adaptaría consiguiendo que el número de eventos necesarios para realizar las tareas de monitorización y control identificadas como frecuentes se vea notablemente reducido. Por consiguiente podemos afirmar que implicaría una mejora en la interacción operario-máquina y una optimización del rendimiento del operario.

### 4.3 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DISEÑADA

La validación de la metodología propuesta se ha realizado mediante un experimento con el mismo demostrador presentado en 3.3.1 teniendo en mente dos objetivos:

1. Inferir una serie de reglas de adaptación del HMI basadas en las interacciones operador-máquina.
2. Validar las reglas de adaptación inferidas mediante la aplicación en un HMI industrial.

La validación de la metodología diseñada consta dos fases: i) la fase 1, o fase de entrenamiento, encargada de reunir los datos de interacción operario-máquina suficientes para aprender y generar las reglas de adaptación y ii) la fase 2, o fase de validación, que comprende la validación de los cambios realizados en la interfaz tras aplicar las reglas de adaptación.

#### 4.3.1 Descripción del conjunto de datos utilizado

Del total del conjunto de datos de interacción operario-máquina capturado se han utilizado 10,008 interacciones en la Fase 1 para entrenar e inferir las reglas de adaptación de nuestro modelo. Para la validación del modelo (Fase 2), se han empleado un total de 1,024 interacciones.

#### 4.3.2 Descripción Formal de las interfaces que componen el HMI

Mediante el uso del lenguaje UIDL descrito en la sección 3.2.1 se ha generado un archivo JSON describiendo formalmente las interfaces que componen el HMI.

En el escenario actual analizado, el número de interfaces descritas en el fichero JSON mediante el lenguaje UIDL son seis:

1. Selección de usuario.
2. Selección de máquina.
3. Selección de vaso.
4. Selección de bebida.

5. Selección de nivel de azúcar.
6. Pantalla de confirmación.

Esta incremento en el número de interfaces formalmente descritas se da puesto que la interfaz de selección de operario se muestra en la arquitectura de navegación. De esta manera, el operario comienza la secuencia de interacción en la interfaz de identificación de usuario.

Autenticación de usuario	Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Autenticación de usuario	Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Autenticación de usuario	Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Autenticación de usuario	Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Autenticación de usuario	Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación
Autenticación de usuario	Selección de máquina	Selección de vaso	Selección de bebida	Selección nivel de azúcar	Confirmación

Figura 4.2: Ejemplo de secuencia de acciones realizadas por un operario sin seguir la arquitectura de navegación diseñada.

Como se puede observar en la Figura 4.2 el operario empieza su interacción con la máquina de café en la pantalla de selección de usuario. Seguidamente puede realizar las diferentes acciones sobre las interfaces sin necesidad de seguir el orden natural mostrado en pantalla.

### 4.3.3 Procedimiento seguido

Partiendo de la descripción formal de las interfaces del HMI y del conjunto de datos sin procesar de la interacción operario-máquina se ha seguido la metodología planteada para inferir una serie de reglas de adaptación temporal del HMI.

#### 4.3.3.1 Obtención de las secuencias válidas de interacción

Tomando como entrada el fichero de interacción sin procesar y mediante el uso del Algoritmo 1 se han generado las secuencias válidas de interacción operario-máquina.

Una secuencia válida comienza cuando el operario se identifica con la máquina como u09y finaliza cuando hace *click* en el botón BTN100K de la pantalla principal.

Tabla 4.1: Ejemplo de secuencia válida de interacción operario-máquina.

<b>Id</b>	<b>Marca de tiempo</b>	<b>Elemento</b>
881	1558333048305	BTN0u9
882	1558333063963	BTN1Azucar
883	1558333065339	BTN3ReduceAzucar
884	1558333067170	BTN30K
885	1558333069467	BTN1Bebida
886	1558333073638	BTN5Bebida-A
887	1558333075042	BTN50K
888	1558333076809	BTN100K

La Tabla 4.1 muestra un ejemplo de secuencia válida de interacción generada por el Algoritmo 1.

En este ejemplo, la secuencia comienza cuando el operario se identifica con la máquina BTN0u9, seguidamente reduce el nivel de azúcar BTN3ReduceAzucar (Por defecto el valor es igual a 3), a continuación selecciona la bebida Mixture-A mediante la interacción con el botón BTN5Bebida-A y por último, finaliza cuando presiona el botón BTN100K. Esta secuencia de ejemplo tiene una longitud de 8 eventos y su duración en tiempo es de 28 segundos.

Al final de esta fase de la metodología las 10.008 interacciones registradas por el sistema se han transformado en 894 secuencias válidas de interacción operario-máquina.

#### 4.3.3.2 Selección de las secuencias candidatas

Esta fase ha sido dividida en dos acciones,

1. Seleccionar los operarios que más interactúan con la máquina de café puesto que son los más representativos para el estudio.
2. Identificar sus secuencias más frecuentes.

La Figura 4.3 muestra los operarios que han interactuado más con el HMI durante el experimento. Como se puede observar, el número de interacciones sigue una tendencia exponencial, por lo que valores estadísticos como la media o la mediana para hacer establecer el umbral  $\alpha$  no son representativas en este contexto. Filtrando en este caso por el primer cuartil se han obtenido los operarios más representativos. Una vez filtrado este grupo de operarios, por cada uno de ellos se han seleccionado sus secuencias de interacción válidas más frecuentes.

La Figura 4.4 muestra el número de repeticiones de las secuencias de interacción válidas de un operario concreto. Como se puede observar, las repeticiones de las secuencias siguen una tendencia exponencial, lo que significa que las secuencias de interacción más repetitivas se han repetido muchas veces y las



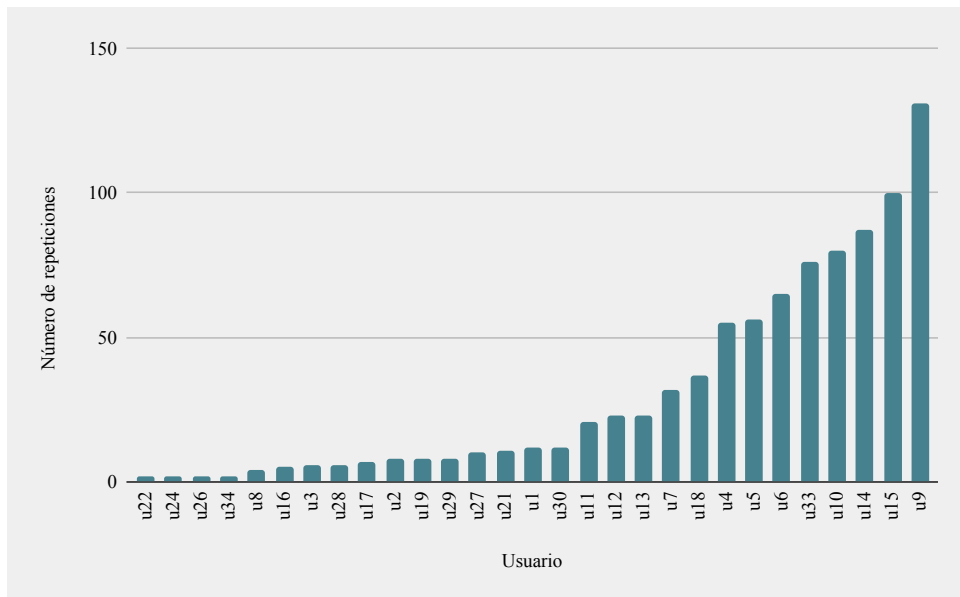


Figura 4.3: Distribución usuarios que más interactúan con la máquina.

interacciones menos comunes se han dado con menor frecuencia. Por este motivo definimos el umbral  $\alpha$ , que determina el número mínimo de veces que debe darse una secuencia válida para catalogarla como frecuente, al primer cuartil.

Al final de esta etapa, se han obtenido las secuencias candidatas de adaptación por cada operario. Estas secuencias son las que su número de repeticiones están por encima del umbral definido al primer cuartil.

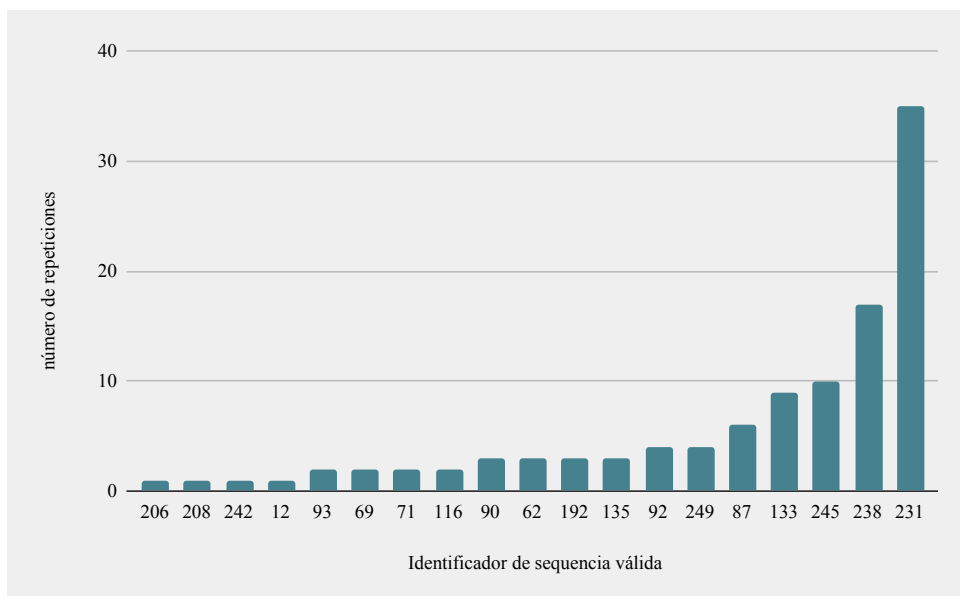


Figura 4.4: Número de repeticiones de las secuencias válidas del operario u09.

#### 4.3.3.3 Identificación de secuencias similares

A continuación, se han analizado las secuencias candidatas obtenidas en el anterior paso. Cada una de las secuencias candidatas se selecciona como secuencia de referencia y se identifican las secuencias similares dentro del conjunto de secuen-

cias válidas generadas por el Algoritmo 1. Esta acción de identificar y agrupar las secuencias similares se lleva a cabo mediante la aplicación del Algoritmo 3.

Cabe destacar que el uso de esta secuencia de referencia permite corregir pequeños errores en la interacción de los operarios, asimilando que la secuencia que contiene errores no intencionados es similar en cierto grado a la secuencia de referencia correcta.

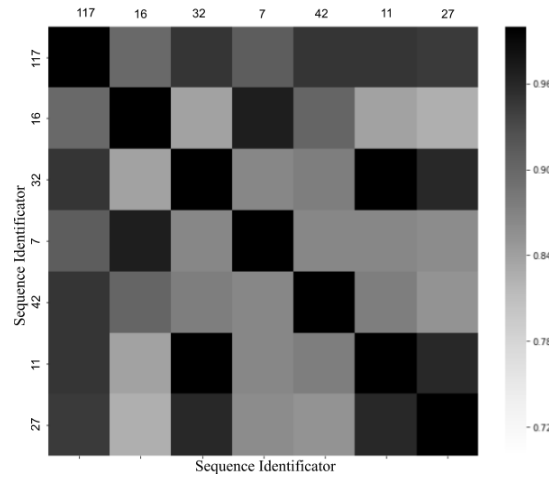


Figura 4.5: Grado de similitud de las secuencias de un operario concreto medido por la similitud del coseno.

La Figura 4.5 muestra la similitud del coseno para las secuencias de interacción que tienen las mismas acciones iniciales y finales de un operario concreto y la selección del producto es la misma. Podemos ver que la secuencia número #7 [BTNMixture, BTNmixtureA, BTNMixtureOK, BTN10K] es similar a la secuencia número #16 [BTNMixture, BTNMixtureOK, BTNMixture, BTNmixtureA, BTNMixtureOK, BTN10K] con una similitud del coseno de 0.96.

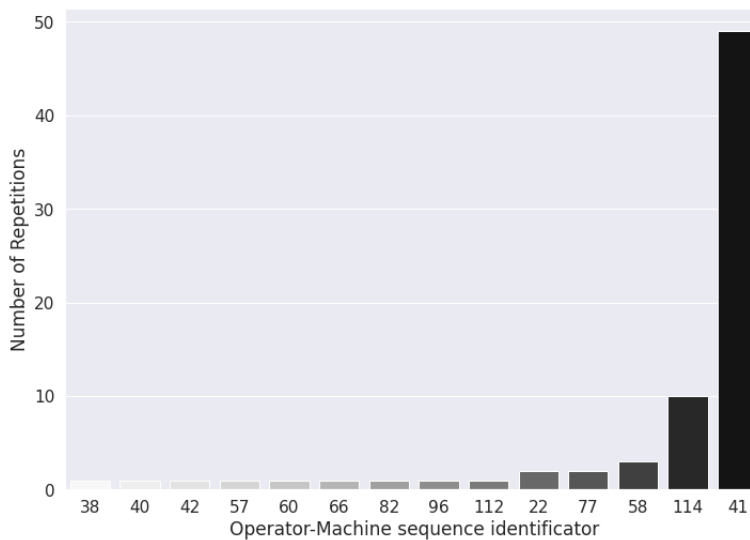


Figura 4.6: Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto sin agrupar por similitud.

En la Figura 4.6, se puede observar las secuencias más repetidas de un operario concreto. La Figura 4.7 muestra las secuencias agrupadas por grado de similitud

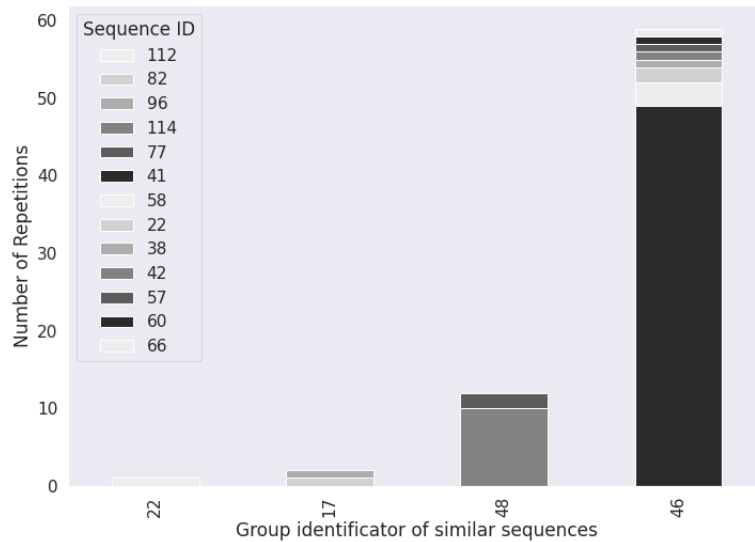


Figura 4.7: Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto agrupándolas por similitud a una secuencia de referencia.

y la suma de las repeticiones de todas ellas. Esto significa, por ejemplo, que el grupo de secuencias #46 es la agrupación de las secuencias de interacción #41, #58, #22, #38, #42, #57, #60, #66 y #96 porque estas secuencias son consideradas similares por el Algoritmo 3 a la secuencia #41.

