



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

***DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA
DE EVALUACIÓN DE USABILIDAD DE
INTERFACES HUMANO-MÁQUINA
(IHM) PARA LA MEJORA DEL
PROCESO DE TOMA DE DECISIONES
EN TAREAS DE SUPERVISIÓN
INDUSTRIAL***

***DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY
FOR USABILITY EVALUATION OF
HUMAN MACHINE INTERFACE (HMI)
FOR IMPROVING THE DECISION
MAKING PROCESS IN INDUSTRIAL
SUPERVISION TASKS***

M. Sc. Luini Leonardo Hurtado Cortés

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Campus La Nubia
Manizales, Caldas, Colombia
Noviembre de 2013

***DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA
DE EVALUACIÓN DE USABILIDAD DE
INTERFACES HUMANO-MÁQUINA
(IHM) PARA LA MEJORA DEL
PROCESO DE TOMA DE DECISIONES
EN TAREAS DE SUPERVISIÓN
INDUSTRIAL***

M. Sc. Luini Leonardo Hurtado Cortés

Director de la Tesis

Ph. D. Omar Danilo Castrillón Gómez

Codirector de la Tesis

Ph. D. Gerard Olivar Tost

Programa de Doctorado en Ingeniería, Línea Automática
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Campus La Nubia
Manizales, Caldas, Colombia
Noviembre de 2013

El Dr. Omar Danilo Castrillón Gómez y el Dr. Gerard Olivar Tost, Profesores Titulares de la Universidad Nacional de Colombia

CERTIFICAN: que la presente Tesis Doctoral titulada *Desarrollo de una metodología de evaluación de usabilidad de Interfaces Humano-Máquina (IHM) para la mejora del proceso de toma de decisiones en tareas de supervisión industrial*, ha sido realizada bajo su dirección por el Ingeniero M. Sc. Luini Leonardo Hurtado Cortés

Y para que conste a los efectos legales, se extiende la presente certificación en Manizales, el 29 de noviembre de 2013.

Dr. Omar Danilo Castrillón Gómez
Dr. Gerard Olivar Tost

DEDICATORIA

A la Fe en mis principios, motor de mi constancia.

A mi madre Aída (Q.E.P.D), por sussabios consejos e inspiración para la consecución de todos mis logros.

A mi padre Leonardo, por su ejemplo de rectitud e inteligencia para afrontar los problemas.

A mi Esposa Norma, por haberme apoyado y regalado el tiempo, para que yo pudiese culminar con éxito este trabajo.

A mis Hijos Simón y Sergio, por ser mi mayor estímulo para luchar y seguir adelante como ejemplo de vida para ellos.

A mis asesores Omar y Gerard, y a todos los que de una u otra forma me apoyaron con sus conocimientos y tiempo, para que mi proyecto se hiciera realidad.

RESUMEN

Ésta tesis propone, a partir de los métodos y herramientas para la monitorización y supervisión de procesos industriales automatizados, los fundamentos de la ergonomía cognitiva (Cañas y Waern, 2001) y los conceptos de usabilidad de sistemas interactivos (Benyon, 2013), el desarrollo, aplicación y validación de una metodología para la evaluación de la usabilidad de interfaces de sistemas de supervisión industrial.

Inicialmente, se ha planteado una revisión de conceptos sobre cómo se concibe en la actualidad la supervisión industrial en sus etapas básicas, el control, la monitorización, la protección, la detección, el diagnóstico y el aislamiento de fallas en las plantas de procesos industriales. Esta primera investigación, comprende la aproximación a las técnicas basadas en modelos, donde se muestra cómo los sistemas de adquisición de datos y monitorización que se utilizan en la actualidad pueden ser útiles para el diagnóstico del estado del proceso (Isermann, 2011). La información relevante con respecto a las causas y los posibles efectos sobre el proceso, le permitirá al operador de la planta tomar una acertada decisión frente al surgimiento de eventos de falla y el restablecimiento a las condiciones apropiadas de operación. El suministro de la información sobre el estado de la planta es hoy soportada por interfaces humano-máquina (IHM).

Posteriormente, se rescatan los conceptos que forman parte del diseño orientado a humanos planteados por la ergonomía cognitiva. La ergonomía cognitiva es una disciplina que establece varios métodos para describir, modelar y simular el procesamiento cognitivo y de comportamiento, la confiabilidad humana y la interacción entre humanos y máquinas. Sin embargo, dado que los sistemas de supervisión se caracterizan por tener un alto grado de interacción entre el operador y las plantas de proceso, es necesario contar con metodologías en cierto grado confiables para la evaluación de las IHM. Para ello, se recurre entonces al concepto de usabilidad y los métodos que actualmente se utilizan para su evaluación.

Como objetivo principal, es desarrollada una metodología automatizada para evaluar la usabilidad de IHM, que tiene como innovación un sistema tecnológico que utiliza un sistema de adquisición de datos para control y supervisión (SCADA), un sistema de registro de eventos (EVENT LOGGER), un sistema de clasificación de criterios de usabilidad de acuerdo a los eventos de interacción y un sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS), para valorar la

usabilidad de la interfaz de interacción del operador con la planta.

Para el entrenamiento del ANFIS de la metodología, se utilizaron las interfaces de supervisión de una planta para un proceso de dosificación de líquidos y de un simulador de una planta para un proceso de pasterización. Las interfaces fueron elaboradas por estudiantes de cursos de automatización industrial, sin considerar estándares o aspectos de diseño y valoradas por un experto con base en diez criterios de evaluación de usabilidad. Posteriormente, se llevaron a cabo experimentos de interacción con 30 operadores, que fueron dejando huella de su actividad en el registrador de eventos. Tanto los operadores como el experto, respondieron un cuestionario sobre la valoración de las interfaces. Para la prueba del sistema se utilizaron ocho interfaces y para la validación siete.

Para comprobar la exactitud del sistema tecnológico de la metodología, se realizó una prueba de hipótesis frente a la inspección por el experto y la indagación a los usuarios. Con ello, se estableció que la metodología propuesta, tiene equivalencia significativa con respecto a las dos metodologías tradicionales, pero con la ventaja de ser completamente automatizada. El sistema es utilizado para determinar la valoración de la interfaz de supervisión, por la interacción entre operadores y plantas de procesos, establecer las deficiencias y proponer los cambios para el mejoramiento de la interacción.

La metodología desarrollada será una herramienta útil para su aplicación en el diseño de nuevas IHM de soporte al operador en actividades de monitorización, control y supervisión de procesos. Igualmente, este desarrollo permitirá ampliar la visión hacia una teoría de la supervisión industrial humana, integrando los conceptos de monitorización, control, detección y diagnóstico de fallas, modelamiento y simulación del procesamiento cognitivo y de comportamiento humano frente a procesos complejos de la ingeniería.

Palabras Clave: Ergonomía Cognitiva, Usabilidad, Sistemas de Supervisión, Interfaz Humano-Máquina, Sistemas de Inferencia Neuro-difusa.

ABSTRACT

This thesis proposes, based on the methods and tools for monitoring and supervision of automated industrial processes, the foundations of cognitive ergonomics (Cañas and Waern, 2001) and the concepts of usability of interactive systems (Benyon, 2013), the development, implementation and validation of a methodology for evaluating the usability of interfaces for industrial supervision systems.

Initially, it has proposed a revision of concepts on how currently conceived the industrial monitoring, its basic stages, control, monitoring, protection, detection, diagnosis and isolation of faults in industrial process plants. This first investigation, comprising the approach to model-based techniques, which shows how systems of data acquisition and monitoring that are used today, can be useful for the diagnosis of the process state (Isermann, 2011). Relevant information regarding the causes and possible effects on the process, will allow the plant operator make a decision about the emergence of fault events and restoration to the appropriate operating conditions. Providing information on the state of the plant is now supported by the human-machine interfaces (HMI).

Subsequently, the concepts that are part of the human centered design taken from cognitive ergonomics design are rescued. Cognitive Ergonomics is a discipline that provides several methods to describe, model and simulate cognitive processing and behavior, human reliability and the interaction between humans and machines. However, given that monitoring systems are characterized by a high degree of interaction between the operator and process plants, are needed reliable methodologies for assessing the HMI. For this, is used the notion of usability and the methods currently used for its evaluation.

Main objective is developed an automated methodology for evaluating the usability of HMI, whose technological innovation system using a supervisory control and data acquisition system (SCADA), an event log system (EVENT LOGGER), a system of classification of usability criteria according to interaction events and an adaptive system neuro-fuzzy inference (ANFIS) to assess the usability of the interface operator interaction with the plant.

For ANFIS training methodology, a plant supervision interface for liquids dosing process and a plant simulator interface for pasteurization process was used. The interfaces were developed by

students of industrial automation courses, regardless standards or design aspects and valued by an expert based on ten criteria for evaluating usability. Later, they conducted experiments of interaction with 30 operators, who were leaving traces of their activity in the event register. Both operators and skilled, they answered a questionnaire on the evaluation of interfaces. For test technological systems were used eight interfaces and for validation seven interfaces.

To check the accuracy of the technological system of the methodology, a hypothesis test against inspection by the expert and the inquiry was made for users. This established that the proposed methodology has significant equivalence with respect to the two traditional methods, but with the advantage of being fully automated. The system is used to determine the valuation of the monitoring interface, based on the interaction between operators and process plants, establish gaps and propose changes to improve the interaction.

The methodology developed will be a useful tool for use in the design of new IHM support the operator in monitoring activities, control and process monitoring. Also, this development will expand the vision was a theory of human industrial monitoring, integrating the concepts of monitoring, control, fault detection and diagnosis, modeling and simulation of human cognitive processing and behavior in complex engineering processes.

Keywords: Cognitive Ergonomics, Usability, Supervision systems, Human-Machine Interface HMI, Neuro-fuzzy Systems.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES	20
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	20
1.2 LA AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS	21
1.3 LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS	22
1.4 ETAPAS DE LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS	27
1.4.1 La monitorización de procesos	27
1.4.2 La protección automática de procesos	29
1.4.3 La detección de fallas en procesos	33
1.4.4 El diagnóstico de fallas en procesos	36
1.4.5 La supervisión y la administración de fallas	40
2. LA ERGONOMÍA COGNITIVA EN LA INTERACCIÓN HUMANO-MÁQUINA	41
2.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	41
2.2 EL SISTEMA COGNITIVO CONJUNTO	44
2.2.1 El artefacto	45
2.2.2 La tarea	45
2.2.3 La actividad	46
2.2.4 La situación	46
2.2.5 La interacción	47
2.2.6 La interfaz	48
2.2.7 La cognición	48
2.3 PROCESOS COGNITIVOS INVOLUCRADOS EN LA INTERACCIÓN	49
2.3.1 La sensación	49
2.3.2 La percepción	51
2.3.3 La memoria	53
2.3.4 Las búsquedas de información	56
3. LA USABILIDAD Y SU EVALUACIÓN	58
3.1 OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN DE USABILIDAD	59
3.1.1 El laboratorio de usabilidad	60
3.2 APORTES A LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE USABILIDAD	61
3.2.1 Nielsen y Molich	62
3.2.2 Wixson y Wilson	62
3.2.3 Preece	63
3.2.4 Baecker	64
3.2.5 Scriven	65
3.2.6 Whitefield, Wilson y Dowell	65
3.2.7 Coutaz y Balbo	66
3.2.8 Hix y Hartson	67
3.3 PLAN DE EVALUACIÓN	67
3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD	68
3.5 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD	70