En el escenario industrial en el cual se ha desarrollado el experimento, existe poca variabilidad de los operarios a la hora de realizar las secuencias de interacción, puesto que el número de productos y parámetros de ajuste son limitados y que la selección final del producto está condicionada por las preferencias de cada operario. En caso de darse la variabilidad, ésta viene dada por diferentes maneras de realizar las cosas (orden siguiendo arquitectura de información diseñada *vs* orden preferido por el operario) o pequeños errores de interacción como pueden ser eventos duplicados. Por este motivo el umbral de similitud entre dos secuencias, definido por  $\beta$ , está establecido en 0.8.

#### 4.3.3.4 Agrupación basado en densidad para determinar los intervalos de adaptación

Para la detección automática de los intervalos temporales donde las reglas han de ser activadas se ha utilizado el algoritmo Meanshift.

Al representar en un eje temporal cada una de las secuencias agrupadas a lo largo del tiempo con un punto, el algoritmo MeanShift ha detectado de manera no supervisada los grupos y ha descartado los valores *outliers*. Las zonas de alta densidad de puntos indican un grupo, y de cada uno de ellos, el punto más a la izquierda y el más a la derecha de cada grupo determinan el inicio y el final del intervalo temporal de adaptación.

La Figura 4.8 muestra la distribución en un espacio unidimensional antes de aplicar el algoritmo MeanShift. Cada punto representado en la gráfica representa las diferentes repeticiones de una secuencia concreta de un operario y la Figura 4.9 muestra los diferentes grupos y valores *outliers* detectados. En este caso,

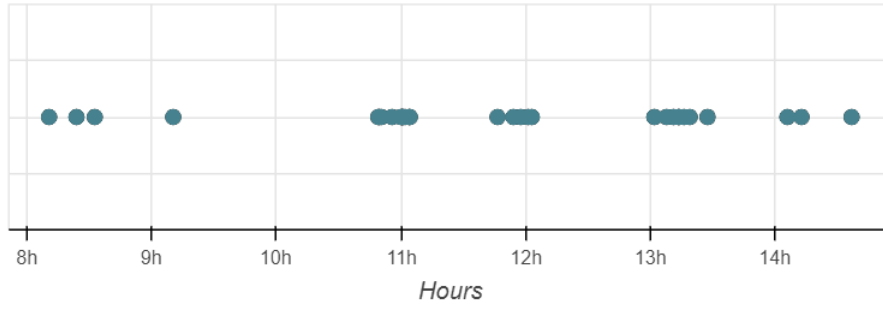


Figura 4.8: Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto agrupándolas por similitud a una secuencia de referencia.

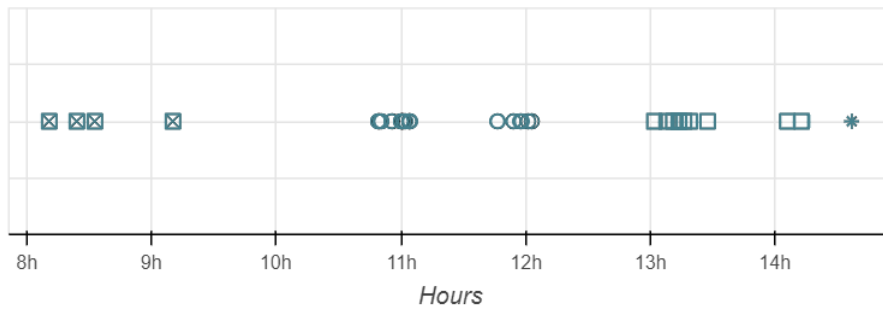


Figura 4.9: Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto agrupándolas por similitud a una secuencia de referencia.

para la secuencia concreta mostrada, se han detectado 3 grupos diferentes, que corresponden a las horas del día en las es más frecuente que el operario interactúe con el HMI industrial.

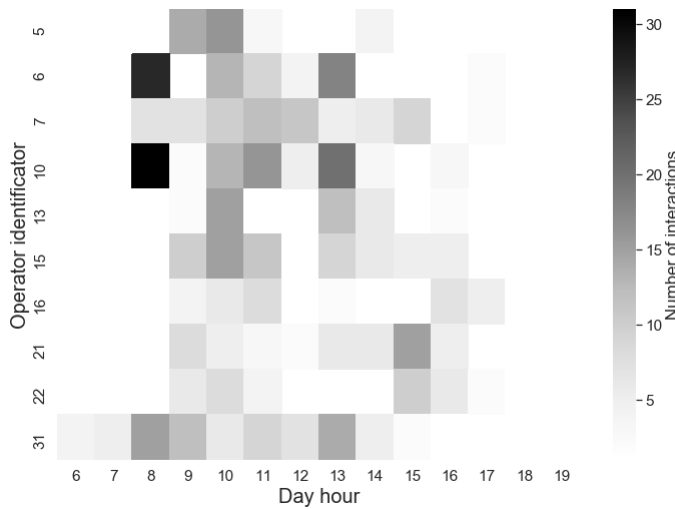


Figura 4.10: Horas del día donde se interactúa más con el HMI.

Estas agrupaciones automáticamente detectadas por MeanShift, son coherentes con el análisis preliminar exploratorio realizado para observar en qué intervalos los operarios interactúan más con el HMI. Como muestra la Figura 4.10, estos intervalos eran los siguientes: entre las 7:30 y 8:45, entre las 10:45 y las 11:15, y por último entre las 13:00 y las 14:15.

Para cada grupo detectado, se ha seleccionado los puntos más a la izquierda y más a la derecha, obteniendo el inicio y el final del intervalo de adaptación.

#### 4.3.3.5 Generación de reglas de adaptación

En este paso la secuencias candidatas y agrupadas por similitud han sido analizadas para inferir las reglas de adaptación. Las adaptaciones consisten en desplazar los elementos informativos que se encuentran en la última interfaz de la secuencia a la interfaz inicial del HMI.

Un ejemplo de regla de adaptación ECA inferida puede ser:

- **Evento:** User *u9* is logged.
- **Condición:** *current time is in detected clusters* [["08:10:37"- "09:25:36"], ["10:49:03"- "12:04:57"], ["13:01:50"14:36:44"]]
- **Acción:** *Move element* BTN3Azucar *to interface2* and *Move element* BTN5Mixture-01 *to interface2*.

Esta regla puede explicarse de la siguiente manera. El operario *u9* realiza la misma secuencia de interacción, en este caso personalizando el producto, en los intervalos de tiempo identificados. Por consiguiente, se propone adaptar la interfaz inicial mostrando los elementos informativos de la última interfaz que no se encuentran en la interfaz inicial del HMI.

Esta adaptación reduce el número de eventos de la secuencia pasando de 8 a 3, optimizando el proceso de interacción, ya que el operario no tendría que navegar hasta las diferentes pantallas para realizar su selección tanto de nivel de azúcar como de producto seleccionado.

## 4.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos de interacción recogidos durante el experimento han permitido validar la metodología diseñada. En las Tablas 4.2 y la Tabla 4.3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el experimento.

Para la fase 1 del experimento, se han utilizado 10.008 interacciones para inferir las reglas de adaptación de la interfaz de los participantes. En la fase 2 del experimento, se utilizaron 1.024 interacciones para la validación del modelo. Las precisiones obtenidas en ambas fases fueron del 91,7 % para el entrenamiento del modelo y el 84,5 % para la validación.

Estableciendo el umbral  $\alpha$  al percentil 25 para el filtrado de secuencias candidatas, se han obtenido 54 secuencias de interacción diferentes y, por tanto, 54 reglas de adaptación temporal. Por otro lado, definiendo el umbral en un valor menos restrictivo, observamos que el número de secuencias candidatas aumenta. Con el umbral  $\alpha$  fijado en el percentil 30, el número de secuencias candidatas aumentó en un 261 % pasando a tener 195 secuencias y fijando  $\alpha$  al percentil 35

Tabla 4.2: Resultados obtenidos en la fase 1 del experimento estableciendo  $\alpha$  = Percentil 25 (Entrenamiento del modelo).

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Interacciones de operario	10,008 clicks
Secuencias válidas	894
Tasa de ruido	11.26 %
Secuencias candidatas	54 secuencias
Nº reglas generadas	54 reglas
Media del nº eventos por secuencia	10.36 clicks
Duración media de la secuencia	29.62 segundos
Precisión fase entrenamiento	91.7 %

Tabla 4.3: Resultados obtenidos en la fase 2 del experimento (Validación del modelo).

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Interacciones de operario	1,024 clicks
Secuencias válidas	91
Media del nº eventos por secuencia	4.58 clicks
Duración media de la secuencia	7.24 seconds
Precisión del modelo	84.5 %

supuso un incremento del 292 % derivando en 212 secuencias. Se debe mencionar que, un volumen elevado de adaptaciones de la interfaz afecta negativamente a la usabilidad, integridad y coherencia de la misma [29].

En el caso del análisis del grado de similitud, estableciendo  $\beta$  en 0.8 se ha conseguido agrupar las secuencias candidatas en 48 grupos de secuencias que contienen secuencias de interacción similares. De esta manera posibles errores de interacción o acciones duplicadas en la secuencia han sido corregidas proponiendo la regla de adaptación temporal.

Para comprobar la validez de la metodología propuesta se han utilizado las mismas métricas de validación definidas en la sección 3.4. Estas métricas son las siguientes:

- $M_1$ : Número de clicks de la secuencia de interacción.
- $M_2$ : Duración en tiempo de la secuencia de interacción.
- $M_3$ : Validación por parte del operario de la adaptación temporal propuesta.

#### 4.4.1 Número de eventos de la secuencia tras la adaptación

Como se observa en la Tabla 4.2, existe una disminución del 44.20 % en el número de eventos de la secuencia. Cuando el operario utiliza el HMI sin aplicar las reglas de adaptación inferidas, la media del número de eventos en las secuencias candidatas es de 10.36, mientras que tras la activación de la regla de adaptación la media se reduce a 4.58.

Esta disminución del número de eventos se produce puesto que la activación de la regla de adaptación temporal modifica la interfaz inicial del HMI al operario. Una vez que el operario accede a la interfaz principal y, se infiere y aplica la regla de adaptación, la interfaz inicial se adapta y muestra los elementos informativos en la primera interfaz. Por consiguiente, el operario solo tiene que pulsar *OK* si la regla de adaptación es correcta, o en caso contrario la opción *Volver al menú* y realizar la secuencia de selección de valores.

A su vez la disminución del número de eventos que necesita el operario para completar una tarea determinada, implica reducir el número de posibles errores que puede cometer. Menos eventos equivale a menos oportunidades de cometer errores al realizar las tareas repetitivas de supervisión y control.

#### 4.4.2 Duración temporal media de la secuencia tras la adaptación

La tabla 4.3 muestra una reducción del 24.6 % en la duración media de la secuencia. Aplicando la metodología propuesta, la duración media de la secuencia es reducida de 29.42 a tan solo 7.24 segundos. Siendo el tiempo medio entre 3 y 4 segundos cuando la adaptación propuesta es satisfactoria para el operario.

Una vez activada la regla de adaptación temporal y posteriormente modificada la interfaz del HMI, el operario no necesita interactuar con el HMI para el ajuste

de los diferentes parámetros del producto. Por consiguiente, el tiempo medio de interacción se ve reducido significativamente.

### 4.4.3 Validación de la regla de adaptación por parte del operario

Esta métrica está definida como el porcentaje de veces que el operario pulsa el botón *OK* cuando la regla de adaptación es activada y presentada en la interfaz del HMI de la máquina de café.

Como se puede observar en la tabla 4.3, el 84,5 % de las adaptaciones propuestas en la interfaz fueron correctas y validadas por el operario al pulsar el botón *OK* de la interfaz adaptada. Esto significa que las reglas de adaptación inferidas por el sistema fueron mayoritariamente aceptadas por los operarios.

En el 15,5 % restante, las adaptaciones propuestas en el HMI de la máquina de café no fueron correctas y es por ello que el operario tuvo que realizar la secuencia completa para ajustar los valores de los diferentes parámetros de la bebida.

## 4.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El uso de interfaces adaptativas de usuario en escenarios industriales sugiere un prometedor paradigma en el que las interfaces son capaces de adaptarse de forma inteligente a las necesidades y comportamiento del operario y, por tanto, mejorar el rendimiento general del proceso industrial.

En escenarios industriales donde los operarios realizan tareas de monitorización y control de manera repetitiva, disponer de este tipo de adaptaciones inteligentes, puede mejorar su rendimiento como hemos podido observar y validar.

La contribución principal de este capítulo es una metodología guiada por datos para generar de reglas de adaptación temporal en escenarios industriales. Está metodología plantea una serie de fases las cuales tomando como entradas: i) la descripción formal de un HMI industrial y ii) un conjunto de datos de interacción sin procesar, infiere una serie de reglas de adaptación temporal para optimizar el proceso de interacción operario-máquina.

Estas reglas de adaptación inferidas por la metodología no solo optimizan el proceso de interacción mediante la reducción de tiempo de interacción en un 24.6 % y en un 44.20 % el número de eventos sino que a través de su aplicación en los intervalos de tiempo detectados, respeta la coherencia e integridad de la interfaz.



# Capítulo 5

---

## **METODOLOGÍA GUIADA POR DATOS PARA LA ADAPTACIÓN DE UN HMI EN BASE A TIEMPO, OPERARIO Y PROCESO**

---

La metodología diseñada en el capítulo 4 permite inferir una serie de reglas de adaptación temporal personalizada por operario en un HMI industrial. Por otro lado, la metodología expuesta en el capítulo 3 infiere un conjunto de reglas de adaptación temporal en escenarios industriales multi-operario, donde no se dispone de información para realizar una adaptación personalizada y por consiguiente, la adaptación se propone a nivel de máquina. Sendas metodologías no contemplan el estado del proceso a la hora de proponer las adaptaciones en el HMI.

Existen escenarios industriales en los cuales el estado del proceso a la hora de realizar las tareas de monitorización y control condiciona la interacción operario-máquina pudiendo hacer que ésta varíe. Por ello, es necesario analizar las variables del proceso e incluirlas como un parámetro más de entrada en el proceso de inferencia de las reglas ECA de adaptación.

Este capítulo, toma como base la metodología diseñada en el capítulo 4 y presenta una nueva metodología que incluye la información del estado del proceso industrial en el momento de inferir las reglas ECA. De esta manera, se consigue una adaptación temporal que tiene en cuenta la variabilidad que pueda generar el estado del proceso industrial a la hora efectuarse la interacción operario-máquina.

## 5.1 INTRODUCCIÓN

La capacidad de extraer y almacenar los datos de los diferentes procesos industriales ha dado pie a disponer de una fuente de información muy valiosa a la hora de analizar su comportamiento y poder extraer conclusiones.

El análisis de los datos provenientes de diferentes sensores implantados en los procesos industriales ha dado pie a diferentes técnicas de control de procesos basados en la información de los estados de los mismos. En la actualidad, técnicas de mantenimiento basado en condiciones [130], el mantenimiento predictivo [131] y el mantenimiento proactivo [132], se han ido incorporando gradualmente para mejorar los procesos de fabricación.

El estado del proceso puede influir la manera en la cual el operario realiza las tareas de monitorización y control del proceso industrial. Así mismo, el estado puede repercutir en las tareas que el operario no puede realizar o por el contrario, sugerirle que realice alguna tarea la cual no es frecuente y por consiguiente no sea reconocida como patrón de interacción por las metodologías planteadas en capítulos previos.