3.6 EVALUACIÓN DE USABILIDAD DE INTERFACES DE SUPERVISIÓN DE PROCESOS	71
4. SISTEMAS ADAPTATIVOS DE INFERENCIA NEURODIFUSA	73
4.1 LOS SISTEMAS DIFUSOS	73
4.2 LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	77
4.2.1 Componentes de una neurona artificial	78
4.2.2 Escalonamiento y limitación	80
4.2.3 Función de salida (competitividad)	81
4.2.4 Función de error y el valor propagado hacia atrás	81
4.2.5 Tasa de aprendizaje	82
4.3 ARQUITECTURA DE REDES NEURONALES	82
4.4 ENTRENAMIENTO DE UNA RNA	83
4.4.1 Entrenamiento supervisado	84
4.4.2 Entrenamiento no supervisado	84
4.4.3 Fase de recuerdo	85
4.4.4 Arquitecturas de RNA	85
4.5 SISTEMAS NEURODIFUSOS	85
4.6 SISTEMA DE INFERENCIA TAGAKI-SUGENO	88
4.7 ARQUITECTURA ANFIS	92
5. METODOLOGÍA AUTOMATIZADA PARA LA EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD DE INTERFACES HUMANO-MÁQUINA	95
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	130
6.1 RESULTADOS DEL ENTRENAMIENTO DEL ANFIS CON LA INTERFAZ DE LA PLANTA DEL PROCESO DE DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS	130
6.2 RESULTADOS DEL ENTRENAMIENTO DEL ANFIS CON LA INTERFAZ DE LA PLANTA DEL PROCESO DE PASTERIZACIÓN	133
6.3 RESULTADOS CON INTERFACES DE PRUEBA	135
6.4 INTERFACES PARA VALIDACIÓN	149
7. DISCUSIÓN	161
8. CONCLUSIONES	166
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	181

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1. Ejemplos de protecciones automáticas	33
Tabla 3.1. Métodos de evaluación según Whitefield	65
Tabla 3.2. Clasificación de los métodos de evaluación de la usabilidad	70
Tabla 3.3. Comparación de los métodos de evaluación de la usabilidad	71
Tabla 4.1. Resumen de arquitecturas de redes neuronales	85
Tabla 5.1. Identificación de cada elemento del proceso de dosificado de líquidos	100
Tabla 5.2. Relación de fallas presentadas en la planta para el proceso de dosificado de líquidos.	102
Tabla 5.3 Resumen de fallas dela planta del proceso de pasterización en la planta PCT23	114
Tabla 5.4 Relación de ID de eventosde seguridad que se relacionan con los criterios de usabilidad	121
Tabla 6.1. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfazhumano-máquina para la planta de dosificación de líquidos durante el entrenamiento.	130
Tabla 6.2. Operaciones de Anova para la prueba de hipótesis	131
Tabla 6.3. Anova para usabilidad baja	132
Tabla 6.4. Anova para usabilidad media	132
Tabla 6.5. Anova para usabilidad alta	132
Tabla 6.6. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la planta de pasterización durante el entrenamiento	133
Tabla 6.7. Operaciones de Anova	134
Tabla 6.8. Anova para usabilidad baja	135
Tabla 6.9. Anova para usabilidad media	135
Tabla 6.10. Anova para usabilidad alta	135
Tabla 6.11. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para un sistema de refrigeración y aire acondicionado	136
Tabla 6.12. Anova para usabilidad baja	136
Tabla 6.13. Anova para usabilidad media	137
Tabla 6.14. Anova para usabilidad alta	137
Tabla 6.15.Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para manejo de incertidumbres en procesos	138
Tabla 6.16. Anova para usabilidad baja	138
Tabla 6.17. Anova para usabilidad media	138
Tabla 6.18. Anova para usabilidad alta	139
Tabla 6.19.Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para análisis y síntesis de controladores robustos	139
Tabla 6.20. Anova para usabilidad baja	140
Tabla 6.21. Anova para usabilidad media	140
Tabla 6.22. Anova para usabilidad alta	140
Tabla 6.23. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la interconexión de sistemas de procesos	141
Tabla 6.24. Anova para usabilidad baja	142
Tabla 6.25. Anova para usabilidad media	142
Tabla 6.26. Anova para usabilidad alta	142
Tabla 6.27. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el diseño de controladores robustos	143

Tabla 6.28. Anova para usabilidad baja	143
Tabla 6.29. Anova para usabilidad media	143
Tabla 6.30. Anova para usabilidad alta	144
Tabla 6.31. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para sistema de control de un proceso híbrido	144
Tabla 6.32. Anova para usabilidad baja	145
Tabla 6.33. Anova para usabilidad media	145
Tabla 6.34. Anova para usabilidad alta	145
Tabla 6.35. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el control de procesos por lotes utilizando redes de Petri difusas	146
Tabla 6.36. Anova para usabilidad baja	147
Tabla 6.37. Anova para usabilidad media	147
Tabla 6.38. Anova para usabilidad alta	147
Tabla 6.39. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el proceso de molienda del ingenio Providencia	148
Tabla 6.40. Anova para usabilidad baja	148
Tabla 6.41. Anova para usabilidad media	148
Tabla 6.42. Anova para usabilidad alta	149
Tabla 6.43. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la planta de pasteurización durante el entrenamiento	149
Tabla 6.44. Anova para usabilidad baja	150
Tabla 6.45. Anova para usabilidad media	150
Tabla 6.46. Anova para usabilidad alta	150
Tabla 6.47. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para realización mínima multivariable	151
Tabla 6.48. Anova para usabilidad baja	152
Tabla 6.49. Anova para usabilidad media	152
Tabla 6.50. Anova para usabilidad alta	152
Tabla 6.51. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la monitorización de una planta embotelladora	153
Tabla 6.52. Anova para usabilidad baja	153
Tabla 6.53. Anova para usabilidad media	153
Tabla 6.54. Anova para usabilidad alta	154
Tabla 6.55. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la comunicación con protocolo Modbus de variables de un variador de velocidad	154
Tabla 6.56. Anova para usabilidad baja	155
Tabla 6.57. Anova para usabilidad media	155
Tabla 6.58. Anova para usabilidad alta	155
Tabla 6.59. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el control remoto de nivel de un proceso	156
Tabla 6.60. Anova para usabilidad baja	157
Tabla 6.61. Anova para usabilidad media	157
Tabla 6.62. Anova para usabilidad alta	157
Tabla 6.63. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para monitorización de señales electromiográficas.	158
Tabla 6.64. Anova para usabilidad baja	158
Tabla 6.65. Anova para usabilidad media	158
Tabla 6.66. Anova para usabilidad alta	159
Tabla 6.67. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el diseño de redes con algoritmo de enrutamiento de Prim	159

Tabla 6.68. Anova para usabilidad baja	160
Tabla 6.69. Anova para usabilidad media	160
Tabla 6.70. Anova para usabilidad alta	160

ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1. Esquema simplificado de automatización de procesos	22
Figura 1.2. Ejemplo de una interfaz de un sistema SCADA	24
Figura 1.3. Sala de control para realizar la supervisión de procesos industriales	24
Figura 1.4. El operador humano como componente de un sistema de supervisión	25
Figura 1.5. Esquema del conocimiento de la situación por parte de operadores de procesos	26
Figura 1.6. Umbrales de alarma	30
Figura 1.7. Activación de alarma por superación de umbral absoluto	31
Figura 1.8. Activación de alarma por superación de umbral absoluto	31
Figura 1.9. Activación de alarma por velocidad de cambio	32
Figura 1.10. Esquema de un proceso en lazo abierto influenciado por fallas	34
Figura 1.11. Esquema de un proceso en lazo cerrado influenciado por fallas	35
Figura 1.12. Esquema general de diferentes métodos de supervisión con administración de fallas (lazo de supervisión)	39
Figura 2.1. Sistema cognitivo conjunto	44
Figura 2.2. Interacción humano-artefacto en el sistema cognitivo conjunto	49
Figura 3.1. Sala de observación de un laboratorio de usabilidad	60
Figura 4.1. Diagrama de bloques de un sistema difuso	73
Figura 4.2. Diagrama de bloques de un sistema de control difuso	75
Figura 4.3. Mecanismos más usuales de razonamiento difuso	77
Figura 4.4. Elementos básicos de una neurona artificial	78
Figura 4.5. Ejemplos de funciones de activación	80
Figura 4.6. Funciones típicas de pertenencia: a) trapezoidal, b) campana, c) triangular y d) gaussiana	90
Figura 4.7. Obtención de función de pertenencia bidimensional	91
Figura 4.8. a) Forma de la función de pertenencia bidimensional; b) ilustración de la aproximación de una función para un controlador difuso unidimensional Obtención de función de pertenencia bidimensional con Singleton en el consecuente.	91
Figura 4.9. Arquitectura ANFIS para un controlador difuso	93
Figura 5.1. Sala de automatización de procesos para evaluación como entorno natural	97
Figura 5.2. Sala equipada como laboratorio de usabilidad	98
Figura 5.3 Planta de dosificación de líquidos	99
Figura 5.4 Diagrama P&ID del proceso de dosificado de líquidos	101
Figura 5.5 Circuito del sensor de intensidad de corriente on-off	101
Figura 5.6 Esquema del sistema de detección de fallas	102
Figura 5.7 Estructura del observador a la salida para la detección de fallas	103
Figura 5.8 Esquema del modelo de proceso de dosificación enStateflow®.	107
Figura 5.9 Diagrama de la secuencia de operación de la planta	107
Figura 5.10 Representación de las condiciones y acciones en tabla de verdad	108
Figura 5.11 Implementación del observador de estado	109
Figura 5.12 Planta para un proceso de pasterización PCT23.	110
Figura 5.13 Esquema de lazos de control del proceso en la planta piloto PCT23	113
Figura 5.14 Simulador del proceso de pasterización de la planta PCT23	114
Figura 5.15 Simulador del proceso de pasterización incluyendo los detectores de fallas	115
Figura 5.16 Pantallas IHM para la supervisión del proceso de dosificación de líquidos.	116
Figura 5.17 Pantallas IHM para la supervisión del proceso de pasterización.	117

Figura 5.18 Conocimiento de la situación en la supervisión con interfaz humano-máquina.	119
Figura 5.19 Módulo de registro de eventos del operador a través de la interfaz.	120
Figura 5.20 Representación de las funciones de pertenencia de criterios de usabilidad	123
Figura 5.21 Estructura de la red neuronal para el entrenamiento con base en criterios de usabilidad	124
Figura 5.22 Esquema general del sistema de evaluación de usabilidad de Interfaces de Supervisión de Procesos	126
Figura 5.23 Diagrama de flujo de la aplicación desarrollada para la ejecución de la metodología de evaluación de usabilidad de interfaces de supervisión	128
Figura 6.1. Interfaz humano-máquina para control óptimo de sistemas de refrigeración y aire acondicionado.	136
Figura 6.2. Interfaz humano-máquina para manejo de incertidumbres en procesos	137
Figura 6.3. Interfaz humano-máquina para análisis y síntesis de controladores robustos	139
Figura 6.4. Interfaz humano-máquina para interconexión de sistemas de procesos	141
Figura 6.5 Interfaz humano-máquina para el diseño de controladores robustos	142
Figura 6.6 Interfaz humano-máquina para sistema de control de un proceso híbrido	144
Figura 6.7 Interfaz humano-máquina para control de procesos por lotes utilizando redes de Petri difusas	146
Figura 6.8 Interfaz humano-máquina para el proceso de molienda del ingenio Providencia	147
Figura 6.9 Interfaz humano-máquina de un sistema de llenado y transporte de botellas	149
Figura 6.10 Interfaz humano-máquina para realización mínima multivariable	151
Figura 6.11 Interfaz humano-máquina de monitorización de una planta embotelladora	152
Figura 6.12 Interfaz humano-máquina de comunicación con protocolo MODBUS de variables de un variador de velocidad	154
Figura 6.13. Interfaz humano-máquina para el control remoto de nivel de un proceso	156
Figura 6.14 Interfaz humano-máquina para la monitorización de señales electromiográficas	157
Figura 6.15 Interfaz humano-máquina para diseño de redes con algoritmo de enrutamiento de Prim.	159

ÍNDICE DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1: productos derivados y/o relacionados con la Tesis	169
ANEXO 2: código fuente del programa clasificador y entrenador del sistema de adaptación neuro-difusa, para el generador de eventos de seguridad de Microsoft Windows versión 7	170

SIGLAS Y ABREVIATURAS

TGS	Teoría General de Sistemas
SCADA	Supervisory and Control And Data Adquisition, Adquisición de Datos para Supervisión y Control
EVENT LOGGER	Registrador de eventos
PCA	Principal Components Analysis, Análisis de Componentes Principales
QTA	Qualitative Tendency Analysis, Análisis Cualitativo de Tendencias
MBO	Métodos Basados en Observadores
MBS	Métodos Basados en Supuestos
MBR	Métodos Basados en Reglas
GSD	Grafos de Señal Dirigida
DDE	Dynamic Data Exchange, Intercambio Dinámico de Datos
EC	Ergonomía Cognitiva
IC	Ingeniería Cognitiva
IPC	Interfaz Persona-Computador
IHM	Interfaz Humano-Máquina
IHA	Interacción Humano-Automatización
SCC	Sistema Cognitivo Conjunto
CS	Conocimiento de la Situación
EU	Evaluación de la Usabilidad
GRAF CET	GRAfo Funcional de Comando Estado Transición
POO	Programación Orientada a Objetos
IA	Inteligencia Artificial
TC	Teoría de Control
FIS	Fuzzy Inference System, Sistema de Inferencia Difusa.
RNA	Red Neuronal Artificial
ANFIS	Adaptative-Network-Based Fuzzy Inference Systems, Sistema Adaptativo de Inferencia Neuro-Difusa
TSK	Modelo Difuso de Takagi-Sugeno
LSE	Least Squares Estimate, Estimación por Mínimos Cuadrados.
RBF	Radial Basis Function, Funciones de Base Radial
RMSE	Root Mean Squared Error, Error Cuadrático Medio
ANOVA	ANalysis Of Variance, Análisis de Varianza

INTRODUCCIÓN

En la supervisión de plantas de proceso, son varias las actividades que realizan los operadores. De acuerdo con los niveles de automatización, un operador debe conocer el estado de la planta, detectar posibles situaciones de riesgo, tomar el control cuando se requiera y planificar las acciones a corto y largo plazo. Estas actividades tienen relación con los procesos cognitivos humanos y su correcto desempeño depende de la interacción con la planta o interacción humano-máquina.

Estudios experimentales relacionados con el desempeño de operadores en situaciones complejas de emergencias simuladas cognitivamente han suministrado evidencias de que el soporte procedimental no es suficiente para manejar situaciones de alto riesgo (Endsley, 2013). Los operadores que se encuentran en salas de control, deben utilizar modelos mentales de los sistemas físicos para razonar cualitativamente sobre los efectos esperados por los diferentes factores que influyen en el estado de la planta, con el fin de identificar situaciones de riesgo y planear las acciones para mitigarlas.

En los informes de las comisiones de incidentes y accidentes se han puesto en evidencia las consecuencias originadas por la poca eficacia de las decisiones tomadas durante la operación de plantas en situaciones de alto riesgo, ya que cuando sucede un evento inesperado el ser humano es el que tiene que tomar el control sobre el proceso, interactuando directamente con los dispositivos. Esto se debe a que un operador difícilmente desarrolla un proceso cognitivo en torno a las causas y consecuencias para una situación particular en tiempo real (Hancock y otros, 2013), o porque no cuenta con las herramientas de apoyo para la toma de decisiones a partir de un modelo de funcionamiento de la planta.

En la actualidad, no hay suficientes antecedentes sobre la aplicación de metodologías apropiadas para la evaluación de la usabilidad de IHM (Granollers y Lóres, 2005; Adikari y McDonald, 2006; Jander y Alfredson, 2013), que pueda adoptarse para mejorar el diseño de las interfaces de interacción y lograr un mejor desempeño de los operadores en la toma de decisiones en tareas de supervisión en las salas de control de plantas de proceso.

Ésta problemática permite establecer que actualmente, los sistemas de adquisición de datos para control y supervisión (SCADA) de plantas automatizadas no parecen cumplir su papel como un equipo cooperativo y por ende, son necesarios algunos cambios para optimizar los diseños y así

mejorar la coordinación y la cooperación entre humanos y máquinas.

El diseño de salas de control ha presentado un cambio de filosofía en los últimos años, debido a la importancia de la interacción humano-máquina y por tanto, del aporte de la ergonomía cognitiva en este contexto. La correcta utilización del análisis de factores humanos, contribuye de forma primordial al diseño de sistemas tecnológicos altamente especializados.

Durante la supervisión de plantas automatizadas de proceso, las actividades del operador tienen relación con el procesamiento cognitivo, porque interactúa con objetos gráficos que representan los objetos reales. A pesar del conocimiento y la experiencia del operador en la operación de una planta, él necesita recurrir a modelos mentales de sistemas físicos y razonar de manera cualitativa en varios momentos y escenarios de funcionamiento de la planta, para tomar la mejor decisión ante una situación crítica.

Durante los últimos 50 años, la ingeniería, ha desarrollado varias técnicas, herramientas, modelos, etc., para representar, describir, analizar o diseñar secuencias de funcionamiento de plantas automatizadas que son útiles en escenarios estáticos. Sin embargo, durante la operación de una planta, dado que se trata de un escenario dinámico, el operador difícilmente recurre a los enfoques desde el punto de vista de la ingeniería. En cambio, si recurre al uso de estructuras o modelos cognitivos que él mismo construye para hacerle frente a la operación y toma de decisiones especialmente en situaciones de riesgo.

El procesamiento cognitivo eficiente del operador, sobre la base de sus modelos mentales depende del grado de adaptabilidad de las IHM para la operación y monitorización de plantas automatizadas, que tradicionalmente han sido desarrolladas e implementadas bajo los enfoques de la ingeniería y no desde la ergonomía cognitiva, porque se le ha puesto mayor interés a la funcionalidad que a la experiencia de uso.

Para tener en cuenta cual es el grado de adaptabilidad de las interfaces IHM, durante la monitorización y operación de plantas automatizadas, se requiere el uso de tecnologías que incorporen mecanismos de adaptación, incluyendo al operador en el lazo de retroalimentación y una estrategia para valorar el grado de adaptación de la interacción con las plantas de procesos automatizados a través de interfaces IHM.

Por ende, la evaluación de usabilidad hoy en día plantea varios métodos, que están clasificados según el lugar de realización, el uso de técnica de inspección, indagación o prueba, la participación o no de usuarios y si se hace de manera manual o automática. En resumen, se puede enunciar la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo evaluar la usabilidad de las Interfaces Humano-Máquina (IHM) utilizadas para la supervisión de plantas de procesos industriales automatizados, que incorpore al operador de la planta y que a su vez entregue resultados en corto tiempo, para que se constituya en herramienta de mejora de los diseños de interfaces, conllevando a una mejor interacción con el operador y que sirva de soporte en la toma de decisiones, especialmente en situaciones de alto riesgo para la planta?

1. LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El desarrollo histórico de los diversos métodos de supervisión, detección y diagnóstico de fallas es difícil de describir, debido a la vasta literatura que existe sobre el tema. La verificación de límites es tan antigua como la instrumentación de máquinas que se remonta a finales del siglo XIX. Para la supervisión de plantas el uso de registros impresos de tinta y después de puntos se estandarizó hacia 1935. En los años 60's, los controladores basados en transistores y controladores secuenciales con instrumentación cableada, era utilizada para la verificación de límites. Posteriormente, se pudieron aplicar métodos de señales basados en modelos, como el análisis espectral mediante filtros pasa bandas y osciloscopios.

La implementación de los computadores para la operación en línea con los procesos, en los años 60's, abrió un camino hacia el perfeccionamiento de los métodos de supervisión, como el análisis de tendencias. En 1968, fueron introducidos los primeros controladores lógicos programables para reemplazar los controladores de relevos electromecánicos. Esto hizo más fácil la implementación de sistemas de protección. La llegada del microprocesador en 1971 y sus crecientes aplicaciones en sistemas descentralizados de automatización de procesos desde 1975, fue el inicio de las aplicaciones computarizadas de algoritmos de detección de fallas y de la supervisión basada en software. Las primeras publicaciones de métodos de detección de fallas basados en modelos de procesos aparecieron haciendo referencia a sistemas aeroespaciales (Beard, 1971, Clark, 1990, Jones, 1973 y Willsky, 1976) y plantas químicas (Himmelblau, 1978). Entre los primeros conceptos pueden mencionarse los estudios de relaciones de paridad (Gertler y Singer, 1985), la verificación de la consistencia en las lecturas de datos de instrumentos y los balances de masa o materia. Los residuos de los balances de masa, fueron aplicados para la detección de fugas en tuberías (Siebert e Isermann, 1977).

Los métodos basados en observadores de estado fueron desarrollados para generar residuos, aplicando observadores de estado de Luenberger (Beard, 1971 y Jones, 1973) o filtros de Kalman (Mehra y Peschon, 1971). La redundancia analítica, se utilizó para detectar fallas en sensores aplicando bancos de observadores (Clark, 1990). Con el fin de compensar para entradas no

medidas, se desarrollaron observadores para entradas desconocidas y observadores para salidas (Watanabe e Himmelblau, 1982 y Frank y Wünnenberg, 1987), también la aplicación de observadores con asignación de eigen-estructura (Patton, 1998). Otra vía para la detección de fallas es el uso de la estimación de parámetros (Hohmann, 1987 y Bakiotis y otros, 1979). Haciendo referencia a turbinas de jet (Isermann, 1980, 1982 y 1994) a bombas, motores DC y procesos en general (Filbert, 1985 y Filbert y Metzger, 1982).

Posterior a estas publicaciones, se han hecho varias contribuciones en el campo de la detección y diagnóstico de fallas. Los desarrollos pueden verse revisando varios artículos como (Frank, 1987, 1990, Gertler, 1988, Isermann, 1984, 1993 y 1994 y Patton, 1994). Un resumen de publicaciones durante los años 1991 a 1996 con aplicaciones se encuentra en (Isermann y Ballé, 1997). Además de libros de varios autores (Patton y otros 1989 y 2000) tienen un amplio panorama en el campo. Varios libros sobre detección de fallas suministran un resumen importante de las diferentes técnicas (Himmelblau, 1978; Brunet y otros, 1990; Poulizeos y Stravlakakis, 1994; Isermann, 1994; Gertler, 1998; Gertler, 2005; Blanke y otros, 1997; Chen y Patton, 1999 y Blanke y otros, 2006). Otra fuente de varias publicaciones son la serie de simposios de la IFAC SAFEPROCESS, realizados en Baden-Baden (1991), Helsinki (1994), Hull (1997), Budapest (2000), Washington (2003), Beijing (2006), Barcelona (2009) y México (2012).