Por ello es necesario disponer de una metodología guiada por datos capaz de inferir una serie de reglas de adaptación basándose en el estado del proceso, además de los datos de interacción operario máquina y la descripción del HMI. De esta manera, cuando se den varias reglas de adaptación temporal posibles en un mismo intervalo de tiempo, la metodología debe ser capaz de discriminar qué regla activar en base a la información del proceso.

Como se puede ver en la Figura 5.1, pueden ocurrir situaciones en las que en un mismo instante de tiempo haya dos secuencias de interacción ( $s_1$  y  $s_2$ ) candidatas a generar una regla de adaptación temporal. Sin embargo, en función de los valores del estado del proceso ( $E_1$  y  $E_2$ ) solo una tendrá sentido. De esta manera, la metodología propuesta en este capítulo analiza el estado del proceso para seleccionar la regla de adaptación a activarse.

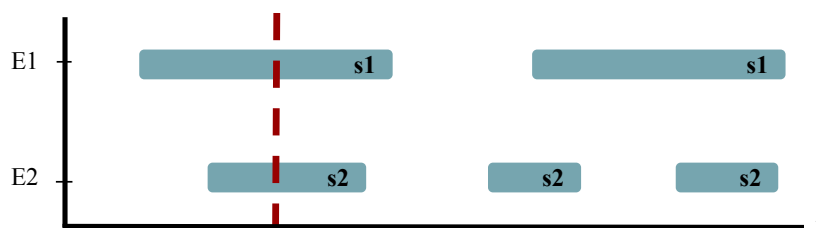


Figura 5.1: Secuencias de interacción solapadas en un momento concreto de tiempo.

En este capítulo se plantea una metodología guiada por datos que en base a los valores de una única variable de las que describen el estado del proceso, los datos de interacción operario-máquina y la descripción formal del HMI, genera una regla de adaptación temporal formulada como regla ECA.

## 5.2 METODOLOGÍA PLANTEADA

Esta sección propone una metodología guiada por datos con el objetivo principal de inferir una serie de reglas de adaptación temporal de un HMI industrial en escenarios donde el estado del proceso condiciona la interacción operario-máquina. Utilizando como base la metodología planteada en la sección 4.2, la nueva metodología define una serie de pasos adicionales para analizar el estado del proceso en el momento que ocurre la interacción operario-máquina.

Tomando como entradas por una parte i) la descripción formal del HMI industrial, ii) la información referente a la interacción operario-máquina y por último iii) la información almacenada sobre el estado del proceso industrial, mediante la aplicación de técnicas guiadas por datos se generan un conjunto de reglas de adaptación temporal por operario y estado del proceso.

De igual manera que en las metodologías expuestas en los capítulos 3 y 4, las adaptaciones sugeridas respetan los criterios de integridad y coherencia mediante la especificación del intervalo temporal en el cual la regla debe ser activada.

Esta sección comienza definiendo las entradas de la metodología, que incluye la descripción formal del HMI industrial, el conjunto de datos de interacción operario-máquina y la información referente al estado del proceso. Seguido, se explican las diferentes etapas de la metodología planteada para:

1. Generar las secuencias válidas de interacción operario-máquina.
2. Seleccionar las secuencias candidatas en base a su frecuencia.
3. Analizar la similitud de las secuencias para posteriormente agruparlas en conjuntos de reglas similares.
4. Comprobar el estado del proceso en el momento que un operario inicia la secuencia interacción para determinar las condiciones de activación de la regla
5. Por último inferir las reglas ECA de adaptación temporal.

La Figura 5.2 muestra la secuencia de etapas que sigue la metodología propuesta.

### 5.2.1 Descripción Formal del HMI industrial

A través del lenguaje UIDL planteado en la sección 3.2.1, en esta fase se describen formalmente todas las interfaces y sus diferentes elementos que componen el HMI, generando el conjunto  $\mathcal{H} = [hmi_1, hmi_2, \dots, hmi_n]$  y el conjunto  $\mathcal{I} = [item_1, item_2, \dots, item_n]$ . Se debe recordar que un elemento  $item_i$  puede ser informativo o interactivo y éste solo puede pertenecer a una única interfaz ( $item_i \in hmi_j \rightarrow item_i \notin hmi_k \forall k \neq j$ ).

Una vez finalizada esta etapa preliminar de la metodología se obtienen dos conjuntos de datos los cuales se utilizarán como entrada en la metodología: i) La descripción formal de las diferentes interfaces que componen el ( $\mathcal{H}$ ) y ii) el conjunto de elementos  $\mathcal{I}$  que constituyen  $\mathcal{H}$ .

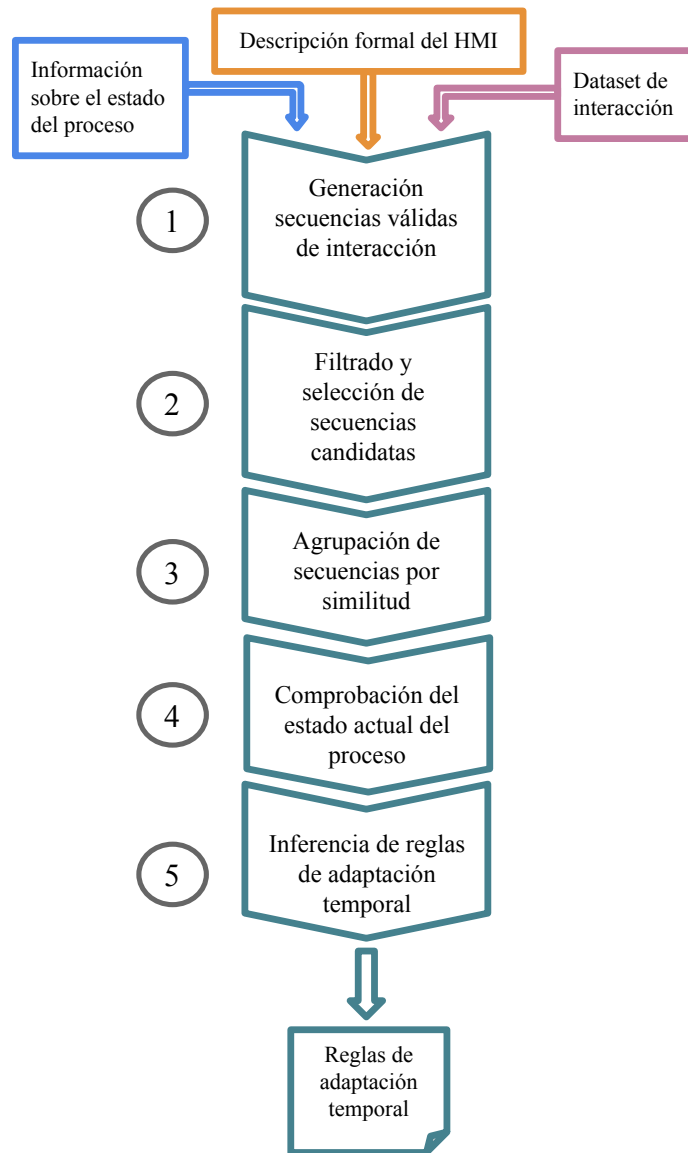


Figura 5.2: Metodología guiada por datos propuesta para la generación de reglas de adaptación temporal por máquina.

### 5.2.2 Especificación de una secuencia de interacción operario-máquina

En esta etapa de la metodología se especifica qué información se debe capturar y almacenar en el momento que un operario realiza una tarea de monitorización y control del proceso industria a través del HMI.

Siguiendo la definición de secuencia de interacción operario-máquina propuesta en la sección 3.2.2, en esta etapa definimos  $\mathcal{S} = [e_1, e_2, \dots, s_n](e_i \in \mathcal{D})$  como un conjunto ordenado de eventos  $e_i := [t_i, a_i^j, p_i]$  llevados a cabo por un operario sobre las diferentes interfaces que componen el HMI, en el cual:

- $t \in \mathbb{N}$  define el momento temporal en el que ocurre cada evento.
- $a \in A = \{a_1^j, a_2^j, \dots, a_{n-1}^j, a_n^j\}$  donde  $A$  es un conjunto finito de interacciones conocidas y  $j$  es el identificador único del elemento interactivo.

- $p_i = (v_1, \dots, v_m) : i \in I$  son los valores almacenados de las diferentes variables relacionadas con el estado del proceso industrial que posteriormente serán analizados para inferir las reglas de adaptación temporal.

De esta manera, se puede identificar cada acción realizada por el operario en cualquier tarea de supervisión y control así como el valor de las variables referentes al estado del proceso en el momento de la misma.

Al concluir esta fase preliminar, se genera un conjunto de datos de interacción operario-máquina  $\mathcal{S} = [e_1, e_2, \dots, e_n]$  el cual contiene no solo las acciones realizadas por el operario sino que también la información referente al estado del proceso industrial.

### 5.2.3 Filtrado y selección de secuencias candidatas de adaptación

Del mismo modo que se ha planteado en las anteriores metodologías de esta tesis, secciones 4.2 y 3.2, el objetivo de esta fase es conseguir las secuencias candidatas de interacción  $\mathcal{C}$ . Cada una de las secuencias que componen  $\mathcal{C}$  generará una regla de adaptación temporal.

Para ello, se debe primeramente: i) generar las secuencias de interacción válidas operario-máquina  $\mathcal{V}$  a partir del conjunto de datos  $\mathcal{S}$ , a continuación ii) identificar y filtrar los patrones temporales de interacción operario-máquina más frecuentes que se dan en un intervalo de tiempo concreto, y por último iii) mediante el agrupamiento por el grado de similitud de las diferentes secuencias válidas  $\mathcal{V}$ , generar el conjunto de datos  $\mathcal{C}$  con las secuencias candidatas a generar una regla de adaptación.

#### 5.2.3.1 Generación de secuencias válidas de interacción operario-máquina

Como hemos definido en la sección 5.1, este capítulo se enfoca en escenarios industriales donde el estado del proceso puede condicionar la secuencia de interacción del operario. En función del valor de las diferentes variables utilizadas para representar el estado del proceso, un operario puede realizar diferentes acciones para acometer una misma tarea o por el contrario realizar una tarea diferente. Esto conlleva a que la regla que se infiera debe ser dependiente no solo del operario sino también del estado del proceso.

Aplicando el Algoritmo 1 descrito en la sección 3.2.3.1 al conjunto de datos de interacción operario-máquina que se le pasa como parámetro de entrada, en esta fase de la metodología se genera el conjunto de secuencias válidas de interacción  $\mathcal{V} = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ , el cual está compuesto por  $s_i = [e_{init}, e_1^j, \dots, e_k^j, e_{final}]$  siendo  $e_i := [t_i, a_i^j, p_i]$ , donde:

- El evento  $e_{init}$  es un evento conocido y determina el inicio de la secuencia de interacción operario-máquina.
- El evento  $e_{final}$  es conocido y determina el final de la secuencia de interacción operario-máquina.

- El parámetro  $l$  determina la longitud de la secuencia y debe ser  $\geq 2$ .
- El evento  $e_{i+j}^j$  debe realizarse posteriormente al evento  $e_i^j$ , de esta manera se determina el orden de la secuencia operario-máquina.
- El array  $p_i$  almacena los valores de las diferentes variables que describen el estado del proceso industrial.

A la conclusión de esta etapa se obtiene como salida el conjunto de datos  $\mathcal{V} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ . Dicho conjunto  $\mathcal{V}$  está compuesto por todas válidas de interacción operario-máquina incluyendo a su vez la información referente al estado del proceso en el momento que ocurre la interacción. Estas secuencias  $s_i$  serán posteriormente utilizadas en el proceso de inferencia de reglas de adaptación temporal por operario y estado del proceso.

### 5.2.3.2 *Filtrado y selección de secuencias de interacción operario-maquina candidatas a generar una regla de adaptación*

En esta etapa de la metodología, al igual que en la sección 3.2.3.2, se filtran las secuencias más frecuentes de interacción operario-máquina en un intervalo concreto de tiempo determinando los patrones de interacción temporal. Dichos patrones, definen las secuencias de interacción válidas son clasificadas como candidatas a generar una regla de adaptación en el HMI.

La frecuencia de repetición en intervalo concreto de tiempo dictamina si una secuencia válida  $s_i$  se clasifica como patrón de interacción temporal si es superior al umbral  $\alpha$ .

En esta etapa, mediante la aplicación del Algoritmo 2, se pueden identificar las secuencias válidas de interacción las cuales ocurren con mayor frecuencia y a su vez se descartan las menos frecuentes. Para ello, el Algoritmo 2 analiza de manera secuencial el conjunto de datos  $\mathcal{V}$  hasta llegar a la ultima secuencia  $s_n$ . Si el ratio de repetición  $r$  de cada secuencia  $s_i$  es mayor que  $\alpha$ , esta  $s_i$  es clasificada como candidata.

Como resultado de salida en esta etapa se obtiene el conjunto de datos  $\mathcal{P} = [s_i] (i \in I \subseteq \{1, \dots, n\})$  donde  $\mathcal{I}$  corresponde a un conjunto de índices con secuencias frecuentes válidas, las cuales son candidatas a generar una regla de adaptación.

### 5.2.3.3 *Detección y agrupamiento de secuencias de interacción operario-máquina similares*

Las secuencias de interacción operario-máquina pueden estar sujetas a una cierta variabilidad. El orden de como se generan las diferentes acciones en una misma tarea de supervisión y control así como posibles errores de interacción o eventos duplicados son consecuencia de las destrezas y habilidades del operario o de su conocimiento sobre el proceso industrial.

Como se ha planteado en la sección 3.2.3.3, el número de acciones realizadas para una misma secuencia de interacción así como el orden en el que se genera la

secuencia puede diferir para obtener reglas de adaptación más personalizadas y subsanar posibles errores de interacción.

Por consiguiente, en esta etapa consideramos como dos secuencias similares  $\mathcal{S} = (a_0, a_1, \dots, a_{n-2}, a_{n-1})$  y  $\mathcal{S}' = (a'_0, a'_1, \dots, a'_{n-2}, a'_{n-1})$  si se cumplen las siguientes premisas:

- Premisa 1:  $a_0 = a'_0$ . Las acciones iniciales de  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  son las mismas, siendo determinadas por el inicio de la secuencia válida de interacción.
- Premisa 2:  $a_n = a'_n$ . Las acciones finales de las secuencias válidas de interacción  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  son las mismas.
- Premisa 3:  $\mathcal{S} \cap \mathcal{S}' \neq \emptyset$ . La variabilidad del operario puede influir en la generación de la secuencia válida de interacción en términos de orden de la secuencia o eventos duplicados.
- Premisa 4: El grado de similitud de ambas secuencias válidas de interacción  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$ , determinado por la similitud del coseno  $\cos(\theta)$ , siendo  $\theta$  el ángulo que forman las secuencias  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{S}'$  vectorizadas en un espacio multidimensional, está por encima de un valor umbral predefinido  $\beta$ .

Aplicando el Algoritmo 3, se analiza de manera secuencial el conjunto de datos de interacción operario-máquina  $\mathcal{S}$ , comparando cada secuencia  $s_i$  con las secuencias  $s'_i$  que componen  $\mathcal{P}$ . En caso de que el grado de similitud entre  $s_i$  y  $s'_i$  sea mayor al umbral  $\beta$ , la secuencia  $s_i$  se añade a  $A_i$ . Finalmente, una vez analizadas todas las secuencias de  $\mathcal{S}$ , el conjunto  $A_i$  se añade a  $\mathcal{C}$ , el cual contiene todos los grupos de secuencias similares.