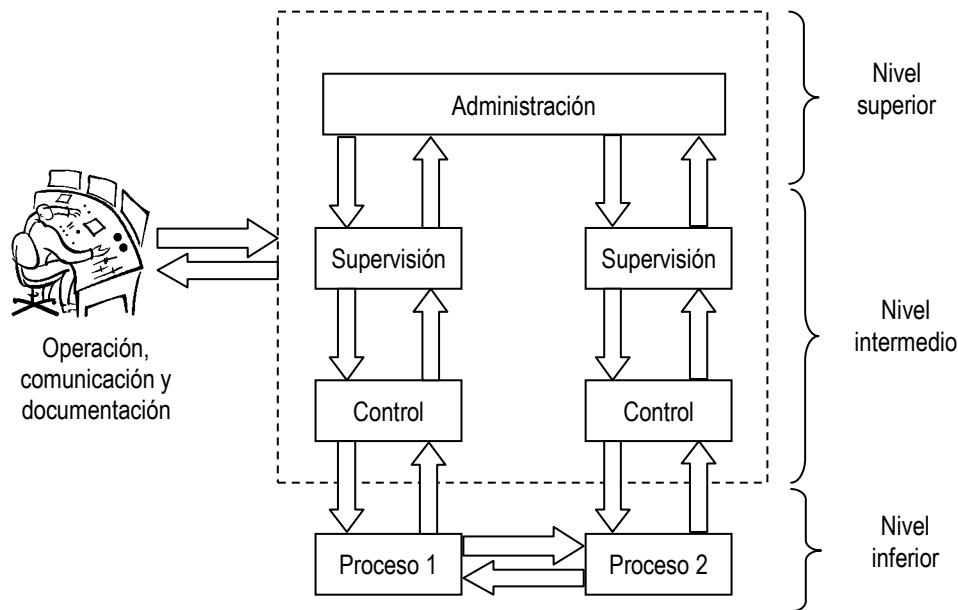
1.2 LA AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS

Desde los años 60's, la influencia de la automatización en el diseño y operación de procesos se incrementó considerablemente. La expansión de los desarrollos de la automatización fue originada por el incremento en la demanda y calidad de productos o servicios y por la independencia del humano en la operación de los procesos en tareas monótonas y riesgosas. Hacia 1975, con la introducción del procesador, el grado de automatización cambió drásticamente, ya que con este dispositivo, se solucionaron muchos problemas de manejo de información, paralelamente con el desarrollo en áreas de sensores, accionamientos, sistemas de comunicación vía bus e IHM. El progreso en el conocimiento de los procesos y de las funciones de automatización también jugaron un papel importante (Isermann, 2011).

La [figura 1.1](#) muestra un esquema simplificado de la automatización de dos procesos acoplados. El nivel inferior contiene la secuencia de control. La supervisión puede asignarse al nivel medio. El nivel superior comprende las acciones globales de coordinación, optimización y administración. La

información importante acerca del proceso es mostrada por medio de una consola al operador.

Figura 1.1. Esquema simplificado de automatización de procesos



Fuente: propia.

Sin embargo, la mayor parte de las funciones de control se realizan en los niveles inferiores, pero lo más importante son las funciones de supervisión, debido a que los operadores han sido removidos paulatinamente de los procesos. Las acciones de un operador humano no están orientadas solamente al control del proceso colocando las consignas o programando tiempos. El operador también supervisa el proceso, especialmente, si existe un contacto directo. Por consiguiente, el mejoramiento de las acciones de control en el bajo nivel, ha conllevado además al mejoramiento de las acciones de supervisión, que encierran la confiabilidad y seguridad del proceso.

1.3 LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS

La supervisión de procesos consiste en el conjunto de acciones encaminadas a asegurar su correcto funcionamiento, incluso en situaciones de riesgo. La supervisión se realiza a través de operadores especializados que detectan la presencia de comportamientos anómalos y actúan en consecuencia ajustando parámetros, cambiando consignas y activando accionamientos para conservar la capacidad operativa del proceso o prevenir un problema mayor (Colomer y Meléndez, 2003).

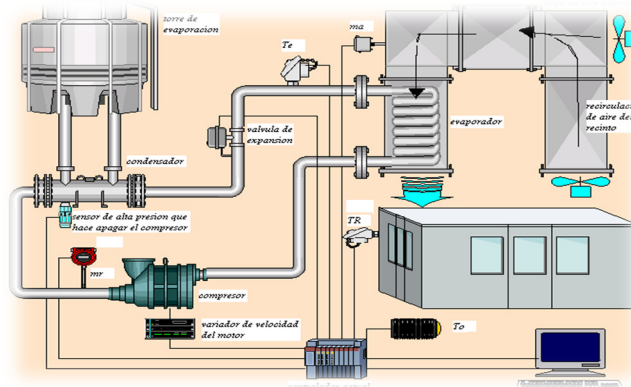
Un sistema de supervisión debe dar al operador el máximo soporte liberándolo de la tensión de la vigilancia constante y de las tareas rutinarias. Entre los principales beneficios de un sistema de supervisión están:

- Reducir el costo de aprendizaje del personal de planta.
- Facilitar una comprensión rápida del proceso.
- Facilitar la localización e identificación rápida de dispositivos o partes del proceso por asociación gráfica entre la representación y el proceso real.
- Permitir la fácil interacción con diferentes dispositivos de forma intuitiva.
- Permitir la sistematización de tareas como elaboración de informes periódicos, lectura y comparación de registros, entre otros.
- Permitir una rápida adaptación del personal, conservando la uniformidad en la toma de decisiones.
- Disminuir los inconvenientes producidos por situaciones eventuales como vacaciones, despidos, cambios de turnos, renunciaciones, etc.

El correcto aprovechamiento del conocimiento e información disponible sobre el proceso, permitirá la evaluación automatizada, continua y en línea de manera objetiva. De esta forma se garantiza una uniformidad en la toma de decisiones, independiente de las apreciaciones subjetivas. Para ello, existen los sistemas SCADA, que permiten el envío, la recepción, el transporte, la organización y presentación de la información importante para que el operador pueda llevar a cabo las tareas de supervisión industrial. El medio de comunicación entre estos sistemas y el operador son las IHM que lo asisten, permitiendo el ajuste de parámetros, constantes y la manipulación de algunas variables ([figura 1.2](#)).

Aunque la mayoría de productos SCADA que se encuentran en el mercado, cumplen con las tareas de adquisición de datos y control (compartiendo responsabilidad con los dispositivos de campo), están distantes de ser entornos de supervisión y sus funcionalidades básicas deben complementarse con otras aplicaciones. El papel de supervisión de los actuales sistemas SCADA queda destinado a la activación y registro de alarmas, asociadas al traspaso de umbrales por parte de variables analógicas. Aunque las alarmas pueden considerarse una forma simple de detección de fallas, quedan por cubrir otras tareas de supervisión.

Figura 1.2. Ejemplo de una interfaz de un sistema SCADA



Fuente: Hurtado, 2005

Los operadores de los sistemas de supervisión se concentran en las salas de control. Una sala de control generalmente dispone de un gran número de dispositivos automáticos que funcionan bajo condiciones normales. La eficacia de las decisiones tomadas en su diseño se comprueba en situaciones de alto riesgo, ya que cuando sucede un evento inesperado, el ser humano es el que tiene que tomar el control del proceso, interactuando directamente con los dispositivos (Hurtado, 2006a). Los operadores humanos situados en salas de control ([figura 1.3](#)), realizan cambios mayores y supervisan el estado completo del proceso. Esto se lleva a cabo por la interacción con sistemas computarizados o por la comunicación con personas que se encuentran alrededor de la planta.

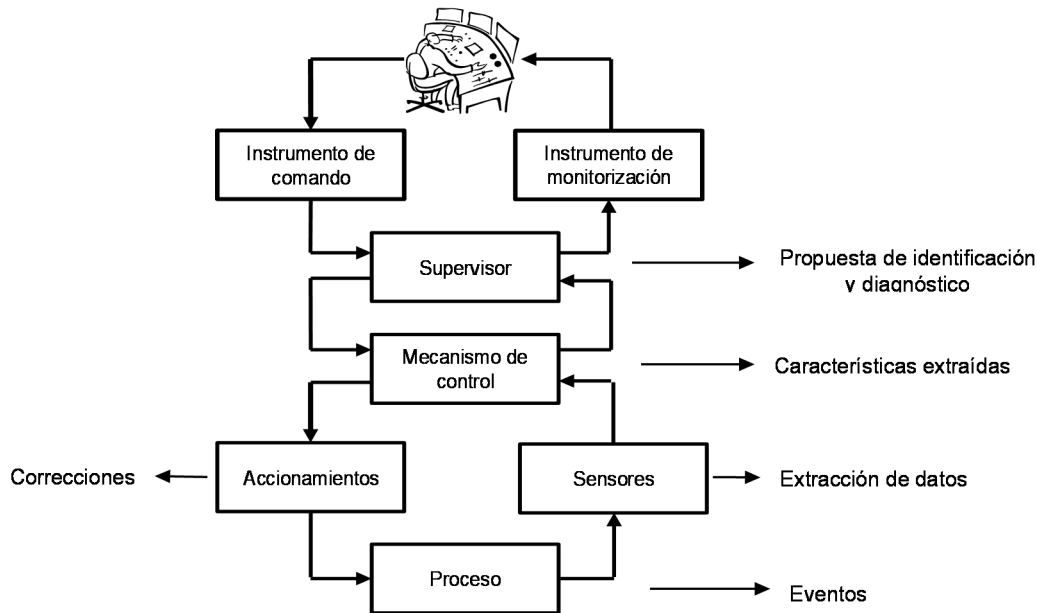
Figura 1.3. Sala de control para realizar la supervisión de procesos industriales



Fuente: www.yacyreta.org.ar

Durante situaciones anormales, el operador necesita interpretar información suministrada por el sistema de supervisión, con el fin de determinar qué está sucediendo en el proceso y planear las intervenciones apropiadas, cuando son requeridas (figura 1.4). En la actualidad, el creciente nivel de automatización de los procesos, ha eliminado gradualmente al operador de la interacción directa con la planta, haciendo que el trabajo desarrollado por él, esté más orientado a la cognición (Cacciabue y Saad 2008; Cacciabue y Cassani, 2012).

Figura 1.4. El operador humano como componente de un sistema de supervisión



Fuente: propia.

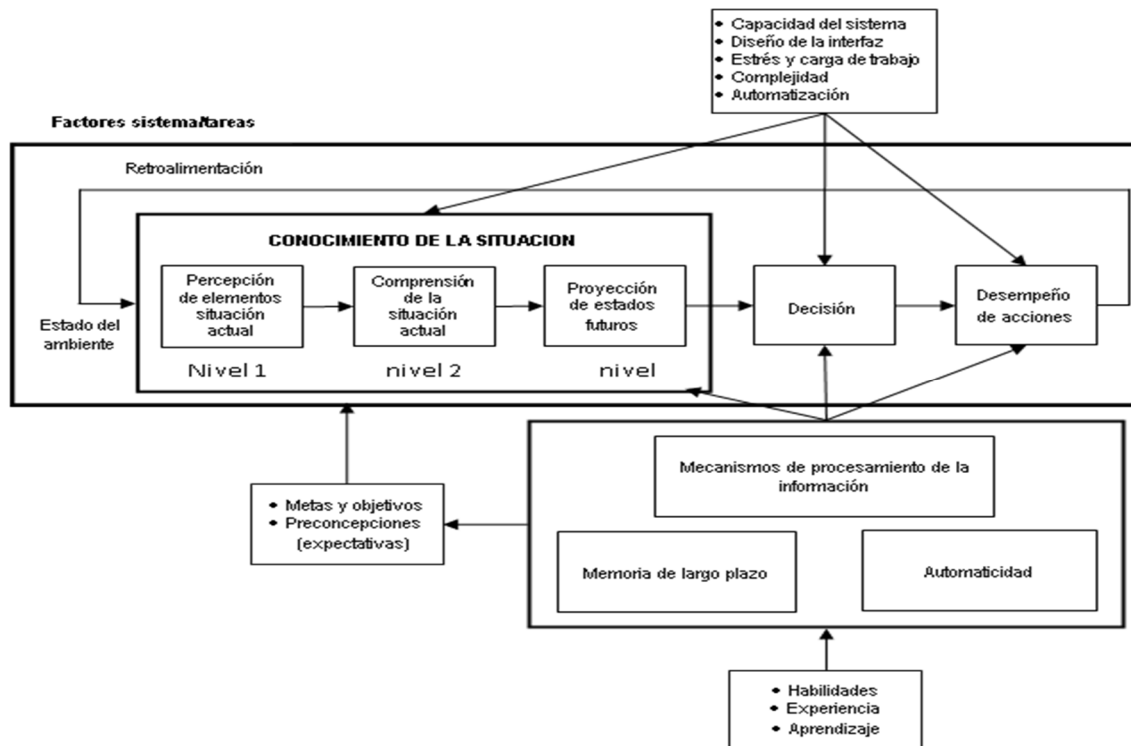
Los controles automáticos se basan en modelos dinámicos de partes particulares de la planta. Por ejemplo, para llevar a cabo la tarea de encendido, se requiere que la planta se encuentre en un estado cercano a su condición de operación. Otra condición para un apropiado comportamiento del sistema de control automático, es que el modelo de la planta se mantenga válido durante su operación (Merzouli y otros, 2013).