Como resultado de salida en esta etapa, se obtiene un conjunto de datos  $\mathcal{C} = [[s'_i, s_j, \dots, s_k], \dots, [s'_n, s_j, \dots, s_k]]$  el cual está compuesto por todos los grupos de secuencias candidatas agrupadas por similitud. Cada uno de los grupos que componen  $\mathcal{C}$  está a su vez compuesto por las secuencias candidatas a adaptación. Al estar agrupadas por similitud, la regla de adaptación temporal del HMI solo se inferirá a partir del primer elemento de cada grupo ( $s'_i$ ) al ser ésta la secuencia de referencia utilizada para analizar la similitud.

#### 5.2.4 Detección automática de intervalos temporales para la activación de las reglas de adaptación

Para la detección automática de los intervalos de tiempo  $\mathcal{T}$  en los cuales la regla de adaptación ha de ser activada se hace uso del agrupamiento por densidad. Éste método de aprendizaje no supervisado, determina de manera automática los diferentes grupos basándose en la densidad de puntos y a su vez descarta los valores *outliers* de un conjunto de datos que se le pasa como parámetro.

Como se explica en la sección 3.2.4 de esta tesis, debemos recordar que el agrupamiento basado en densidad es un método de minería de datos no supervisado que determina diferentes grupos en una muestra de datos en base a funciones de conectividad y densidad. A su vez, para respetar los criterios de usabilidad y

UX establecidos, mediante la activación temporal de las reglas de adaptación, se consigue establecer en qué intervalo de tiempo exacto se debe activar una regla a un operario concreto.

En esta etapa de la metodología, mediante la aplicación de técnicas de agrupamiento por densidad se identifican los diferentes intervalos de tiempo en los cuales la regla de adaptación ha de ser propuesta a un operario concreto. Los valores que determinan el inicio y final del grupo, representan el inicio y final del intervalo temporal.

### 5.2.5 Generación de reglas de adaptación mediante minería de secuencias

En el escenario analizado en éste capítulo, el estado del proceso industrial puede condicionar secuencia de interacción operario-máquina. Si el proceso se encuentra en un estado en el cual no permite al operario realizar la tarea de monitorización y control deseada, puede darse el caso que el operario realice una tarea alternativa o diferente.

Esta realización de tareas alternativas condicionadas por el estado del proceso generan una serie de secuencias de interacción operario-máquina que han de ser contempladas en el proceso de inferencia de reglas de adaptación. De esta manera, la metodología propuesta en este capítulo, infiere un conjunto de reglas de adaptación temporal consiguiendo una personalización por operario y a su vez por estado del proceso mejorando el rendimiento y la satisfacción del operario. En el escenario actual analizado, la metodología se centra en una única variable descriptiva del estado del proceso. En caso de tener en cuenta varias variables descriptivas del estado del proceso, sería necesario realizar una selección de la más representativa.

La metodología propuesta en este capítulo, debe ser capaz de detectar que secuencias se solapan en el tiempo y a su vez, analizar el valor de las variables que describen al proceso, siendo estos valores los que generen una nueva condición dentro de la regla de adaptación temporal.

En esta última etapa de la metodología, generamos las reglas de adaptación temporal del HMI formuladas como reglas ECA.

Analizando el conjunto de datos  $\mathcal{L}$  que obtenemos como salida en la fase anterior, mediante la minería de secuencias generamos un conjunto de datos  $R = [rule_1, rule_2, \dots, rule_n]$  el cual contiene todas las reglas de adaptación que han de llevarse a cabo en el diseño del HMI. Cada una de estas reglas  $rule_n$  se describe formalmente como regla ECA, donde:

- E: Evento  $a_1^j$  es activado. En el escenario actual viene dado por cuando el operario se autentica con la máquina para iniciar la secuencia de interacción
- C:  $(t_i \in \mathcal{T})$  **and**  $(pcs = ps_i)$ . El momento de tiempo actual esta en alguno de los intervalos detectados cuya densidad es representativa y el estado actual del proceso actual  $pcs$  es igual al estado del proceso guardado en la secuencia candidata  $ps_i$ .



---

**Algoritmo 6** Generador de acciones de adaptación en base al estado del proceso industrial.

---

**Data:**  $\langle L = (s_1, s_2, \dots, s_n) \rangle$

**Result:**  $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$

```

foreach  $s_i$  in  $L$  do
  extract different steps of  $s_i$ 
  get  $ps_i$  of  $s_i$ 
  foreach  $ps_i$  in  $s_i$  do
    if (itemi of hmin is informative and not in hmi1) then
      | move itemi to  $hmi_1$ 
    end
  end
end

```

---

- A: Mueve el elemento  $item_i$  a la interfaz  $hmi_1$ .

Para la generación de las reglas ECA se ha modificado el Algoritmo 5 para incorporar la información del estado del proceso en la condición. Esta modificación ha generado como resultado el Algoritmo 6, cuyo funcionamiento se explica a continuación:

1. Se analizan de manera secuencial el conjunto de secuencias candidatas definidas por  $\mathcal{L}$ .
2. Por cada una de las secuencias  $s_i$  que contiene  $\mathcal{L}$  se extraen los diferentes eventos que componen la secuencia.
3. Se comprueba el valor del estado del proceso almacenado  $ps_i$  para la secuencia  $s_i$ .
4. Para cada uno de los valores de los estados del proceso se define una acción que consiste en mover el elemento  $item_i$  a la interfaz  $hmi_1$  en caso de que este sea informativo y no se encuentre ya en la interfaz  $hmi_1$ .

Como resultado de esta última etapa de la metodología propuesta, se genera un conjunto de reglas de adaptación temporal por operario y estado del proceso  $\mathcal{R} = [rule_1, rule_2, \dots, rule_n]$ .

Cuando las reglas inferidas son implementadas en el HMI, el operario obtendría un HMI adaptado con el cual se reduciría considerablemente el número de eventos necesarios para realizar la tarea de monitorización y control. A su vez, al tener en cuenta la información estado del proceso, la adaptación contemplaría la situación del proceso industrial a la hora de proponer una adaptación. De esta manera se consigue una mejora en el rendimiento del operario a través de la optimización de la interacción operario-máquina.

## 5.3 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA

Para poder validar la metodología diseñada en este capítulo se ha realizado un experimento en un escenario real con diferentes operarios con el objetivo de:

i) inferir una serie de reglas de adaptación temporal de un HMI industrial en escenarios donde el estado del proceso puede influir en las tareas de control y supervisión y ii) validar las reglas de adaptación inferidas aplicándolas en un HMI industrial para comprobar las mejoras en el proceso de interacción operario-máquina.

La experimentación de la metodología ha sido dividida en dos fases:

1. Fase de entrenamiento del modelo o fase 1, que ha estado centrada en la preparación y entrenamiento del modelo a través de los datos de interacción operario-máquina.
2. Fase de validación o fase 2, en la que se han validado las adaptaciones inferidas aplicándolas en un HMI.

Para ello se ha utilizado el mismo demostrador que en las anteriores metodologías planteadas en los capítulos 3 y 4. Cuando un operario llega a la máquina, realiza una serie de interacciones sobre la interfaz para configurar un producto concreto. Sin embargo en éste escenario analizado, para condicionar las secuencias de interacción en base al estado del proceso se han restringido las opciones disponibles en base a los valores del estado del proceso a la hora de seleccionar el producto, para de esta manera condicionar su interacción con el proceso industrial.

El demostrador en este experimento permite al operario seleccionar diferentes parámetros para configurar su producto. En este caso tipo de producto, nivel de azúcar o selección de recipiente.

Tabla 5.1: Variables de proceso analizadas en el experimento.

Variable	Tipo
Producto	Numérico [1..16]
Nivel	Booleano [ <i>True</i> / <i>False</i> ]

La Tabla 5.1, describe las variables de proceso analizadas en este experimento. La variable producto define con un valor numérico la disponibilidad o no de los diferentes productos que pueden obtenerse en la máquina. En el escenario analizado en éste capítulo, se ha limitado que solamente un único producto no esté disponible de los 16 posibles en el momento de darse la interacción. Por otro lado, la variable nivel mostrada en la misma tabla, corresponde a un valor binario que en caso de tener el valor *true* el operario no puede configurar el nivel de azúcar del producto.

Restringiendo las opciones disponibles, se ha conseguido disponer de un proceso industrial donde dependiendo de su estado, el operario puede realizar diferentes secuencias de interacción. De este modo, por ejemplo, si el operario siempre selecciona el mismo producto o realiza la misma configuración de un producto, en caso de no disponer de ese producto concreto ha de realizar otra selección.



Figura 5.3: Interfaz de selección de producto condicionada por el estado del proceso.

La figura 5.3 muestra la interfaz de selección del producto al operario. En este caso, al no disponer del producto 2 esta opción queda deshabilitada para el operario. Por consiguiente el operario debe realizar otra selección. De esta manera, la secuencia de interacción operario-máquina queda condicionada a los valores del estado del proceso.

### 5.3.1 Descripción de los participantes y del conjunto de datos utilizado

Durante un período de duración de 4 meses, todas las interacciones realizadas con la máquina industrial por un grupo de 34 operarios para obtener los productos han sido capturadas y almacenadas. A su vez, se ha almacenado el valor de las variables de proceso en el momento de la interacción para posteriormente ser utilizada esta información en el proceso de reglas de adaptación temporal.

Durante los 4 meses de duración del experimento, se han capturado de manera no intrusiva un total de 15.198 interacciones únicas. Cada uno de los registros que componen este conjunto de datos de interacción contienen a su vez los valores de las variables que describen el estado del proceso industrial en cada interacción.

### 5.3.2 Descripción Formal de las interfaces que componen el HMI de la máquina

Las diferentes interfaces diseñadas para el experimento han sido descritas formalmente utilizando el lenguaje UIDL definido en la sección 3.2.1. Al concluir esta etapa preliminar se ha generado un archivo en formato JSON que contiene la descripción formal de las siguientes que componen el demostrador. Éstas interfaces son las siguientes:

- Selección de operario: Interfaz donde el operario selecciona su usuario para autenticarse con la máquina. Esta acción determinará el inicio de la secuencia de interacción.
- Selección de máquina: Interfaz de selección de la máquina que va a preparar el producto.

- Selección de vaso: Interfaz donde el operario puede seleccionar si utilizar un recipiente propio o no.
- Selección de bebida: Interfaz con los diferentes productos que el operario puede seleccionar.
- Selección de nivel de azúcar: Interfaz donde el operario puede ajustar el nivel a través de dos botones interactivos. Por defecto el valor es 3, pudiendo incrementar hasta nivel 5 o reducir el nivel de azúcar hasta 0.
- Pantalla de confirmación: Interfaz donde se describe la selección de producto realizada por el operario con sus diferentes ajustes. Cuando el operario valida la selección ha de pulsar en el botón de OK o por el contrario pulsar en el botón volver para realizar de nuevo la secuencia de interacción.

### 5.3.3 Procedimiento seguido en la experimentación

Tomando como entrada la descripción formal de las interfaces de la máquina y el conjunto de datos de interacción, se ha seguido la metodología expuesta en la sección 5.2 para inferir un conjunto de reglas de adaptación temporal que tienen en cuenta el estado del proceso.

Dichas reglas de adaptación, formuladas como reglas ECA, son inferidas a nivel de operario en base al tiempo y estado del proceso industrial.

#### 5.3.3.1 *Generación de las secuencias válidas de interacción*

En esta fase de la experimentación utilizando el conjunto de datos de interacción operario-máquina a través del uso del Algoritmo 1 se generaron las secuencias válidas de interacción operario-máquina. En el escenario actual analizado en este capítulo, la condición de inicio de secuencia viene dada por la identificación del operario y la de finalización cuando el operario selecciona el botón de confirmación BTN100K.

La Tabla 5.2, muestra un ejemplo de secuencia de interacción válida de 5 eventos obtenida por el Algoritmo 1. En este ejemplo, el operario #18 se identifica con la máquina seleccionando el botón BTNu18, selecciona el producto #7 mediante el botón BTN5Bebida-7 y finaliza la secuencia a través del botón de confirmación BTN100K. Podemos a su vez comprobar los valores asociados al estado del proceso. En este caso, el producto 3 no está disponible por lo cual no podrá ser seleccionado por el operario. En el caso del nivel de azúcar, el valor del parámetro es igual a *True* por lo que permite al operario ajustar el valor del nivel.

Al concluir esta etapa, las 15.198 interacciones únicas se transformaron en 1380 secuencias válidas de interacción operario-máquina.

#### 5.3.3.2 *Selección de las secuencias válidas de interacción frecuentes*

Para determinar las secuencias válidas de interacción frecuentes, se ha hecho uso del Algoritmo 2 definiendo el umbral de repetición  $\alpha$  en el percentil 25. Como se explica en la sección 3.2.3.2, el valor umbral  $\alpha$  determina el ratio mínimo de

Tabla 5.2: Ejemplo de secuencia válida de interacción operario-máquina para la obtención de un producto con las variables de proceso asociadas.

Timestamp	Elemento	Producto	Nivel
159833301800	BTN100K	4	True
...	...	...	...
1598333063933	BTNu18	3	True
1598333069447	BTN1Bebida	3	True
1598333074628	BTN5Bebida-7	3	True
1598333075149	BTN50K	3	True
1598333077809	BTN100K	3	True
...	...	...	...
1558334107608	BTNu07	12	False

repetición que debe tener una secuencia válida para sea considerada frecuente y por consiguiente un patrón temporal de interacción.

La selección del umbral  $\alpha$  al percentil 25 viene dada por tendencia exponencial que siguen el número de repeticiones de las secuencias válidas de interacción en un intervalo de tiempo concreto como se puede observar en la Figura 5.4.

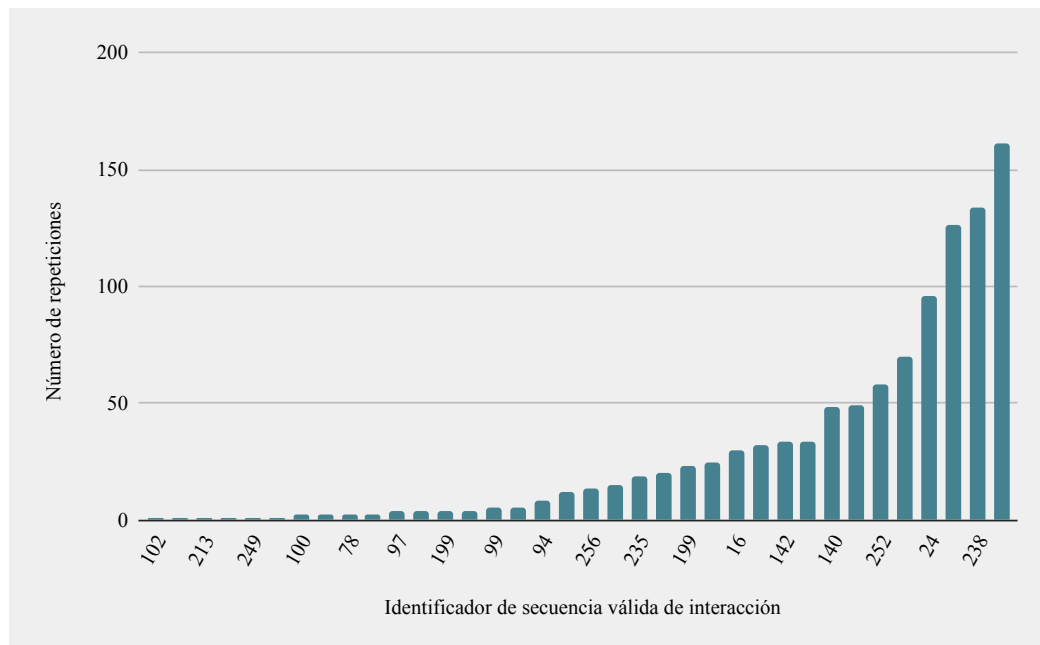


Figura 5.4: Número de repeticiones dadas de secuencias válidas de interacción en un período concreto de tiempo.

Una vez finalizada esta etapa, se obtienen las secuencias candidatas de adaptación frecuentes por operario y que incorporan la información del estado del proceso.

### 5.3.3.3 *Identificación y Agrupación de Secuencias Válidas Similares*

Aplicando el Algoritmo 3, en esta fase se ha analizado el conjunto de secuencias válidas frecuentes con el objetivo de agruparlas por similitud. Gracias a esta agrupación por similitud se consigue corregir posibles eventos duplicados o errores no intencionados por parte del operario en la secuencia de interacción a la hora de seleccionar un producto.

Estableciendo el umbral de similitud  $\beta$  a 0.85, en esta fase de la metodología se han agrupado las secuencias de interacción operario-máquina válidas obteniendo 916 grupos de secuencias similares. Cada uno de estos grupos de secuencias similares generan una regla de adaptación temporal en base a la secuencia de referencia tomada para calcular la similitud.

### 5.3.3.4 *Agrupamiento basado en densidad para determinar los intervalos temporales de adaptación*

Los intervalos temporales en los cuales la regla de adaptación ha de ser activada han sido detectados mediante la aplicación del algoritmo basado en densidad MeanShift.

La Figura 5.5 muestra la distribución en base a tiempo de las repeticiones dadas de dos secuencias válidas frecuentes de un operario concreto, en este caso u07. Como se puede observar, en función del valor de la variable 'Nivel' (Eje Y), se puede dar una secuencia de interacción u otra.

La Figura 5.6 muestra los grupos detectados mediante el algoritmo Meanshift y los valores *outliers* representados por un asterisco (\*). Para establecer los límites de cada uno de estos intervalos de tiempo, se seleccionan los valores más a la izquierda y más a la derecha de cada uno de los grupos. Se puede observar como los intervalos detectados por el algoritmo Meanshift para el usuario u07 son los siguientes:

- Cuando la variable Nivel 8 tiene el valor *true* se detectan dos intervalos temporales de adaptación:
  - [10:12:01-11:06:10]
  - [16:00:03-16:58:34]
- Cuando la variable Nivel 8 tiene el valor *false* se detectan seis intervalos temporales de adaptación:
  - [9:30:02-10:07:12]
  - [10:30:01-11:23:07]
  - [11:47:03-12:04:47]
  - [15:55:09-16:06:12]
  - [16:25:19-17:00:33]
  - [17:45:21-17:55:42]

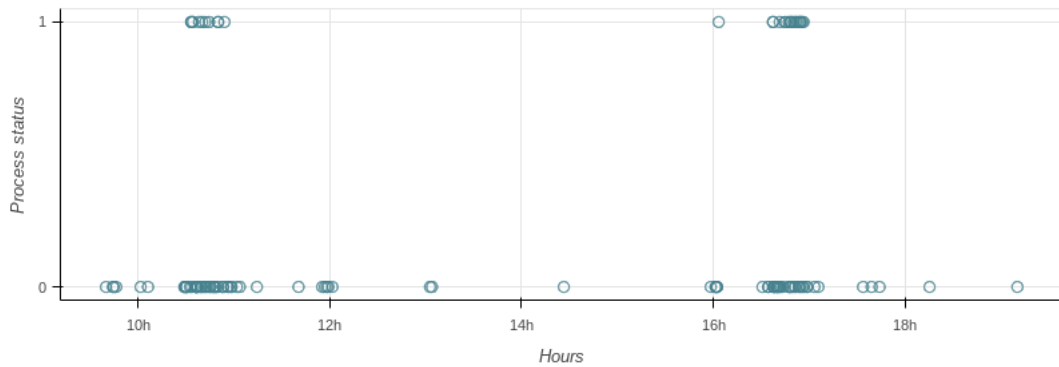


Figura 5.5: Distribución de las secuencias del usuario u07 en base a la variable Nivel 8.

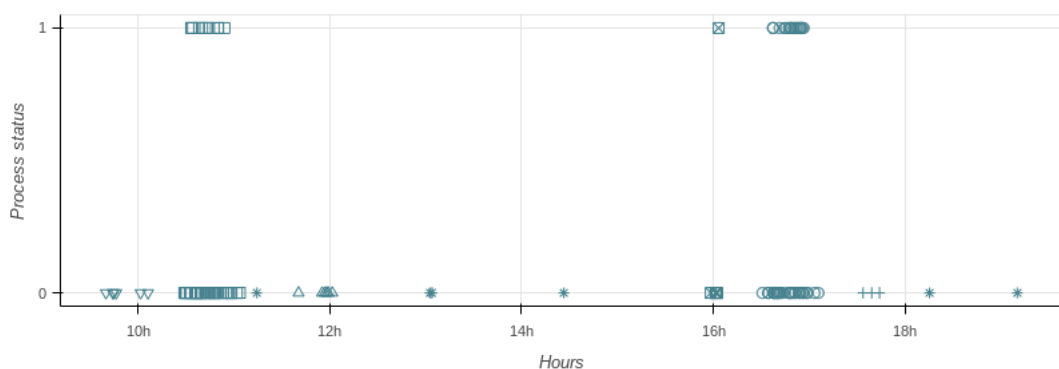


Figura 5.6: Grupos identificados por el algoritmo Meanshift para las secuencias del usuario u07 en base a la variable Nivel 8.

### 5.3.3.5 Generación de regla ECA de adaptación temporal en base al estado del proceso

Para concluir la validación, en este ultimo paso de la metodología se han generado las reglas de adaptación temporal por operario y estado del proceso descritas formalmente como reglas ECA.

La Figura 5.7 muestra que el estado del proceso puede condicionar la secuencia de interacción, en este caso la selección de producto, en un momento concreto de tiempo. Así mismo, se observa como para un instante concreto de tiempo (12:30:02) pueden haber dos reglas de adaptación para el usuario u16 dependiendo del estado del proceso (valor de la variable Nivel *true* o valor de la variable Nivel *false*).

En el ejemplo mostrado en la Figura 5.7, se puede comprobar cómo existen dos intervalos temporales solapados, el comprendido para la secuencia inferior #21 entre las 11:03:43 y las 13:47:32 y para la secuencia superior #133 comprendido entre las 12:02:21 y las 12:43:54. La secuencia #133 ocurre cuando la máquina no permite al operario configurar el nivel de azúcar y la secuencia #21 cuando sí le permite.

En este escenario, el Algoritmo 6, comprueba si en el momento concreto en el que el operario inicia la secuencia de interacción existen intervalos de tiempo solapados. Si existen intervalos temporales solapados, el algoritmo genera una

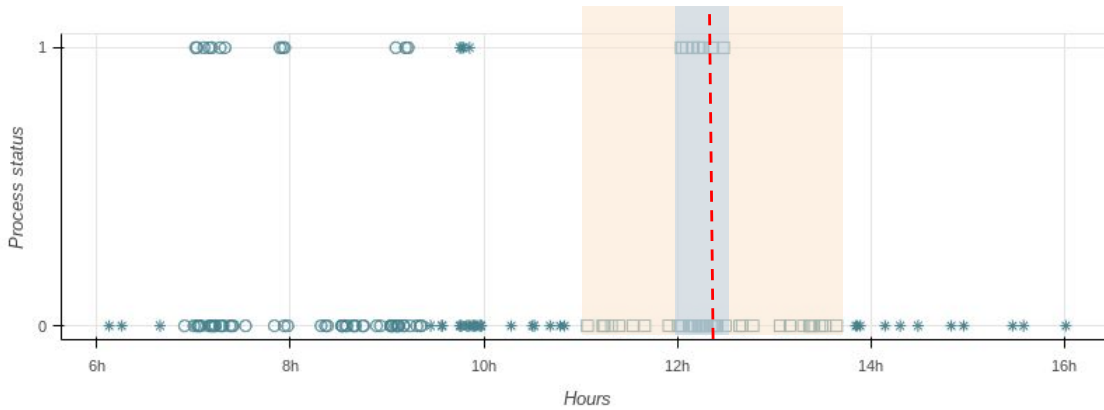


Figura 5.7: Intervalos temporales de adaptación de dos secuencias candidatas de un usuario (u16) en un momento concreto temporal en base al estado del proceso.

acción diferente para cada uno de los diferentes valores que pueden tener las variables que determinan el proceso, en este caso Producto y Nivel.

Un ejemplo de regla de adaptación temporal ECA generada por el Algoritmo 6 para el escenario mostrado en la Figura 5.7 es la siguiente:

- Event: *u16 is logged.*
- Condition: [12:30:02] is in:
  - ["11:03:43", "13:47:32"]
  - ["12:02:21", "12:43:54"]
- Actions:
  - if Nivel is 1: [Move element BTN5-Bebida-C to interface2]
  - if Nivel is 0: [Move element BTN5-Bebida-S to interface2]

Esta regla inferida determina en función del valor actual del proceso, en este caso determinado por Nivel, realizar dos adaptaciones: i) Move element BTN5-Bebida-C to interface2 en caso que Nivel esté *True* y ii) Move element BTN5-Bebida-S to interface2 en el caso que Nivel esté en *False*.

Una vez validadas estas reglas e implementadas en el HMI se consigue reducir el tiempo de interacción y el número de eventos necesarios para realizar la secuencia de interacción, mejorando la usabilidad del HMI y por consiguiente el rendimiento del operario.

## 5.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Como se puede observar en la Tabla 5.3, para la validación de la metodología propuesta se ha partido de un conjunto de datos de interacción con un total de 15.198 interacciones únicas.



Estas interacciones únicas han generado un total de 1380 secuencias válidas utilizadas para entrenar el modelo en la fase 1, fase de entrenamiento del modelo. Estableciendo el umbral de repetición  $\alpha$  al percentil 25 y el umbral de similitud  $\beta$  A 0.85, se han generado 1097 grupos de secuencias similares.

Tabla 5.3: Resultados obtenidos en la fase 1 del experimento (Entrenamiento del modelo por usuario y estado del proceso).

Descripción	Valor
Interacciones de operario	15198 clicks
Umbral de repetición $\alpha$	Percentil 25
Secuencias válidas	1380
Umbral de similitud $\beta$	0.85
Total de grupos de secuencias similares	1097
VARIABLES DE PROCESO ANALIZADAS	2
Media del n° eventos por secuencia	11.72 clicks
Duración media de la secuencia	23.84 segundos
Precisión del modelo	87.91 %

Para la validación del modelo inferido se puede observar en la Tabla 5.4, cómo se han utilizado 4176 interacciones únicas derivando en 372 secuencias candidatas mediante el establecimiento del valor umbral de repetición  $\alpha$  al percentil 25. Agrupando en base al grado de similitud de las secuencias candidatas, establecido por el parámetro  $\beta$  a 0.85, se han generado 295 grupos de secuencias similares.

Tabla 5.4: Resultados obtenidos en la fase 2 del experimento (Validación del modelo por usuario y estado del proceso).

Descripción	Valor
Interacciones de operario	4176 clicks
Umbral de repetición $\alpha$	Percentil 25
N° secuencias candidatas	372 secuencias
Umbral de similitud $\beta$	0.85
Total de grupos de secuencias similares	295
VARIABLES DE PROCESO ANALIZADAS	2
Media del n° eventos por secuencia	6.84 clicks
Duración media de la secuencia	9.48 segundos
Precisión del modelo	73.18 %

La validez de la metodología propuesta se ha llevado a cabo a través de las mismas métricas definidas en la sección 3.4. Estas métricas permiten cuantificar

la optimización obtenida en el proceso de interacción operario-máquina. Las métricas utilizadas han sido las siguientes:

- $M_1$ : Número de eventos de la secuencia de interacción.
- $M_2$ : Duración en segundos de la secuencia de interacción.
- $M_3$ : Validación por parte del operario de la adaptación temporal propuesta.

#### 5.4.1 Número de eventos de la secuencia de interacción

Como se puede observar en las Tablas 5.3 y 5.4, una vez la regla de adaptación temporal ECA es activada e implementada en el diseño del HMI, el número de eventos necesarios para realizar la secuencia de interacción identificada como patrón, en este caso seleccionar un producto concreto con diferentes ajustes, se reduce un 58,36 % pasando de una media de 11.72 eventos a 6.84 eventos.

Este decremento de 4.88 eventos en la secuencia de interacción, ocurre puesto que al mostrarle al operario en la primera interfaz los elementos informativos, no es necesaria la navegación e interacción para realizar sus ajustes. Se debe mencionar a su vez, que una reducción en el número de eventos lleva consigo una menor posibilidad de cometer errores no intencionados a la hora de acometer la secuencia.

#### 5.4.2 Duración en segundos de la secuencia de interacción

Los resultados obtenidos en esta métrica, muestran una reducción de un 39,77 % en el tiempo necesario para realizar la secuencia de interacción.

Como podemos observar en la tabla 5.3, el tiempo necesario para realizar una secuencia de interacción es de 23,84 segundos cuando las reglas de adaptación no están activadas. Sin embargo, una vez las reglas de adaptación son activadas e implementadas en el HMI, el tiempo en segundos necesario es de 9,48 segundos.

El decremento del tiempo ocurre debido a que al igual que en la anterior métrica al disponer el operario de los elementos informativos en la primera interfaz, no es necesaria ninguna acción de navegación o interacción adicional para realizar los ajustes en su producto.

Se debe añadir, que un decremento en el tiempo de interacción conlleva una mejora en el rendimiento del operario puesto que necesita menos tiempo para realizar las acciones que son catalogadas como frecuentes por la metodología.

#### 5.4.3 Validación por parte del operario de la regla de adaptación

Esta última métrica propuesta para comprobar la validez del modelo inferido, muestra una precisión del 87,91 % en la fase de entrenamiento y del 73,18 % en la fase de testeo como se puede comprobar en la Tablas 5.3 y 5.4.

Para obtener ambos valores, cada vez que una adaptación ha sido propuesta e implementada en la interfaz a los operarios éstos han debido validarla pulsando un botón de confirmación si ésta era satisfactoria. En caso contrario los operarios han pulsado el botón 'Volver' y realizado de nuevo la secuencia de interacción deseada.

Estos valores determinan que los modelos obtenidos para los diferentes operarios teniendo en cuenta el estado del proceso pueden ser clasificados como válidos.

## 5.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Este capítulo presenta el diseño y validación de una metodología guiada por datos capaz de inferir una serie de reglas de adaptación en base a tiempo y operario que analiza el estado del proceso para inferir las reglas de adaptación ECA.

A diferencia de las metodologías planteadas en los capítulos 4 y 3, esta metodología analiza la información de las variables que describen el estado del proceso a la hora de darse la secuencia de interacción. Mediante el uso de esta información, la metodología sugiere una serie de cambios en el diseño del HMI en base a la información del estado del proceso. De esta manera, en escenarios donde el estado del proceso condiciona la interacción operario-máquina, la metodología es capaz de inferir una serie de reglas que mejoran el proceso de interacción operario-máquina.