Las plantas de procesos complejos se controlan por sistemas automáticos y operadores humanos en las salas de control. Un tipo de control automático (lazos de control) es responsable de mantener el proceso entre los límites de operación establecidos, mientras otros tipos de controladores automáticos (controles de supervisión) son responsables de ajustar tales límites de operación, así como de manejar irregularidades. No obstante, una limitación central asociada con el desarrollo de

sistemas automatizados ha sido el problema del desempeño fuera del lazo. Al actuar como encargados de un sistema automatizado, las personas tienen un desempeño relativamente lento, cuando descubren que un problema ha ocurrido y se hace necesario su intervención. Además, una vez descubierto el evento anómalo, se requiere también de un tiempo adicional necesario para determinar el estado del sistema de una manera apropiada. El tiempo extra utilizado para realizar los pasos hacia la solución puede ser crítico. El resultado va desde pequeños retrasos en el desempeño humano, hasta fallas catastróficas con graves consecuencias.

Comúnmente, un operador experimentado está familiarizado con situaciones que ocurren con frecuencia y no con situaciones, que ocurren esporádicamente. La frecuencia de las situaciones que requieren intervenciones del operador, varía respecto a su potencial de riesgo. Las situaciones menos críticas ocurren más a menudo que las más críticas. En esta valoración activa de la situación (Endsley, 2013), es importante tratar perturbaciones de procesos complejos. Esto implica que el operador debe desarrollar un completo entendimiento de la situación particular, incluyendo el conocimiento de las causas y las consecuencias del estado de la planta, así como las metas a alcanzar y las posibles estrategias que originan estas metas (figura 1.5).

Figura 1.5. Esquema del conocimiento de la situación por parte de operadores de procesos



Fuente: Adaptado y traducido de Endsley, 2013.

Típicamente, en situaciones de perturbaciones no familiares, el conocimiento acerca de las causas y consecuencias es un producto del razonamiento causal o simulación mental, basada sobre un modelo explícito del sistema a ser supervisado, a menudo es llamado un modelo mental (Hoffman y otros, 2013). El modelo o la representación, que forma la base para la valoración de la situación, desempeña un papel crucial. Una de las aplicaciones sobre la forma cómo las representaciones suministran un marco para la interpretación de datos de procesos, radica en extraer el significado de los datos. Sin embargo, dada la concepción del operador, de lo que puede ser una interpretación relevante con respecto al estado del sistema, cambia consecuentemente la solución del problema, en virtud del contexto subyacente de interpretación.

Los sistemas de información inteligente que automáticamente suministran a los operadores constantes actualizaciones y relevantes interpretaciones del estado del proceso, en principio funcionan para la supervisión. No obstante, estos sistemas no están dotados de habilidades humanas con capacidad de cambiar perspectivas y representaciones de los objetivos del proceso en tiempo real, en respuesta a situaciones con características específicas.

1.4 ETAPAS DE LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS

1.4.1 La monitorización de procesos

El seguimiento del proceso y de la evolución de forma continuada del producto son los aspectos que permitirán alertar sobre el buen o mal funcionamiento para establecer criterios de ajuste y cambio dentro del proceso. Se entiende como monitorización a la automatización del proceso de vigilancia, dotando al operador de los mecanismos necesarios para su alerta, la interacción amigable con el proceso y el registro de su evolución. Su propósito es facilitar la detección de situaciones anómalas y su diagnóstico a través del seguimiento continuo de las variables de proceso.

Para llevar a cabo la monitorización, se necesitan interfaces adecuadas para la interacción con el proceso y mecanismos adicionales de alerta (alarmas) y soporte en la decisión. El registro de evoluciones anteriores (históricos) ha de contribuir en la decisión y al diagnóstico tanto de situaciones anómalas como de requerimientos. Los paquetes actuales de monitorización cubren estas funciones a partir de las medidas continuas de las variables de proceso, estableciendo mecanismos de alerta sobre estas variables.

La solución más económica por no necesitar de alimentación propia, ni chasis, ni pantalla de visualización la ofrecen las tarjetas de adquisición de datos. Directamente conectables al bus del computador, necesitan para su utilización un software específico para su control y configuración o de los drivers suministrados por el fabricante para ser utilizadas desde un paquete estándar de adquisición o control. Por lo general incorporan conversores A/D y D/A que se aplican sobre entradas y salidas analógicas normalizadas y digitales que posibilitan la comunicación con otros periféricos, generación patrones de test y opciones de control de proceso. Las tarjetas de adquisición son utilizadas en aplicaciones complejas de control en que la potencia de cálculo del computador es necesaria, admitiendo de esta forma la potencialidad de cálculo que los paquetes de software actuales ofrecen o la flexibilidad de utilizar algoritmos desarrollados en lenguajes de programación de alto nivel. Para grandes instalaciones, la utilización de placas de expansión de bus y de interfaces permite ampliar el número de entradas y salidas a tratar, llegando a considerar centenares de entradas en sistemas de E/S distribuidas. Estas configuraciones permiten realizar tanto supervisión como control directo de la planta debido a la velocidad de transferencia. A medida que el número de E/S y las longitudes crecen, los sistemas de distribución pasan por la utilización de buses de campo con transmisión en serie.

Otro elemento de interconexión son los buses de instrumentación, que son sistemas basados en instrumentos externos unidos al computador mediante una interfaz estándar de comunicación. Las interfaces más comunes son el GPIB (HP-IB), basado en el estándar IEEE- 488.2, con capacidad de controlar hasta 15 aparatos desde un mismo controlador (computador) y con una velocidad de transferencia de 1Mbyte/s. La plataforma VXI, derivada del bus VME (bus 32bits), que combina instrumentos y controladores programables con tarjetas en bus de computadores. Los instrumentos (programables) VXI se montan en un chasis y no disponen de panel frontal por lo que van siempre ligados a una aplicación software para la visualización y tratamiento de los datos capturados. En la actualidad coexisten tres posibles configuraciones: GPIB-VXI, MXI, VXI con procesador en chasis. La comunicación serie incorpora facilidades de comunicación para ser unidos a un computador a través de un puerto serie, típicamente a través de interfaces RS-232 mediante autómatas programables, visualizadores y controladores autónomos.

Finalmente, los buses de campo, que son arquitecturas de control distribuido de forma que el computador queda conectado tanto a los controladores de planta como a los sensores y accionamientos y otros periféricos con capacidad de comunicación. Estos buses suponen la evolución directa de los dispositivos autónomos comentados anteriormente. Se trata de aprovechar

una línea de transmisión serie para interconectar los dispositivos de planta bajo una arquitectura maestro/esclavo. La interconexión con el computador a nivel físico se realiza, por lo habitual, con una línea de datos semidúplex (RS-485) con interfaz de comunicación microprocesado y protocolo propio de cada bus.

Este procedimiento de conversión analógica a digital es por lo general transparente al usuario del sistema de monitorización, de la misma manera, que lo es la comunicación entre los instrumentos del sistema de adquisición y la aplicación de monitorización. Desde la perspectiva del entorno de monitorización, las variables de proceso se representan por etiquetas o tags que permiten la definición de cada variable en cuanto a su naturaleza continua (analógica) o discreta (binaria), la asociación de un nombre, el rango de valores a tomar y otras propiedades de utilidad para la monitorización como son alarmas, su registro, etc. La organización de todas las variables (adquiridas e internas) del sistema en bases de datos permite un mejor aprovechamiento posterior de éstas.

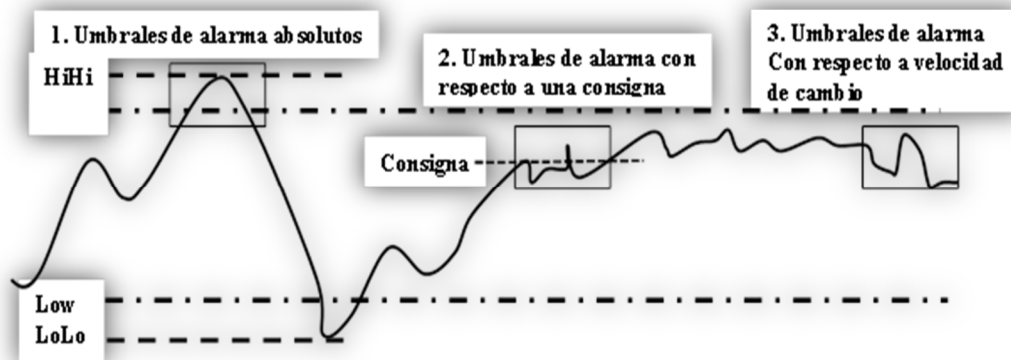
1.4.2 La protección automática de procesos

Con la monitorización, las variables medidas son verificadas para observar si guardan las tolerancias, si no, son generadas las alarmas, para posteriormente tomar las acciones apropiadas por parte del operador. El objetivo de las alarmas es poner al operador sobre aviso de esta forma, una vez generada una alarma, se data, visualiza y registra. La automatización de la tarea de vigilancia del proceso se logra en los entornos de monitorización mediante estas alarmas, registrando los instantes en que alguna magnitud alcanza un valor anormal.

Una clasificación simple de los diferentes tipos de alarmas se obtiene de considerar las variables sobre las que se definen. Así se puede diferenciar entre alarmas discretas (variables discretas) y alarmas sobre variables continuas o de umbral. Las alarmas discretas son indicadores de un cambio binario en el estado de la variable que representan. Una variable discreta puede ser utilizada para definir el estado de un sistema (paro/marcha, manual/automático), la presencia o ausencia de material, un final de carrera, la detección de paso, etc. Esta información es de gran utilidad para la secuenciación de tareas en el desarrollo de sistemas de automatización. Pero a su vez puede utilizarse para alertar al operador en caso de ser necesario utilizando para ello las señales directas de sensores tipo todo/nada u otras de propósito específico.

En el caso de variables continuas (reales) se utilizan umbrales numéricos para designar los límites de operación normal de dicha variable. Su elección se hará de acuerdo con el significado físico de la variable y los límites considerados permitidos para el funcionamiento correcto del proceso. Los sistemas de monitorización actuales incorporan diferentes formas de definir los umbrales de operación ([figura 1.6](#)).

Figura 1.6. Umbrales de alarma

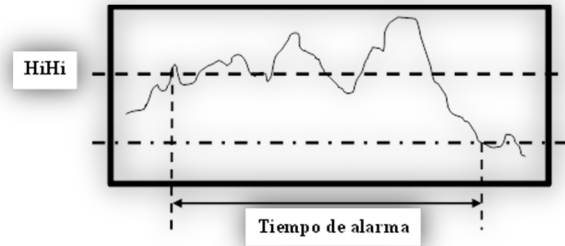


Fuente: adaptado de Colomer y Meléndez, 2003.