La contribución principal de este capítulo es una metodología guiada por datos que permite inferir un conjunto de reglas de adaptación temporal en escenarios industriales donde las variables del proceso influyen en las acciones que realiza el operario en las tareas de supervisión y control. Partiendo de un conjunto de datos de interacción operario-máquina y analizando el estado del proceso, la metodología genera una serie de reglas de adaptación temporal reduciendo un 58,36 % en el número de interacciones necesarias y una reducción del 39.77 % en el tiempo de interacción.



# Capítulo 6

---

## **CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

---

Este capítulo presenta una visión general de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación. A su vez se plantean las líneas futuras con el objetivo de seguir desarrollando el área de las interfaces adaptativas de usuario en escenarios industriales.

Primeramente, la sección 6.1 resume las conclusiones principales de la investigación realizada así como sus limitaciones. A continuación, la sección 6.2 presenta las contribuciones obtenidas en la tesis. Para finalizar, en la sección 6.3 se describen las áreas de investigación futuras.

## 6.1 CONCLUSIONES DE LA TESIS

El trabajo realizado en esta tesis plantea tres de metodologías guiadas por datos que tienen como objetivo principal mejorar los procesos de interacción operario-máquina en escenarios industriales. Esta mejora se realiza a través de la inferencia de un conjunto de reglas de adaptación temporal sobre el diseño del HMI descritas formalmente como reglas ECA.

A través de la aplicación de estas reglas sobre el diseño del HMI industrial se ha podido comprobar las mejoras en el proceso de interacción operario-máquina a la hora de realizar tareas de supervisión y control de procesos industriales. Se ha podido comprobar cómo cuando se activan y se aplican estas reglas el número de eventos necesarios para realizar la secuencia de interacción decrementa en torno al 60 %. A su vez, el tiempo en segundos necesario para realizar la tarea por parte del operario se ve reducido en un 40 %, implicando una mejora en su rendimiento laboral. Por otra parte, se ha validado de manera cualitativa la validez de cada uno de los modelos generados, mostrando una aceptación por encima del 70 % en todos ellos por parte de los operarios que formaron parte de los experimentos.

Como parte del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis, se ha realizado una revisión exhaustiva de los diferentes trabajos y proyectos de investigación en el área de las interfaces adaptativas de usuario quedando recogidos en el capítulo 2. Así mismo, se analizan las diferentes técnicas de adaptación así como las limitaciones de cada una de ellas a la hora de implementarlas en el escenario industrial en el cual se engloba este trabajo. El análisis realizado muestra cómo la aplicación de la inteligencia artificial a los procesos industriales, y más concretamente al proceso de adaptación de los HMI industriales, es un tema de investigación emergente el cual ha influenciado directamente los campos de investigación tratados en este trabajo. El trabajo realizado en este capítulo ha quedado recogido en la siguiente contribución científica [133].

Esta tesis se ha centrado en escenarios industriales donde diferentes operarios interaccionan con un proceso industrial a través de un HMI para realizar tareas de monitorización y control del proceso. Estas tareas si se llevan a cabo de manera repetitiva en un intervalo de tiempo, pueden ser clasificadas como patrones de interacción y por consiguiente ser candidatas a generar una adaptación.

Esta adaptación del HMI consigue disminuir el número de eventos que realiza el operario. En el capítulo 4, partiendo de dos entradas de información como son por un lado i) los datos de interacción operario-máquina y por ii) los datos de interacción operario-máquina y la descripción formal del HMI industrial, se ha diseñado una metodología que infiere un conjunto de reglas de adaptación en base al tiempo y al operario. Mediante el diseño del Algoritmo 1, se construye la secuencia completa de interacción para posteriormente analizarla e inferir la regla de adaptación. Esta metodología estableciendo un umbral de repetición, como se describe en la sección 3.2.3.2, permite filtrar que secuencias de interacción son las más frecuentes estableciendo así los patrones de interacción. Estos patrones repetitivos, determinan qué tareas desempeña el operario de manera frecuente y por consiguiente poder ser en cierta medida automatizadas. A través del análisis

de dichos patrones mediante el Algoritmo 5 diseñado, se pueden inferir las reglas de adaptación. Como se ha podido comprobar en la fase de validación de dicha metodología (sección 4.3), estas reglas respetan los criterios de usabilidad e integridad de la interfaz, determinando los intervalos temporales concretos en los que debe ser activada. Los resultados obtenidos en este capítulo han derivado en dos publicaciones científicas [18, 134].

Sin embargo, existen escenarios donde no es posible determinar qué operario concreto está realizando la secuencia de interacción, por lo que la adaptación debería ser propuesta en base a tiempo y por máquina. En el capítulo 3, se ha presentado el diseño una metodología capaz de inferir reglas de adaptación temporal que son mostradas a todos los operarios en un mismo intervalo de tiempo. No obstante, en intervalos temporales donde existen una gran variedad de operarios que realizan diferentes secuencias sin identificarse con el HMI, aplicar todas las reglas de adaptación inferidas puede derivar en una sobrecarga de información y por consiguiente la usabilidad puede quedar comprometida [135]. Para mitigar este problema, la metodología propuesta en este capítulo, mediante el análisis y filtrado por densidades, a través del Algoritmo 4, determina qué reglas de adaptación del conjunto total de reglas inferidas son las más representativas siendo éstas seleccionadas para generar la regla de adaptación. De esta forma, solo son seleccionadas las reglas más representativas en un intervalo concreto de tiempo para así solventar el problema de la sobrecarga de información del HMI. Una vez inferidas y activadas las reglas de adaptación en el HMI industrial se consigue reducir el tiempo de interacción y el número de eventos de una secuencia. Los resultados obtenidos en este capítulo, han quedado recogidos en una publicación científica [136].

Como se ha analizado en el capítulo 5, existen escenarios donde el estado del proceso puede condicionar las acciones de monitorización y control que realizan los operarios. Esta información se ha de considerar en el momento de inferir la regla de adaptación para determinar que acciones se han de realizar en el diseño del HMI en base a los diferentes estados. Una vez identificados los patrones de interacción temporal operario-máquina, mediante la aplicación del Algoritmo 6, definido en la sección 5.2.5, se determinan que acciones deben ser realizadas en la regla ECA. Esta información se añade como una condición más dentro de la regla ECA. Como se puede comprobar en los resultados obtenidos (sección 5.4), mediante la aplicación de esta metodología se consigue mejorar el proceso de interacción operario-máquina obteniendo una reducción en el tiempo necesario para realizar la secuencia así como el número de pasos de la misma.

Las diferentes áreas de investigación tratadas en esta tesis, sugieren un nuevo paradigma dentro de los procesos de fabricación industrial, donde la aplicación de técnicas de inteligencia artificial al estudio del comportamiento del operario permite mejorar su desempeño mediante sistemas adaptativos en este caso a través del HMI. Esto brinda la oportunidad de seguir desarrollando este campo, ya que la investigación realizada en este ámbito muestra muchas posibilidades aún por explorar.

## 6.2 CONTRIBUCIONES

Las contribuciones principales de este trabajo de investigación son las siguientes:

- Este trabajo provee un revisión exhaustiva de los trabajos de investigación realizados en el ámbito de las interfaces adaptativas de usuario (Capítulo 2).
- Las características y limitaciones detectadas en los conjuntos de datos de interacción existentes dentro de la literatura científica [137–140] han derivado en la necesidad de disponer de un nuevo conjunto de datos de interacción operario-máquina con el objetivo de validar las metodologías diseñadas en los capítulos 3, 4 y 5. Por medio del demostrador implementado, sección 3.3.1, se ha generado un conjunto de datos de interacción que contiene las interacciones realizadas por 34 operarios, el cual puede ser utilizado en otros ámbitos científicos del HCI.
- Se ha diseñado un lenguaje ligero de descripción de interfaces para poder describir formalmente los elementos de una interfaz. El uso de este lenguaje a la hora de describir las diferentes interfaces permite no depender de las limitaciones y características del fabricante del HMI.
- Se han diseñado y validado en base a tres métricas una serie de metodologías guiadas por datos que permiten generar un conjunto de reglas de adaptación temporal en escenarios industriales consiguiendo:
  1. Una adaptación por máquina en base a tiempo cuando no es posible identificar al operario (Capítulo 3) reduciendo en un 58.97 % el tiempo de interacción y en un 41.73 % el número de eventos por secuencia.
  2. Una personalización por operario en base a tiempo (Capítulo 4) consiguiendo una reducción del 44.20 % en el número de eventos por secuencia y de un 24.6 % en el tiempo de interacción.
  3. Una personalización en base a tiempo por operario cuando el estado proceso influye en la interacción (Capítulo 5) consiguiendo un 58,36 % en el número de eventos por secuencia y una reducción del 39.77 % en el tiempo de duración de la secuencia.
- Junto con las metodologías planteadas en esta tesis, se han diseñado una serie de algoritmos que permiten:
  1. Construir un grupo de secuencias válidas a partir de un conjunto de datos de interacción (Algoritmo 1).
  2. Filtrar secuencias en base a su frecuencia determinando los patrones de interacción operario-máquina (Algoritmo 2).
  3. Agrupar las secuencias por su grado de similitud para detectar posibles errores de interacción no intencionados (Algoritmo 3).
  4. Solucionar el problema de la sobrecarga de información mediante la selección de intervalos representativos (Algoritmo 4).
  5. Generar las acciones de adaptación a través de la minería de secuencias (Algoritmo 5).



6. Generar las acciones de adaptación en la regla ECA cuando el estado del proceso condiciona la interacción (Algoritmo 6).

### 6.3 LÍNEAS FUTURAS

A continuación se describen algunas líneas de investigación que han quedado fuera del alcance de este trabajo.

En esta sección se presentan algunos de esos temas y describimos cómo se puede continuar el trabajo realizado durante la tesis:

- La selección de las secuencias frecuentes realizadas a través del uso del Algoritmo 2 viene dada por el umbral de repetición  $\alpha$ . Este umbral se ha establecido de manera arbitraria por la tendencia exponencial que sigue el número de repeticiones. Sin embargo, puede darse el caso que estableciendo el valor de esta manera descarte secuencias las cuales estén cercanas al umbral, y por lo cual no sean clasificadas para adaptación. Por ello, es necesario profundizar en el criterio de selección de este valor umbral de manera que se consiga no descartar secuencias cuyo ratio de repetición esté cerca del umbral.
- Para el agrupamiento por similitud de las secuencias de interacción, esta trabajo utiliza la métrica definida por la similitud del coseno. Sin embargo para poder enriquecer ésta parte de la metodología, se debería llevar a cabo un análisis más exhaustivo de diferentes métricas de similitud como la distancia Levenshtein normalizada [141]. De esta manera, se podría obtener secuencias similares determinadas de manera más precisa.
- El problema de la coherencia e integridad de la interfaz a la hora de activar las reglas de adaptación en esta trabajo ha sido solventado mediante el agrupamiento por densidad. Como se ha explicado en la sección 4.3.3.4, en la sección 3.3.6.4 y en la sección 5.3.3.4, se ha hecho uso del algoritmo MeanShift para detectar los intervalos temporales. Sin embargo otro tipo de algoritmos basados en densidad que han sido descartados *a priori* como OPTICS o DBSCAN deberían ser analizados para conseguir intervalos de tiempo más precisos profundizando a su vez nuevas técnicas de selección de parámetros [142].
- El análisis del impacto que tienen las adaptaciones sobre el operario han quedado fuera del alcance de esta tesis. Sin embargo, esta información puede ser de gran valor a la hora de priorizar las reglas de adaptación. Mediante la aplicación del aprendizaje por refuerzo se podrían incorporar a la metodología el impacto positivo o negativo que tienen las adaptaciones sobre el operario [143], consiguiendo un mayor grado de personalización y por consiguiente mejorando la usabilidad y experiencia de usuario.
- Por último para contrastar el grado de aceptación tecnológica por parte de los operarios de las diferentes adaptaciones realizadas en la interfaz se deberían analizar el grado de aceptación tecnológica (TAM - 'Task Acceptance Model') [144].



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1	Proceso de Diseño Centrado en Usuario (UCD) [24]. . . . .	5
Figura 2.1	Arquitectura simple de un sistema de monitorización y control industrial . . . . .	16
Figura 2.2	Evolución tecnológica de los HMIs desde 1960 hasta la actualidad [58]. . . . .	18
Figura 3.1	Metodología guiada por datos propuesta para la generación de reglas de adaptación temporal por máquina. . . . .	29
Figura 3.2	Ejemplo de intervalos de adaptación que se solapan para un momento concreto del turno de trabajo. . . . .	36
Figura 3.3	Interfaz principal de la máquina de café utilizada en el experimento. . . . .	39
Figura 3.4	Diagrama FSM que representa el proceso de interacción operario-máquina en la máquina de café. . . . .	40
Figura 3.5	Ejemplo de secuencia de acciones realizadas por un operario siguiendo la arquitectura de información diseñada. . . . .	41
Figura 3.6	Ejemplo de secuencia de acciones realizadas por un operario sin seguir la arquitectura de información diseñada. . . . .	42
Figura 3.7	Interfaz nº4 de selección de recipiente. . . . .	43
Figura 3.8	Arquitectura del sistema de captura no intrusiva de la interacción de operario . . . . .	44
Figura 3.9	Número de repeticiones de las secuencias válidas de la máquina de café. . . . .	46
Figura 3.10	Número de repeticiones de los grupos de secuencias identificadas como similares. . . . .	47
Figura 3.11	Distribución de un conjunto de secuencias similares de interacción a lo largo del tiempo. . . . .	48
Figura 3.12	Grupos identificados por el algoritmo MeanShift para un conjunto de secuencias similares. . . . .	48
Figura 3.13	Intervalos del día donde más se interactúa con la máquina de café. . . . .	49
Figura 3.14	Secuencias candidatas de adaptación solapadas en un momento concreto del día. . . . .	50
Figura 4.1	Metodología guiada por datos propuesta para la generación de reglas de adaptación temporal por operario . . . . .	57
Figura 4.2	Ejemplo de secuencia de acciones realizadas por un operario sin seguir la arquitectura de navegación diseñada. . . . .	63
Figura 4.3	Distribución usuarios que más interactúan con la máquina. . . . .	65
Figura 4.4	Número de repeticiones de las secuencias válidas del operario u09. . . . .	65
Figura 4.5	Grado de similitud de las secuencias de un operario concreto medido por la similitud del coseno. . . . .	66

Figura 4.6	Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto sin agrupar por similitud. . . . .	66
Figura 4.7	Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto agrupándolas por similitud a una secuencia de referencia. . . . .	67
Figura 4.8	Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto agrupándolas por similitud a una secuencia de referencia. . . . .	68
Figura 4.9	Número de repeticiones de las secuencias de un operario concreto agrupándolas por similitud a una secuencia de referencia. . . . .	68
Figura 4.10	Horas del día donde se interactúa más con el HMI. . . . .	68
Figura 5.1	Secuencias de interacción solapadas en un momento concreto de tiempo. . . . .	74
Figura 5.2	Metodología guiada por datos propuesta para la generación de reglas de adaptación temporal por máquina. . . . .	76
Figura 5.3	Interfaz de selección de producto condicionada por el estado del proceso. . . . .	83
Figura 5.4	Número de repeticiones dadas de secuencias válidas de interacción en un período concreto de tiempo. . . . .	85
Figura 5.5	Distribución de las secuencias del usuario u07 en base a la variable Nivel 8. . . . .	87
Figura 5.6	Grupos identificados por el algoritmo Meanshift para las secuencias del usuario u07 en base a la variable Nivel 8. . . . .	87
Figura 5.7	Intervalos temporales de adaptación de dos secuencias candidatas de un usuario (u16) en un momento concreto temporal en base al estado del proceso. . . . .	88

---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3.1	Descripción de los diferentes elementos que componen cada pantalla del HMI . . . . .	30
Tabla 3.2	Especificación del conjunto de datos de interacción operario-máquina sin procesar. . . . .	31
Tabla 3.3	Ejemplo de captura de interacción de operario sin procesar recogida por el sistema. . . . .	45
Tabla 3.4	Ejemplo de secuencia válida de interacción operario-máquina para la obtención de un café. . . . .	46
Tabla 3.5	Resultados obtenidos en la fase 1 del experimento (Entrenamiento del modelo por máquina). . . . .	51
Tabla 3.6	Resultados obtenidos en la fase 2 del experimento (Validación del modelo por máquina). . . . .	51
Tabla 4.1	Ejemplo de secuencia válida de interacción operario-máquina.	64
Tabla 4.2	Resultados obtenidos en la fase 1 del experimento estableciendo $\alpha =$ Percentil 25 (Entrenamiento del modelo). . . . .	70
Tabla 4.3	Resultados obtenidos en la fase 2 del experimento (Validación del modelo). . . . .	70
Tabla 5.1	Variables de proceso analizadas en el experimento. . . . .	82
Tabla 5.2	Ejemplo de secuencia válida de interacción operario-máquina para la obtención de un producto con las variables de proceso asociadas. . . . .	85
Tabla 5.3	Resultados obtenidos en la fase 1 del experimento (Entrenamiento del modelo por usuario y estado del proceso). . . . .	89
Tabla 5.4	Resultados obtenidos en la fase 2 del experimento (Validación del modelo por usuario y estado del proceso). . . . .	89



---

## ÍNDICE DE ALGORITMOS

---

Figura 1	Extracción de secuencias válidas de interacción operario-máquina. . . . .	33
Figura 2	Filtrado de secuencias candidatas basadas en su ratio de repetición. . . . .	33
Figura 3	Agrupación de secuencias candidatas basadas en su grado de similitud. . . . .	35
Figura 4	Priorización de secuencias candidatas basada en la densidad.	37
Figura 5	Generador de acciones de adaptación. . . . .	38
Figura 6	Generador de acciones de adaptación en base al estado del proceso industrial. . . . .	81





---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] J. Schlick, "Cyber-physical systems in factory automation-towards the 4th industrial revolution," in *2012 9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. IEEE, 2012, pp. 55–55.
- [2] M. Dotoli, A. Fay, M. Miśkiewicz, and C. Seatzu, "An overview of current technologies and emerging trends in factory automation," *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 15-16, pp. 5047–5067, 2019.
- [3] I. International Federation of Robotics, "Top trends robotics 2020," <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-trends-robotics-2020>, accedido: 30-03-2021.
- [4] D. Deloitte, "Automation with intelligence pursuing organisation-wide reimagination," [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/73699-global-intelligent-automation-survey/DI\\_Automation-with-intelligence.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/73699-global-intelligent-automation-survey/DI_Automation-with-intelligence.pdf), accedido: 10-02-2021.
- [5] E. The European Parliament, "Regulation of the european parliament and of the council establishing the recovery and resilience facility," <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-75-2020-INIT/en/pdf>, accedido: 11-02-2021.
- [6] M. Arntz, T. Gregory, and U. Zierahn, "The risk of automation for jobs in oecd countries," no. 189, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1787/5jlz9h56dvq7-en>.
- [7] P. Price Waterhouse Coopers, "Will robots really steal our jobs? an international analysis of the potential long term impact of automation," <https://www.pwc.es/es/publicaciones/tecnologia/assets/international-impact-of-automation-2018.pdf>, accedido: 11-02-2021.
- [8] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, and B. Yin, "Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 6505–6519, 2017.
- [9] J. Wan, X. Li, H.-N. Dai, A. Kusiak, M. Martínez-García, and D. Li, "Artificial-intelligence-driven customized manufacturing factory: Key technologies, applications, and challenges," *Proceedings of the IEEE*, 2020.
- [10] D. Gorecky, M. Schmitt, M. Loskyll, and D. Zühlke, "Human-machine-interaction in the industry 4.0 era," in *2014 12th IEEE international conference on industrial informatics (INDIN)*. Ieee, 2014, pp. 289–294.
- [11] E. Aranburu, G. Lasa, and J. Kepa Gerrikagoitia, "Evaluating the human machine interface experience in industrial workplaces," in *Proceedings of the*

- 32nd International BCS Human Computer Interaction Conference 32*, 2018, pp. 1–5.
- [12] A. Salihbegovic, V. Marinković, Z. Cico, E. Karavdić, and N. Delic, “Web based multilayered distributed scada/hmi system in refinery application,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 31, no. 3, pp. 599–612, 2009.
- [13] S. Cavalieri, M. G. Salafia, and M. S. Scropo, “Integrating opc ua with web technologies to enhance interoperability,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 61, pp. 45–64, 2019.
- [14] V. Villani, L. Sabattini, F. Loch, B. Vogel-Heuser, and C. Fantuzzi, “A general methodology for adapting industrial hmis to human operators,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019.
- [15] R. Drath and A. Horch, “Industrie 4.0: Hit or hype?[industry forum],” *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 56–58, 2014.
- [16] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, “Industry 4.0,” *Business & information systems engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014.
- [17] P. Leitão, A. W. Colombo, and S. Karnouskos, “Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges,” *Computers in industry*, vol. 81, pp. 11–25, 2016.
- [18] D. Reguera-Bakhache, I. Garitano, R. Uribeetxeberria, and C. Cernuda, “An industrial hmi temporal adaptation based on operator-machine interaction sequence similarity,” in *2021 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, 2021.
- [19] Y. Lu, “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues,” *Journal of industrial information integration*, vol. 6, pp. 1–10, 2017.
- [20] A. Siemens AG, “Simatic hmi - operator control and monitoring systems,” <https://siemens.com/hmi>, accedido: 11-02-2021.
- [21] W. RockWell Automation, “Modern hmi software,” [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/ftalk-br012\\_en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/ftalk-br012_en-p.pdf), accedido: 11-02-2021.
- [22] C. Abras, D. Maloney-Krichmar, J. Preece *et al.*, “User-centered design,” *Bainbridge, W. Encyclopedia of Human-Computer Interaction*. Thousand Oaks: Sage Publications, vol. 37, no. 4, pp. 445–456, 2004.
- [23] “Iso 9241-210: 2019-ergonomics of human-system interaction-part 210: Human-centred design for interactive systems,” International Organization for Standardization, Geneva, CH, Standard, Mar. 2019.
- [24] Y. Hassan-Montero and S. Ortega-Santamaría, *Informe APEI sobre usabilidad*. APEI, Asociación Profesional de Especialistas en Información, 2009, vol. 3.

- [25] L. McNabb and R. S. Laramée, "Survey of surveys (sos)-mapping the landscape of survey papers in information visualization," in *Computer Graphics Forum*, vol. 36, no. 3. Wiley Online Library, 2017, pp. 589–617.
- [26] C. T. Landi, V. Villani, F. Ferraguti, L. Sabattini, C. Secchi, and C. Fantuzzi, "Relieving operators' workload: Towards affective robotics in industrial scenarios," *Mechatronics*, vol. 54, pp. 144–154, 2018.
- [27] D. Cavallo, S. Digiesi, F. Fachini, and G. Mummolo, "An analytical framework for assessing cognitive capacity and processing speed of operators in industry 4.0," *Procedia Computer Science*, vol. 180, pp. 318–327, 2021.
- [28] M. Maybury, "Intelligent user interfaces: an introduction," in *Proceedings of the 4th international conference on Intelligent user interfaces*, 1998, pp. 3–4.
- [29] L. Findlater and K. Z. Gajos, "Design space and evaluation challenges of adaptive graphical user interfaces," *AI Magazine*, vol. 30, no. 4, pp. 68–68, 2009.
- [30] R. Baheti and H. Gill, "Cyber-physical systems," *The impact of control technology*, vol. 12, no. 1, pp. 161–166, 2011.
- [31] T. Bangemann, S. Karnouskos, R. Camp, O. Carlsson, M. Riedl, S. McLeod, R. Harrison, A. W. Colombo, and P. Stluka, "State of the art in industrial automation," in *Industrial cloud-based cyber-physical systems*. Springer, 2014, pp. 23–47.
- [32] C. Stephanidis, C. Karagiannidis, and A. Koumpis, "Decision making in intelligent user interfaces," in *Proceedings of the 2nd international conference on Intelligent user interfaces*, 1997, pp. 195–202.
- [33] P. Langley, "Machine learning for adaptive user interfaces," in *Annual Conference on Artificial Intelligence*. Springer, 1997, pp. 53–62.
- [34] A. Jameson, "Adaptive interfaces and agents," *The human-computer interaction handbook: Fundamentals, evolving technologies and emerging applications*, pp. 305–330, 2008.
- [35] J. Nielsen, *Usability engineering*. Morgan Kaufmann, 1994.
- [36] M. Hassenzahl and N. Tractinsky, "User experience-a research agenda," *Behaviour & information technology*, vol. 25, no. 2, pp. 91–97, 2006.
- [37] A. Perer and F. Wang, "Frequency: Interactive mining and visualization of temporal frequent event sequences," in *Proceedings of the 19th international conference on Intelligent User Interfaces*, 2014, pp. 153–162.
- [38] A. Aztiria, J. C. Augusto, R. Basagoiti, A. Izaguirre, and D. J. Cook, "Discovering frequent user–environment interactions in intelligent environments," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 91–103, 2012.
- [39] M. Hentea, "Improving security for scada control systems," *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*, vol. 3, no. 1, pp. 73–86, 2008.

- [40] B. C. Brusso, "50 years of industrial automation [history]," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 24, no. 4, pp. 8–11, 2018.
- [41] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics," in *International proceeding of int conference on industrial informatics (INDIN)*, 2014, pp. 1–6.
- [42] S. Karnouskos, A. W. Colombo, F. Jammes, J. Delsing, and T. Bangemann, "Towards an architecture for service-oriented process monitoring and control," in *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2010, pp. 1385–1391.
- [43] S. Karnouskos and A. W. Colombo, "Architecting the next generation of service-based scada/dcs system of systems," in *IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2011, pp. 359–364.
- [44] A. C. Valdeza, P. Braunera, A. K. Schaara, A. Holzingerb, and M. Zieflea, "Reducing complexity with simplicity-usability methods for industry 4.0," in *Proceedings 19th triennial congress of the IEA*, vol. 9, 2015, p. 14.
- [45] J. Lee, C. Jin, and B. Bagheri, "Cyber physical systems for predictive production systems," *Production Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 155–165, 2017.
- [46] R. S. Peres, A. D. Rocha, P. Leitao, and J. Barata, "Idarts—towards intelligent data analysis and real-time supervision for industry 4.0," *Computers in industry*, vol. 101, pp. 138–146, 2018.
- [47] M. Fernandes, A. Canito, V. Bolón-Canedo, L. Conceição, I. Praça, and G. Marreiros, "Data analysis and feature selection for predictive maintenance: A case-study in the metallurgic industry," *International journal of information management*, vol. 46, pp. 252–262, 2019.
- [48] O. Niggemann, G. Biswas, J. S. Kinnebrew, H. Khorasgani, S. Volgmann, and A. Bunte, "Data-driven monitoring of cyber-physical systems leveraging on big data and the internet-of-things for diagnosis and control." in *DX@Safeprocess*, 2015, pp. 185–192.
- [49] S. Yin, S. X. Ding, X. Xie, and H. Luo, "A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 11, pp. 6418–6428, 2014.
- [50] S. J. Qin, "Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis," *Annual reviews in control*, vol. 36, no. 2, pp. 220–234, 2012.
- [51] F. Nachreiner, P. Nickel, and I. Meyer, "Human factors in process control systems: The design of human–machine interfaces," *Safety Science*, vol. 44, no. 1, pp. 5–26, 2006.
- [52] J. Lee, H. D. Ardakani, S. Yang, and B. Bagheri, "Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation," *Procedia cirp*, vol. 38, pp. 3–7, 2015.

- [53] J. Lee, H. Davari, J. Singh, and V. Pandhare, "Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing letters*, vol. 18, pp. 20–23, 2018.
- [54] A. Endert, W. Ribarsky, C. Turkay, B. W. Wong, I. Nabney, I. D. Blanco, and F. Rossi, "The state of the art in integrating machine learning into visual analytics," in *Computer Graphics Forum*, vol. 36, no. 8. Wiley Online Library, 2017, pp. 458–486.
- [55] I. Diaz and J. Hollmen, "Residual generation and visualization for understanding novel process conditions," in *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02 (Cat. No. 02CH37290)*, vol. 3. IEEE, 2002, pp. 2070–2075.
- [56] D. Pérez, I. Díaz, A. A. Cuadrado, J. L. Rendueles, and D. García, "Interactive data visualization of chatter conditions in a cold rolling mill," *Computers in Industry*, vol. 103, pp. 86–96, 2018.
- [57] M. Peruzzini, F. Grandi, and M. Pellicciari, "Exploring the potential of operator 4.0 interface and monitoring," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 139, p. 105600, 2020.
- [58] P. Papcun, E. Kajáti, and J. Koziorek, "Human machine interface in concept of industry 4.0," in *2018 World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines (DISA)*. IEEE, 2018, pp. 289–296.
- [59] M. Nielsen, M. Störring, T. B. Moeslund, and E. Granum, "A procedure for developing intuitive and ergonomic gesture interfaces for hci," in *International gesture workshop*. Springer, 2003, pp. 409–420.
- [60] J. M. Carroll, "Human-computer interaction: psychology as a science of design," *Annual review of psychology*, vol. 48, no. 1, pp. 61–83, 1997.
- [61] J. P. Lahti, A. Shamsuzzoha, and T. Kankaanpää, "Web-based technologies in power plant automation and scada systems: A review and evaluation," in *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*. IEEE, 2011, pp. 279–284.
- [62] D. Norman, "User centered system design," *New perspectives on human-computer interaction*, 1986.
- [63] K. Vredenburg, J.-Y. Mao, P. W. Smith, and T. Carey, "A survey of user-centered design practice," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 2002, pp. 471–478.
- [64] D. Carr, "Guidelines for designing information visualization applications," in *ECUE'99: 01/12/1999-03/12/1999*, 1999.
- [65] R. Sinha and J. Boutelle, "Rapid information architecture prototyping," in *Proceedings of the 5th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques*, 2004, pp. 349–352.