Es habitual dar dichos umbrales como un porcentaje respecto a un valor y especificar diferentes límites para el cruce de umbral ascendente (situación de alarma) o descendente (restablecimiento de situación normal) en forma de banda muerta. Entre las formas de definición de umbrales de operación más útiles y extendidas, en los paquetes de monitorización comerciales; se destacan las tres siguientes:

- ✓ **Umbrales de alarma absolutos:** vienen dados por un valor numérico cuyo sobrepaso activa la alarma. Pueden darse tanto en sentido ascendente (superior) como descendente (inferior) y la especificación de diferentes niveles da lugar a diferentes niveles de alerta en la activación de alarmas. Los límites superiores normalmente se especifican como High y HiHi (en caso de haber dos niveles de alarma), mientras que para los inferiores es habitual el etiquetado Low y LoLo. Es habitual especificar una banda muerta en forma de tanto por ciento del valor umbral para evitar la activación y desactivación continuada de alarmas. De esta forma una vez superado el umbral deberá bajarse a una zona de mayor seguridad (normalidad) para que la alarma quede desactivada ([figura 1.7](#)).

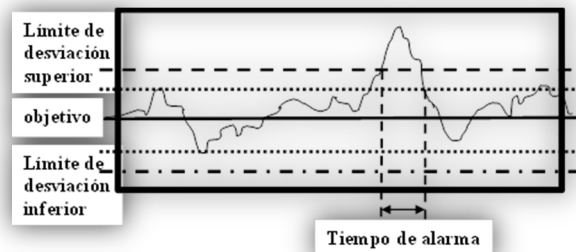
Figura 1.7. Activación de alarma por superación de umbral absoluto



Fuente: Adaptado de Colomer y Meléndez, 2003.

- ✓ **Umbrales de alarma relativos:** de forma similar a los umbrales absolutos, algunos sistemas permiten definir sus alarmas de acuerdo con límites establecidos alrededor de una consigna o valor objetivo (target). En este caso es habitual especificar dichos límites como porcentaje respecto al valor target, admitiendo valores asimétricos para éstos. De igual forma que en los umbrales absolutos se considera una banda muerta (en porcentaje) para la activación y desactivación de alarmas por cruce de umbrales ([figura 1.8](#)).

Figura 1.8. Activación de alarma por superación de umbral absoluto

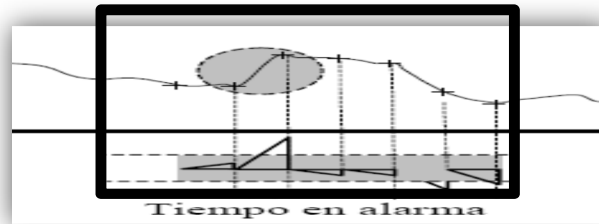


Fuente: adaptado de Colomer y Meléndez, 2003.

- ✓ **Umbrales de alarma por velocidad de cambio:** otra forma habitual de especificar la activación de alarmas es por observación de la variación de la variable en lugar del valor absoluto o la distancia respecto a un valor deseado. En este caso la diferencia entre dos valores adquiridos consecutivamente permite estimar la velocidad de cambio (ROC, Ratio of Change) de la variable. Especificando un límite o umbral para esta nueva magnitud se establecen nuevas situaciones de alarma. Este sistema es muy útil cuando se conoce la dinámica del proceso permitiendo diferenciar cambios en una magnitud debidos a la evolución correcta del proceso de los provocados por circunstancias ajenas. Por ejemplo el enfriamiento de un horno, la utilización de un umbral ROC permite detectar situaciones de

ventilación forzada producidas por la apertura de una puerta por ejemplo ([figura 1.9](#)).

Figura 1.9. Activación de alarma por velocidad de cambio



Fuente: adaptado de Colomer y Meléndez, 2003.

Las alarmas constituyen dentro de los sistemas de monitorización el mecanismo de aviso y alerta más eficaz, permitiendo asociar los valores de las variables registradas con anterioridad con la aparición de una alarma en un instante concreto. Aún, existiendo el concepto de alarma asociado a las variables, la gráfica de su historia permite al operador anticipar algunas situaciones. La observación de la evolución que dichas gráficas experimentan y su comparación con experiencias previas o con otras variables relacionadas permiten al operador de planta establecer conjeturas que se verificarán, o no, a medida que el proceso evoluciona y la gráfica se actualiza. El operador de esta forma observa la tendencia del proceso a través de las gráficas, permitiendo la visualización a diferentes escalas temporales y sobreponiendo la evolución de varias variables en la misma gráfica.

Por su parte, las bases de datos relacionales cuentan con un lenguaje propio, en el entorno industrial el SQL es de facto el estándar y ha sido adoptado por la mayoría de fabricantes y proveedores de software industrial. Sin embargo, si se excede el umbral promedio hacia un estado de peligro, para el proceso, la función de monitorización, automáticamente, inicia una acción contra restante apropiada. Usualmente, el proceso es entonces conducido a un estado seguro, el cual es frecuentemente un paro de emergencia. [La tabla 1.1](#), muestra algunos ejemplos de protecciones automáticas comunes.

Los métodos clásicos de monitorización y protección automática son aconsejables en los sistemas de supervisión. Para determinar las tolerancias deben hacerse compromisos entre el tamaño de la detección para las desviaciones anormales y no medibles o alarmas indebidas por las fluctuaciones normales de las variables. Frecuentemente, se aplica la verificación de límites con umbrales fijos el cual trabaja bien si el proceso se encuentra en estado estable o cuando la variable monitoreada cambia dinámicamente con otros puntos de operación, como las fuerzas en trenes de

laminación, o máquinas herramienta o presiones y temperaturas en procesos químicos por lotes. Las ventajas de los métodos clásicos de supervisión que utilizan el valor límite son su simplicidad y fiabilidad en situaciones de estado estable. Sin embargo, solo están habilitados para reaccionar después de un cambio relativamente grande en sus condiciones de proceso, por ejemplo, después de una falla repentina o una falla duradera que se incrementa gradualmente. Además, no es posible hacer un diagnóstico con profundidad.

Tabla 1.1. Ejemplos de protecciones automáticas

Proceso	Falla	Acción contrarrestante (estado seguro)	Instrumento de protección
Cable eléctrico	Corto circuito	Interrupción de corriente	Fusible eléctrico
Motor eléctrico	Sobrecalentamiento	Interrupción de corriente	Protector de temperatura
Turbina de vapor	Sobrevelocidad	Cierre rápido de válvula	Protector de sobrevelocidad
Caldera	Sobrecalentamiento	Interrupción del suministro de combustible	Interruptor de temperatura segura
Motor de combustión de aeronave	Ruptura de unión flexible	Máxima potencia	Muelle de estrangulamiento
Motor de automóvil	Ruptura de unión flexible	Máxima potencia)	Muelle de estrangulamiento

Fuente: traducido y adaptado de Iserman, 2011.

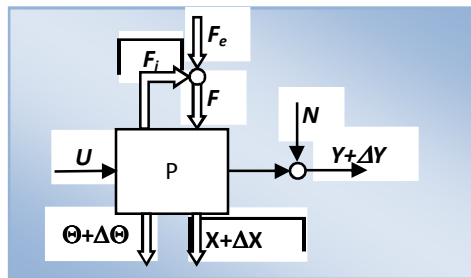
1.4.3 La detección de fallas en procesos

Se entiende por falla todo cambio en el comportamiento de alguno de los componentes del sistema (desviación no permitida de alguna de sus propiedades o parámetros característicos) de manera que éste ya no puede satisfacer la función para la cual ha sido diseñado (Blanke, 2000). El malfuncionamiento de los sistemas, además puede provocar pérdidas económicas, peligro para los operadores, inconvenientes para los usuarios, etc. Si bien la automatización de los mismos, mediante lazos de control automático ha permitido liberar a los operadores humanos de su control y operación manual, no ha logrado exonerarlos de su responsabilidad frente a las fallas.

De acuerdo con el esquema de la [figura 1.10](#), P es un proceso en lazo abierto, $U(t)$ e $Y(t)$ son las

señales de entrada y salida respectivamente, una falla puede aparecer debido a causas internas F_i y causas externas F_e . Ejemplos de causas externas son la influencia de la humedad, el polvo, los productos químicos, la radiación electromagnética, las altas temperaturas, la corrosión, la polución, etc., y ejemplos de causas internas son pérdida de lubricación y por tanto incremento en la fricción, sobrecalentamiento, fugas, cortocircuitos, etc. Estas fallas afectan como primera medida los parámetros internos del proceso Θ por cambios en resistencias, capacitancias o inertancias $\Delta\Theta(t)$ y/o como segunda medida las variables internas $x(t)$ por cambios en potenciales, flujos o cargas $\Delta x(t)$, las cuales frecuentemente no son medibles. De acuerdo con el comportamiento dinámico del proceso, las fallas influyen en las salidas de $Y(t)$ a $\Delta Y(t)$. Sin embargo, hay que tener en cuenta, que las perturbaciones naturales del proceso, el ruido $N(t)$ y los cambios en la variable manipulada $U(t)$ también influyen $Y(t)$. Las fallas restantes $f(t)$ generalmente son el resultado de la operación del proceso en lazo abierto en permanente desviación.

Figura 1.10. Esquema de un proceso en lazo abierto influenciado por fallas



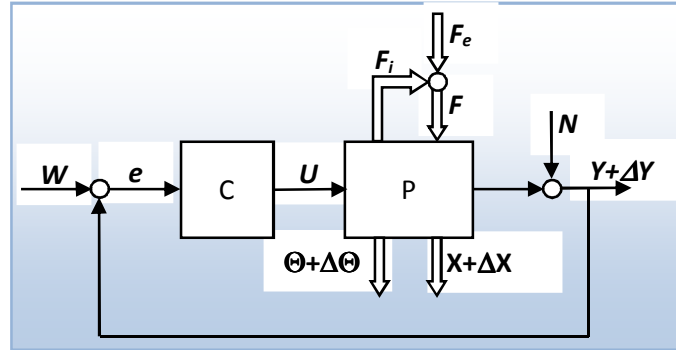
Fuente: Isermann, 2011.

Para la operación en de lazo cerrado, el comportamiento es diferente ([figura 1.11](#)). Dependiendo del tiempo histórico y del cambio en los parámetros $\Delta\Theta(t)$ o cambio en las variables de estado $\Delta x(t)$ las salidas muestran una pequeña pérdida de la desviación $\Delta Y(t)$ si se utiliza un controlador con parte integral. Pero las variables manipuladas $\Delta U(t)$ muestran una permanente compensación para procesos que actúan proporcionalmente. Si solamente se supervisa la salida $Y(t)$, la falla puede no ser detectada por la pequeña y corta desviación además dañada por el ruido.

La razón es que un lazo cerrado no es capaz de compensar las perturbaciones $N(t)$ únicamente, sino también de compensar el cambio en los parámetros $\Delta\Theta(t)$ y el cambio en los estados $\Delta x(t)$, con respecto a la variable de control $Y(t)$. Esto significa que las fallas pueden compensarse por el lazo cerrado. Únicamente, si las fallas crecen en tamaño y alcanzan una restricción (saturación), en el valor de la variable manipulada, puede surgir una desviación permanente ΔY . por lo tanto, para

procesos en lazo cerrado, $U(t)$ puede monitorearse, así como $Y(t)$, lo que frecuentemente no se hace. En la mayoría de los casos, solo $Y(t)$ y la desviación de control $e(t)$ son supervisados.

Figura 1.11. Esquema de un proceso en lazo cerrado influenciado por fallas



Fuente: Isermann, 2011.