- [66] C. L. Paul, "Analyzing card-sorting data using graph visualization." *Journal of usability studies*, vol. 9, no. 3, 2014.
- [67] E. Edmonds, "The future of intelligent interfaces: not just "how?", but "what?" and "why?," in *Proceedings of the 1st international conference on Intelligent user interfaces*, 1993, pp. 13–17.
- [68] M. Maybury and W. Wahlster, *Readings in intelligent user interfaces*. Morgan Kaufmann, 1998.
- [69] P. Ehlert, "Intelligent user interfaces: introduction and survey," *Delft University of Technology*, 2003.
- [70] T. Partala, V. Surakka, and T. Vanhala, "Real-time estimation of emotional experiences from facial expressions," *Interacting with computers*, vol. 18, no. 2, pp. 208–226, 2006.
- [71] V. W. Zue and J. R. Glass, "Conversational interfaces: Advances and challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 8, pp. 1166–1180, 2000.
- [72] T. Ohno, N. Mukawa, and A. Yoshikawa, "Freegaze: a gaze tracking system for everyday gaze interaction," in *Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications*, 2002, pp. 125–132.
- [73] I. D. Blanco, A. A. C. Vega, D. P. López, M. D. González, S. A. Castro, and M. Á. P. Medrano, "Energy analytics in public buildings using interactive histograms," *Energy and Buildings*, vol. 134, pp. 94–104, 2017.
- [74] E. Olshannikova, A. Ometov, Y. Koucheryavy, and T. Olsson, "Visualizing big data with augmented and virtual reality: challenges and research agenda," *Journal of Big Data*, vol. 2, no. 1, pp. 1–27, 2015.
- [75] F. Bruno, F. Caruso, L. De Napoli, and M. Muzzupappa, "Visualization of industrial engineering data visualization of industrial engineering data in augmented reality," *Journal of visualization*, vol. 9, no. 3, pp. 319–329, 2006.
- [76] S. S. Anand and B. Mobasher, "Intelligent techniques for web personalization," in *IJCAI Workshop on Intelligent Techniques for Web Personalization*. Springer, 2003, pp. 1–36.
- [77] K. Z. Gajos, D. S. Weld, and J. O. Wobbrock, "Automatically generating personalized user interfaces with supple," *Artificial Intelligence*, vol. 174, no. 12–13, pp. 910–950, 2010.
- [78] N. Mezhoudi, "User interface adaptation based on user feedback and machine learning," in *Proceedings of the companion publication of the 2013 international conference on Intelligent user interfaces companion*, 2013, pp. 25–28.
- [79] H. Soh, S. Sanner, M. White, and G. Jamieson, "Deep sequential recommendation for personalized adaptive user interfaces," in *Proceedings of the 22nd international conference on intelligent user interfaces*, 2017, pp. 589–593.

- [80] K. Nazemi, D. Burkhardt, A. Praetorius, M. Breyer, and A. Kuijper, "Adapting user interfaces by analyzing data characteristics for determining adequate visualizations," in *International Conference on Human Centered Design*. Springer, 2011, pp. 566–575.
- [81] D. Toker, C. Conati, G. Carenini, and M. Haraty, "Towards adaptive information visualization: on the influence of user characteristics," in *International conference on user modeling, adaptation, and personalization*. Springer, 2012, pp. 274–285.
- [82] B. Steichen, G. Carenini, and C. Conati, "User-adaptive information visualization: using eye gaze data to infer visualization tasks and user cognitive abilities," in *Proceedings of the 2013 international conference on Intelligent user interfaces*, 2013, pp. 317–328.
- [83] C. Conati, G. Carenini, D. Toker, and S. Lallé, "Towards user-adaptive information visualization," in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 29, no. 1, 2015.
- [84] C. Conati, S. Lallé, M. A. Rahman, and D. Toker, "Further results on predicting cognitive abilities for adaptive visualizations." in *IJCAI*, 2017, pp. 1568–1574.
- [85] J. Liu, C. K. Wong, and K. K. Hui, "An adaptive user interface based on personalized learning," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 52–57, 2003.
- [86] S. Tsang, R. Balakrishnan, K. Singh, and A. Ranjan, "A suggestive interface for image guided 3d sketching," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, 2004, pp. 591–598.
- [87] A. Bosco, A. Augusto, M. Dumas, M. La Rosa, and G. Fortino, "Discovering automatable routines from user interaction logs," in *International Conference on Business Process Management*. Springer, 2019, pp. 144–162.
- [88] N. Sebe, "Multimodal interfaces: Challenges and perspectives," *Journal of Ambient Intelligence and smart environments*, vol. 1, no. 1, pp. 23–30, 2009.
- [89] Z. Obrenovic, J. Abascal, and D. Starcevic, "Universal accessibility as a multimodal design issue," *Commun. ACM*, vol. 50, no. 5, p. 83–88, May 2007. DOI: 10.1145/1230819.1241668.
- [90] B. Gamecho, R. Minón, A. Aizpurua, I. Cearreta, M. Arrue, N. Garay-Vitoria, and J. Abascal, "Automatic generation of tailored accessible user interfaces for ubiquitous services," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 45, no. 5, pp. 612–623, 2015.
- [91] A. Aizpurua, R. Miñón, B. Gamecho, I. Cearreta, M. Arrue, and N. Garay-Vitoria, "Accessible ubiquitous services for supporting daily activities: A case study with young adults with intellectual disabilities," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 35, no. 17, pp. 1608–1629, 2019.

- [92] S. Katan, M. Grierson, and R. Fiebrink, "Using interactive machine learning to support interface development through workshops with disabled people," in *Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems*, 2015, pp. 251–254.
- [93] R. Miñón, F. Paternò, M. Arrue, and J. Abascal, "Integrating adaptation rules for people with special needs in model-based ui development process," *Universal Access in the Information Society*, vol. 15, no. 1, pp. 153–168, 2016.
- [94] G. Calvary, J. Coutaz, D. Thevenin, Q. Limbourg, L. Bouillon, and J. Vanderdonckt, "A unifying reference framework for multi-target user interfaces," *Interacting with computers*, vol. 15, no. 3, pp. 289–308, 2003.
- [95] X. Valencia, J. E. Pérez, M. Arrue, J. Abascal, C. Duarte, and L. Moreno, "Adapting the web for people with upper body motor impairments using touch screen tablets," *Interacting with Computers*, vol. 29, no. 6, pp. 794–812, 2017.
- [96] K. Höök, "Steps to take before intelligent user interfaces become real," *Interacting with computers*, vol. 12, no. 4, pp. 409–426, 2000.
- [97] L. Rothrock, R. Koubek, F. Fuchs, M. Haas, and G. Salvendy, "Review and reappraisal of adaptive interfaces: toward biologically inspired paradigms," *Theoretical issues in ergonomics science*, vol. 3, no. 1, pp. 47–84, 2002.
- [98] G. Calvary, J. Coutaz, and D. Thevenin, "A unifying reference framework for the development of plastic user interfaces," in *IFIP International Conference on Engineering for Human-Computer Interaction*. Springer, 2001, pp. 173–192.
- [99] M. Peissner, D. Häbe, D. Janssen, and T. Sellner, "Myui: generating accessible user interfaces from multimodal design patterns," in *Proceedings of the 4th ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems*, 2012, pp. 81–90.
- [100] M. González-García, L. Moreno, and P. Martínez, "Adaptation rules for accessible media player interface," in *Proceedings of the XV International Conference on Human Computer Interaction*, 2014, pp. 1–8.
- [101] F. Y. Motlagh and P. Göhner, "Adaptive human-machine-interface of automation systems," in *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*. Springer, 2014, pp. 175–182.
- [102] G. Reyes, "An adaptive and personalized in-vehicle human-machine-interface for an improved user experience," in *Proceedings of the 25th International Conference on Intelligent User Interfaces Companion*, 2020, pp. 35–36.
- [103] K. Gajos and D. S. Weld, "Supple: automatically generating user interfaces," in *Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces*, 2004, pp. 93–100.
- [104] V. Genaro Motti, "A computational framework for multi-dimensional context-aware adaptation," in *Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems*, 2011, pp. 315–318.



- [105] S. R. Garzon and M. Poguntke, "The personal adaptive in-car hmi: integration of external applications for personalized use," in *International Conference on User Modeling, Adaptation, and Personalization*. Springer, 2011, pp. 35–46.
- [106] C. Martin, C. Herdin, and J. Engel, "Model-based user-interface adaptation by exploiting situations, emotions and software patterns." in *CHIRA*, 2017, pp. 50–59.
- [107] G. Wang, X. Zhang, S. Tang, H. Zheng, and B. Y. Zhao, "Unsupervised clickstream clustering for user behavior analysis," in *Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems*, 2016, pp. 225–236.
- [108] D. Gotz and M. X. Zhou, "An empirical study of user interaction behavior during visual analysis," *Technical Report RC24525*, 2008.
- [109] L. Leiva, "Interaction-based user interface redesign," in *Proceedings of the 2012 ACM international conference on Intelligent User Interfaces*, 2012, pp. 311–312.
- [110] S. Bouzit, G. Calvary, D. Chêne, and J. Vanderdonckt, "Interface adaptivity by widget promotion/demotion," in *Proceedings of the ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, 2019, pp. 1–6.
- [111] F. Wallhoff, M. Ablaßmeier, A. Bannat, S. Buchta, A. Rauschert, G. Rigoll, and M. Wiesbeck, "Adaptive human-machine interfaces in cognitive production environments," in *2007 IEEE international conference on multimedia and expo*. IEEE, 2007, pp. 2246–2249.
- [112] O. Neira, A. N. Lee, J. L. M. Lastra, and R. S. Camp, "A builder for adaptable human machine interfaces for mobile devices," in *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE, 2013, pp. 750–755.
- [113] A. N. Lee and J. L. M. Lastra, "Enhancement of industrial monitoring systems by utilizing context awareness," in *2013 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*. IEEE, 2013, pp. 277–284.
- [114] K. Tervo and H. N. Koivo, "Adaptation of the human-machine interface to the human skill and dynamic characteristics," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 3539–3544, 2014.
- [115] D. Mourtzis and E. Vlachou, "A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance," *Journal of manufacturing systems*, vol. 47, pp. 179–198, 2018.
- [116] V. Villani, L. Sabattini, P. Barańska, E. Callegati, J. N. Czerniak, A. Debbache, M. Fahimipirehgalin, A. Gallasch, F. Loch, R. Maida *et al.*, "The inclusive system: A general framework for adaptive industrial automation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020.

- [117] L. Findlater and J. McGrenere, "Impact of screen size on performance, awareness, and user satisfaction with adaptive graphical user interfaces," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2008, pp. 1247–1256.
- [118] E. Yigitbas, A. Hottung, S. M. Rojas, A. Anjorin, S. Sauer, and G. Engels, "Context-and data-driven satisfaction analysis of user interface adaptations based on instant user feedback," *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol. 3, no. EICS, pp. 1–20, 2019.
- [119] L. Zhang, Q.-X. Qu, W.-Y. Chao, and V. G. Duffy, "Investigating the combination of adaptive uis and adaptable uis for improving usability and user performance of complex uis," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 36, no. 1, pp. 82–94, 2020.
- [120] S. Greenberg and I. H. Witten, "Adaptive personalized interfaces—a question of viability," *Behaviour & Information Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 31–45, 1985.
- [121] J. Nielsen, "Coordinating user interfaces for consistency," *ACM Sigchi Bulletin*, vol. 20, no. 3, pp. 63–65, 1989.
- [122] P. Gallina, N. Bellotto, and M. Di Luca, "Progressive co-adaptation in human-machine interaction," in *2015 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, vol. 2. IEEE, 2015, pp. 362–368.
- [123] J. L. Wesson, A. Singh, and B. Van Tonder, "Can adaptive interfaces improve the usability of mobile applications?" in *IFIP Human-Computer Interaction Symposium*. Springer, 2010, pp. 187–198.
- [124] B. Li and L. Han, "Distance weighted cosine similarity measure for text classification," in *International conference on intelligent data engineering and automated learning*. Springer, 2013, pp. 611–618.
- [125] L. McInnes, J. Healy, and S. Astels, "hdbscan: Hierarchical density based clustering," *Journal of Open Source Software*, vol. 2, no. 11, p. 205, 2017.
- [126] M. Ankerst, M. M. Breunig, H.-P. Kriegel, and J. Sander, "Optics: Ordering points to identify the clustering structure," *ACM Sigmod record*, vol. 28, no. 2, pp. 49–60, 1999.
- [127] D. Comaniciu and P. Meer, "Mean shift: A robust approach toward feature space analysis," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 24, no. 5, pp. 603–619, 2002.
- [128] K.-D. Thoben, S. Wiesner, and T. Wuest, "'industrie 4.0" and smart manufacturing—a review of research issues and application examples," *International journal of automation technology*, vol. 11, no. 1, pp. 4–16, 2017.
- [129] M. S. Magnusson, J. K. Burgoon, and M. Casarrubea, *Discovering hidden temporal patterns in behavior and interaction*. Springer, 2016.

- [130] A. K. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical systems and signal processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006.
- [131] S. Selcuk, "Predictive maintenance, its implementation and latest trends," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 231, no. 9, pp. 1670–1679, 2017.
- [132] F. Larrinaga, J. Fernandez-Anakabe, E. Zugasti, I. Garitano, U. Zurutuza, J. Olaizola, M. Anasagasti, and M. Mondragon, "A big data implementation of the mantis reference architecture for predictive maintenance," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 233, no. 10, pp. 1361–1375, 2019.
- [133] G. Marreiros, P. Craamer, D. Reguera-Bakhache, I. Garitano, R. Gonzalez, M. G. Novak, A. Kancilija, R. Uribeetxeberria, J. Valtonen, and A. Vidmar, "From kpi dashboards to advanced visualization," *The MANTIS Book: Cyber Physical System Based Proactive Collaborative Maintenance*, p. 239, 2019.
- [134] D. Reguera-Bakhache, I. Garitano, R. Uribeetxeberria, C. Cernuda, and U. Zurutuza, "Data-driven industrial human-machine interface temporal adaptation for process optimization," in *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, vol. 1. IEEE, 2020, pp. 518–525.
- [135] M. Chen, "Improving website structure through reducing information overload," *Decision Support Systems*, vol. 110, pp. 84–94, 2018.
- [136] D. Reguera-Bakhache, I. Garitano, R. Uribeetxeberria, C. Cernuda, U. Zurutuza, and G. Lasa, "An adaptive industrial human-machine interface to optimise operators working performance," in *2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. IEEE, 2021.
- [137] S. Greenberg, "Using unix: Collected traces of 168 users," 1988.
- [138] L. Tauscher and S. Greenberg, "How people revisit web pages: Empirical findings and implications for the design of history systems," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 47, no. 1, pp. 97–137, 1997.
- [139] E. Agichtein, E. Brill, S. Dumais, and R. Ragno, "Learning user interaction models for predicting web search result preferences," in *Proceedings of the 29th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, 2006, pp. 3–10.
- [140] B. Deka, Z. Huang, C. Franzen, J. Hibschan, D. Afegan, Y. Li, J. Nichols, and R. Kumar, "Rico: A mobile app dataset for building data-driven design applications," in *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2017, pp. 845–854.
- [141] L. Yujian and L. Bo, "A normalized levenshtein distance metric," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 29, no. 6, pp. 1091–1095, 2007.

- [142] A. Karami and R. Johansson, "Choosing dbscan parameters automatically using differential evolution," *International Journal of Computer Applications*, vol. 91, no. 7, pp. 1–11, 2014.
- [143] K. Todi, G. Bailly, L. Leiva, and A. Oulasvirta, "Adapting user interfaces with model-based reinforcement learning," in *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2021, pp. 1–13.
- [144] M. Ghazizadeh, J. D. Lee, and L. N. Boyle, "Extending the technology acceptance model to assess automation," *Cognition, Technology & Work*, vol. 14, no. 1, pp. 39–49, 2012.