Dependiendo de cómo el conocimiento del proceso puede organizarse en forma de un modelo del proceso o por el contrario responde a una descripción de situaciones a partir de las señales, se distinguen entre:

1. **Detección basada en señales o síntomas:** Corresponden a métodos de clasificación (Kurzynski y Wozniak, 2009), estudios de reconocimiento de patrones (Mehnen y otros, 2009) y métodos estadísticos (Fouzi y otros, 2013). Entre éstos se encuentran las redes neuronales artificiales (ANN's), análisis de componentes principales (PCA) y análisis de tendencias cualitativas (QTA). en este caso las fallas no se detectan por comparación con un modelo de funcionamiento normal, sino directamente a partir de las señales procedentes del proceso, después del procesamiento correspondiente de las mismas.

Las ANN's, son apropiadas para el diagnóstico de fallas, mediante el entrenamiento con datos de aprendizaje. Existen tres formas diferentes de utilizar redes neuronales para las tareas de detección y diagnóstico de fallas, aplicándolas a procesos no lineales. El primer método consiste en utilizar las redes neuronales para identificar un modelo no lineal de la planta a partir de los datos de entrada y salida, después dicho modelo es utilizado para la generación de residuos. Los residuos, son las diferencias resultantes de realizar una comparación en línea, entre las variables de salida del proceso y las variables de salida de un modelo computacional del mismo. La segunda aproximación consiste en utilizar las redes neuronales como un clasificador de información, y la tercera técnica consiste en estudiar el contenido en frecuencias de una señal representativa del proceso, que tiene

información tanto de las fallas como de las perturbaciones y del ruido que afectan al proceso (Castillo, 2005); (Talebi y Khorasani, 2013).

2. ***Detección basada en modelos***: Un segundo grupo de métodos corresponde a técnicas que requieren un conocimiento más detallado acerca del proceso. En este grupo se incluyen los métodos basados en modelos y los sistemas de inferencia. las fallas son detectadas a partir de la comparación del funcionamiento del sistema supervisado, con el modelo que representa el funcionamiento normal.

Entre los métodos más representativos de este grupo están: los métodos basados en observadores (OBM), los métodos basados en supuestos (ABM), los métodos de grafos señalizados dirigidos (SDG) y los métodos basados en reglas (RB) como sistemas expertos con lógica difusa. Algunos sistemas presentan dificultad en su implementación y requieren un gran trabajo para su mantenimiento, pero sus estructuras son transparentes.

Los OBM son una de las técnicas sobre el residuo más conocidas, que consta de dos pasos: la generación del residuo y el proceso de decisión para identificar la causa. Los ABM atribuyen el residuo a la violación de ciertas condiciones con respecto al comportamiento normal del sistema, mediante un algoritmo llamado módulo de diagnóstico. El algoritmo utiliza la representación del modelo de la planta para llevarlo a la condición de falla más adecuada. Los SDG son una representación de la información causal, similar a los árboles de falla, los cuales constituyen otra estrategia. Las variables del proceso son representadas por nodos en los grafos y las relaciones causales por arcos dirigidos. Los RB están formados por antecedentes (serie de eventos) y consecuentes (pronóstico de acciones), las cuales mapean estos eventos hacia una falla conocida. Hoy existe un avance importante en el uso de la lógica en los métodos basados en reglas, que utilizan herramientas de ingeniería de confiabilidad y simuladores cualitativos para explicar el diagnóstico.

1.4.4 El diagnóstico de fallas en procesos

Para mejorar la supervisión de procesos, un primer paso sería implementar sensores adicionales a las fallas esperadas y un computador con el conocimiento del operador. Sin embargo, el uso de sensores adicionales, cables, transmisores, conectores para obtener información de fallas no solo aumenta los costos, sino que al mismo tiempo disminuye la confiabilidad del equipo, debido al

incremento de fallas. Además, la implementación directa de software con conocimiento del operador no es una tarea fácil y no se llega lejos sin la existencia de modelos de procesos basados en la realidad.

Para procesos a gran escala con exceso de monitorización de verificación de valores límites, es otro problema: después de una severa falla del proceso o alarmas de avería severa que podrían desatarse en una corta secuencia de tiempo, conocida como exhibidor de alarmas. Los operadores entonces son sobrecargados con atención a su inmediata reacción y encontrar las causas del comportamiento no deseado. Por consiguiente, se necesitan métodos avanzados que satisfaga los siguientes requisitos:

- Detección temprana de pequeñas fallas con comportamientos en el tiempo abruptos o incipientes.
- Detección de fallas en lazos cerrados.
- Diagnóstico de fallas en los accionamientos, sensores y otros componentes del proceso.
- Supervisión del proceso en estados transitorios.

El objetivo de la detección temprana de fallas y diagnóstico es contar con tiempo suficiente para contrarrestar con otras operaciones, como reconfiguración, mantenimientos planeados o reparaciones.

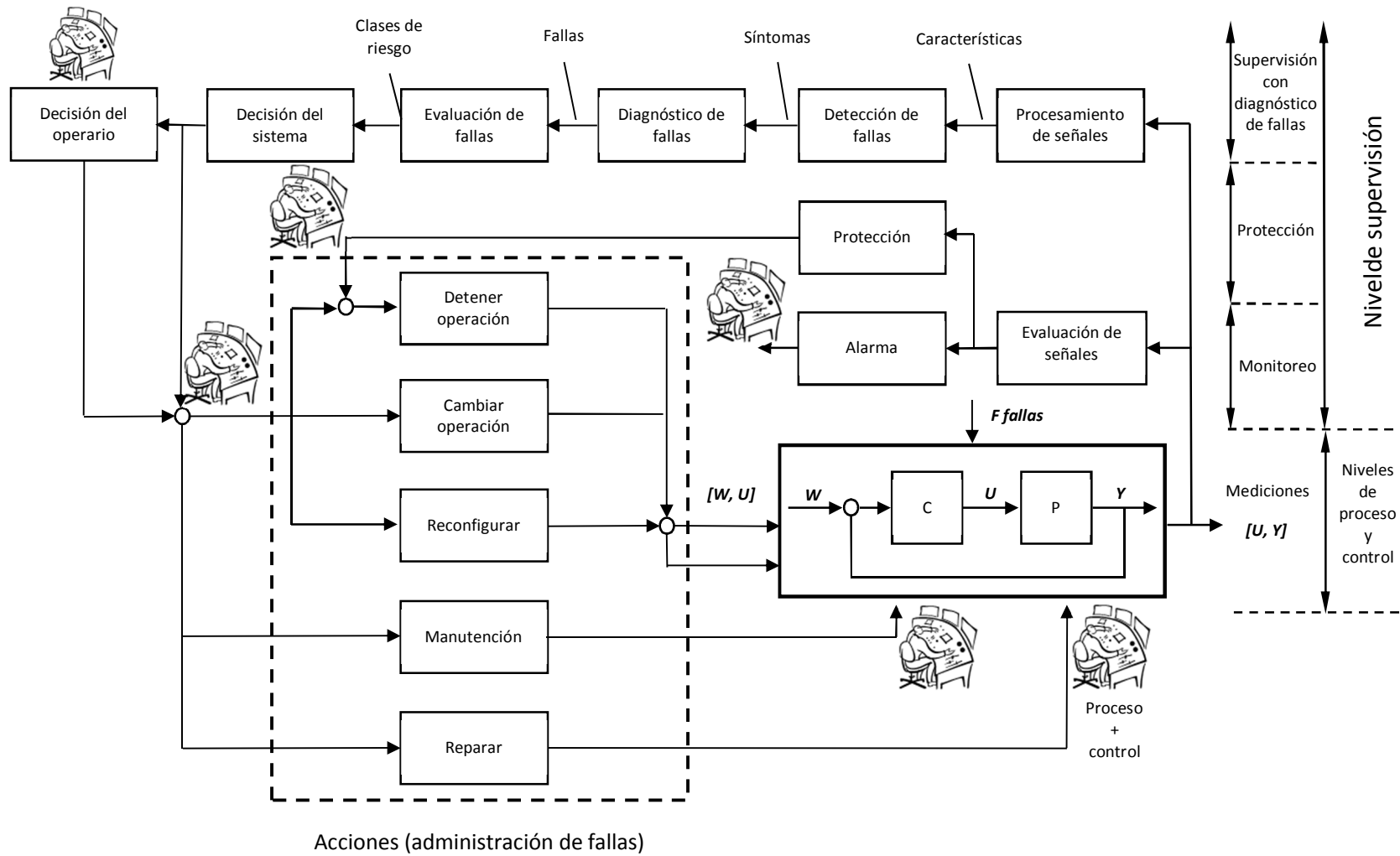
El esquema de la [figura 1.12](#) muestra cómo, adicional a los clásicos monitorización y protección automática, a partir de la información disponible del proceso en forma de modelo matemático, se puede alcanzar el objetivo de un sistema de supervisión de manera automatizada. Si no solo las señales de salida $Y(t)$, las correspondientes señales de entrada $U(t)$, algunas variables de estado disponibles $x(t)$ y posiblemente señales de perturbación, entonces los cambios del comportamiento estático o dinámico del proceso debido a las fallas puede utilizarse como una fuente importante de información. Entonces los cambios en las señales de salida $\Delta Y(t)$ los cuales no son causados por las fallas pero por señales de entrada $\Delta U(t)$ o medición de perturbaciones son automáticamente tomadas en cuenta para hacer una comparación de las variables más sensibles a las fallas. Esto significa que los efectos sobre las salidas $Y(t)$ por su perturbación normal o por fallas son separadas automáticamente. El esquema muestra en un tercer nivel las siguientes tareas:

- a) Registrar la evolución del proceso y detectar desviaciones indeseadas en las variables

(generación de las características por procesamiento de señales, estimación de estados, identificación o estimación de parámetros o relaciones de paridad).

- b) Analizar estas desviaciones y deducir el motivo (detección de fallas y generación de síntomas)
- c) Elaborar un diagnóstico de la situación para determinar la clase, el tamaño y la localización de las fallas (utilizando síntomas analíticos o por medios heurísticos y su relación con las fallas, p. e. métodos de clasificación o métodos de razonamiento vía árboles de fallas).
- d) Evaluación de las fallas de acuerdo a las diferentes clases de riesgo.
- e) Tomar las medidas adecuadas (decisiones y acciones) dependiendo de la clase de riesgo y posible grado de peligro. Esto puede realizarse automáticamente o por el operador para que no vuelva a suceder una situación indeseada.

Figura 1.12. Esquema general de diferentes métodos de supervisión con administración de fallas (lazo de supervisión)



Fuente: adaptado y traducido de Isermann, 2011.

1.4.5 La supervisión y la administración de fallas

Con la información acerca de la condición del proceso, otras tareas son necesarias para mejorar la seguridad y confiabilidad, mediante las siguientes acciones:

- a) Operación segura: por ejemplo la desactivación, si existe peligro inminente para el proceso o el ambiente.
 - b) Operación confiable: por la dificultad de una expansión de fallas a través de cambios del estado de operación, operación con baja carga, velocidad, presión, temperatura, etc.
 - c) Reconfiguración: por la utilización de otros sensores, accionamientos y componentes redundantes para mantener el proceso en operación y bajo control con una estructura reconfigurada.
 - d) Inspección: para realizar diagnósticos detallados mediante mediciones adicionales.
 - e) Mantenimiento: inmediato o posterior para sintonizar los parámetros del proceso o cambio de partes desgastadas.
- Reparación: inmediato para remover una falla o posterior (completa o revisión).

2. LA ERGONOMÍA COGNITIVA EN LA INTERACCIÓN HUMANO-MÁQUINA

Según la Asociación Internacional de Ergonomía o IEA por sus siglas en inglés, la ergonomía es la disciplina científica que se ocupa de comprender la interacción entre los seres humanos y los demás elementos de un sistema. Como profesión, la ergonomía aplica teorías, principios, datos y métodos al diseño para optimizar el bienestar humano y la ejecución global de un sistema, siendo los ergónomos los encargados del diseño y evaluación de tareas, trabajos, productos, ambientes y sistemas para hacerlos compatibles con las necesidades, habilidades y limitaciones de las personas. Existen tres grandes dominios de especialización de la ergonomía actual que son objeto de estudio de la interacción entre el ser humano y el sistema:

- **Ergonomía social u organizacional:** se ocupa de la optimización de los sistemas de trabajo, incluyendo las estructuras, las políticas y los procesos organizacionales. Los ergónomos sociales trabajan en el diseño de los sistemas de comunicación, los grupos de trabajo, los tiempos y turnos de trabajo en una empresa, etc.
- **Ergonomía física:** se ocupa de hacer compatibles las características anatómicas, antropométricas, fisiológicas y biomecánicas con los parámetros estáticos y dinámicos del trabajo físico. Entre sus temas de interés están, por ejemplo: las posturas físicas que las personas adoptan cuando están trabajando, los problemas asociados a la manipulación de cargas físicas o los problemas músculo-esqueléticos asociados al trabajo físico.
- **Ergonomía cognitiva:** se ocupa de los procesos mentales como: la percepción, la memoria, el razonamiento y respuesta motora, que afectan las interacciones entre los seres humanos y otros elementos de un sistema. Los temas relevantes incluyen carga mental del trabajo, la toma de decisiones, el aprendizaje de habilidades, los errores humanos, el estrés laboral, la interacción persona-computador (IPC) y la interacción humano-máquina.

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La disciplina de la Ergonomía Cognitiva (EC) o Ingeniería Cognitiva (IC) surgió hacia los años 70's con la llegada del computador y los nuevos desarrollos en el campo de la psicología cognitiva y la inteligencia artificial. La IC se concibió como una ciencia cognitiva aplicada, donde se combinan el conocimiento de la ciencia cognitiva con el de la ingeniería para solucionar problemas

de diseño. Por lo tanto, la propuesta de Norman se entendió como el establecimiento de la IC como una disciplina independiente, aunque relacionada con la ciencia cognitiva, que sería su disciplina básica (Endsley y otros, 2007). Sus objetivos son:

1. Comprender los principios fundamentales de las acciones humanas que son relevantes para el desarrollo de los principios de la ingeniería del diseño.
2. Construir sistemas que sean agradables en su uso.

Como disciplina científica, estudia los procesos cognitivos en el lugar de trabajo, especialmente en el diseño de dispositivos tecnológicos, la organización y los entornos de aprendizaje, por ende, se analiza el trabajo humano en términos de representaciones y procesos cognitivos, y se contribuye al diseño del lugar de trabajo para extraer y apoyar un procesamiento cognitivo fiable, efectivo y satisfactorio (Norman y Draper, 1986; Boy, 2013), que aporta elementos para la Tesis en el diseño de Sistemas Humano-Máquina, particularmente Interfaces Humano-Máquina o IHM.

Los modelos cognitivos que se han propuesto para explicar la interacción entre una persona y un artefacto han seguido, en general, el esquema de procesamiento de información tal como hoy se entiende en la psicología cognitiva. La investigación en estos niveles se ha sustentado en los avances realizados en psicología cognitiva. En los últimos 30 años, el estudio de los procesos cognitivos humanos ha proporcionado teorías explicativas y datos empíricos que permiten conocer cómo las personas sienten, perciben, almacenan información, y por otra parte, cómo la utilizan para tomar decisiones.

Sin embargo, ha existido un cambio paradigmático hacia el concepto de Sistema Cognitivo Conjunto, que supone un replanteamiento de la definición de la ergonomía cognitiva entendida como la ciencia del diseño. El diseño cognitivo trata de los problemas relacionados con el diseño de ambientes de trabajo cognitivo efectivo y las herramientas con las que se realiza ese trabajo. El trabajo cognitivo es llevado a cabo por los sistemas cognitivos que utilizan conocimiento para producir cambios en el ambiente o dominios de trabajo. Los dominios están organizados en torno a objetivos específicos e incluyen posibilidades y limitaciones. Por tanto, el objeto de la ergonomía cognitiva se formula en torno a los conceptos de trabajo cognitivo y herramienta cognitiva o artefacto (Hollnagel y Woods, 2006).

Un artefacto es cualquier objeto manufacturado por el hombre con la finalidad de aumentar

cualquier aspecto de la conducta u operación mental humana. El ser humano ha creado a lo largo de la historia muchos artefactos. Sin embargo se llaman cognitivos aquellos artefactos que mantienen, presentan y operan sobre la información para cumplir una función representacional y que afectan la actividad cognitiva humana (Norman, 2007).

La diferencia fundamental entre el ser humano y el artefacto, considerados ambos como sistemas cognitivos, es que el artefacto es diseñado por el ser humano, mientras que el humano se modifica y se adapta por el proceso de aprendizaje. En segundo lugar, se considera que la conducta humana está modelada por el contexto socio técnico en el que ocurre y no sólo por las particularidades del sistema interno de procesamiento de la información humana. Esta idea ha sido desarrollada fundamentalmente en una de las áreas de aplicación más activas de la ergonomía moderna, el diseño de los sistemas de supervisión de procesos.

La inoperancia de este enfoque tradicional puede verse cuando se aborda el tema de la automatización de la conducta humana dentro de los sistemas de supervisión. Los modelos pensados para el diseño de los artefactos desde este enfoque sólo requieren una descripción de las funciones del sistema cognitivo humano que son propensas a la falla y deben ser sustituidas por los artefactos. Sin embargo, la experiencia demuestra que el funcionamiento de un sistema cognitivo no puede ser considerado como el resultado de la suma de sus componentes. La salida del sistema depende del funcionamiento conjunto de sus componentes.

Al considerarse al artefacto como un agente cognitivo que debe ser modelado al mismo nivel que el ser humano dentro del sistema cognitivo conjunto, la interacción entre los seres humanos y los artefactos se convierte en el fenómeno de estudio propiamente dicho de la ergonomía cognitiva. La interacción es un proceso que incluye los siguientes componentes y estados:

1. El conjunto de estímulos pertenecientes al ambiente que constituyen la entrada externa a los procesos cognitivos de la persona.
2. Los procesos perceptuales convierten esta entrada externa en una representación interna para ser usada por otros procesos cognitivos.
3. El resultado del procesamiento cognitivo es una salida externa que actúa sobre el ambiente.
4. La salida externa de la persona (su conducta) modifica el ambiente, el cual tiene su propia dinámica interna que lo hace cambiar por sí mismo.

Entonces, los temas de interés para la ergonomía cognitiva en este nivel tienen que ver más con el análisis que con el diseño. Los métodos y los conceptos de la ergonomía cognitiva podrían ayudar a los participantes a reflexionar sobre sus prácticas y permitirles escoger las soluciones que favorecen sus metas y valores propios. Por ejemplo, algunos problemas pueden resolverse con una acción social pura, mientras que otros problemas podrían ser solucionados técnicamente. Este marco de referencia, ofrece tres o cuatro niveles donde la ergonomía cognitiva puede ofrecer explicaciones muy pertinentes. Aunque los niveles se traslapan, algunos artefactos pueden ser considerados en un solo nivel. Un análisis en un nivel más alto no excluye problemas en otro diferente. Es obvio que las soluciones al nivel organizacional no sirven para resolver los problemas perceptuales y viceversa. Así, un alcance más amplio requerirá considerar también otros niveles.

2.2 EL SISTEMA COGNITIVO CONJUNTO

Existe un cambio paradigmático hacia el concepto de sistema cognitivo conjunto (SCC), que supone un replanteamiento de la definición de la ergonomía cognitiva entendida como la ciencia del diseño. El diseño cognitivo trata de los problemas relacionados con el diseño de ambientes de trabajo cognitivo efectivo y las herramientas con las que se realiza ese trabajo. Este trabajo es llevado a cabo por los sistemas cognitivos que utilizan conocimiento para producir cambios en el ambiente o dominios de trabajo. Los dominios están organizados en torno a objetivos específicos e incluyen posibilidades y limitaciones. Por tanto, el objeto de la ergonomía cognitiva se formula en torno a los conceptos de trabajo cognitivo y la herramienta cognitiva o artefacto (Hollnagel y Woods, 2006). Mediante la [figura 2.1](#) se explicará cada uno de los componentes del sistema cognitivo conjunto:

Figura 2.1. Sistema cognitivo conjunto



Fuente: propia

2.2.1 El artefacto

Los artefactos son fabricados por el hombre con el objeto de modificar aspectos de su conducta o proceso mental. El ser humano ha creado a lo largo de la historia muchos artefactos. Sin embargo se llaman cognitivos aquellos artefactos que mantienen, presentan y operan sobre la información para cumplir una función representacional y que afectan la actividad cognitiva humana (Norman, 2007). Un artefacto puede ser un objeto físico (un martillo) o un ente abstracto (un programa de computador) o un objeto que representa a un objeto físico (un dibujo de una máquina). Los artefactos han sido creados para actuar sobre el ambiente, modificando algún aspecto, o para obtener la información que nos permita conocer sus características y cómo nuestras acciones lo modifican.

La diferencia fundamental entre el ser humano y el artefacto, considerados ambos como sistemas cognitivos, es que en primer lugar, el artefacto es diseñado por el ser humano, mientras que el humano se modifica y se adapta al artefacto por el proceso de aprendizaje. En segundo lugar, se considera que la conducta humana está modelada por el contexto socio técnico en el que ocurre y no sólo por las particularidades del sistema interno de procesamiento de la información humana. Esta idea puede desarrollarse en un área de aplicación activa, el diseño de los sistemas de supervisión de procesos.

Es necesario distinguir entre artefactos cognitivos y artefactos no cognitivos. Los artefactos cognitivos son aquellos que mantienen, presentan y operan sobre la información para cumplir una función representacional que afectan a la actividad cognitiva humana. Muchos artefactos son representaciones del ambiente y de los objetos sobre los que la conducta humana tiene efecto. Por ejemplo, una pantalla de computador en un panel de control en una planta industrial presenta una figura de lo que está ocurriendo en algún componente de la cadena de producción sobre el que las acciones del operador pueden tener efecto (Norman, 1991). La característica fundamental de los artefactos, es la incidencia que éstos tienen sobre la naturaleza de la tarea. Existen artefactos que aunque aumentan las capacidades humanas no modifican las características de la tarea que se realiza con ellos.

2.2.2 La tarea

En la historia de la humanidad, los artefactos fueron pensados para realizar tareas que

previamente no eran posibles o para mejorar la manera en la que una tarea se estaba realizando. Por lo tanto, lo que determina la necesidad de un nuevo artefacto son los requerimientos de las tareas. El término funcionalidad hace referencia a las tareas que son desempeñadas por el artefacto. Estas tareas pueden ser simples o complejas. Uno de los puntos de interés de la ergonomía cognitiva es descubrir y explicar qué funcionalidad debería incluirse en un artefacto. Igualmente, es importante tener en cuenta que la introducción de un nuevo artefacto cambia la naturaleza de la tarea que se está realizando.

Hay dos puntos de vista desde los que se puede considerar el papel de los artefactos en una tarea humana: el punto de vista del sistema y el punto de vista de la persona que realiza la tarea. El punto de vista del sistema es el que un observador externo tiene con relación a la persona que está realizando la tarea con el artefacto. Desde esta perspectiva se puede observar que el artefacto cambia la forma en la que la tarea es realizada, aumentando las capacidades cognitivas de la persona. Por el contrario, desde el punto de vista de la persona que realiza la tarea, el artefacto no aumenta sus capacidades cognitivas, por el contrario cambia la naturaleza de la tarea: la persona tiene que aprender cosas nuevas, olvidar cómo lo hacía antes y los conocimientos que necesitaba para ello, así como aprender la nueva información (Norman, 1991).

2.2.3 La actividad

Recientemente, en ergonomía cognitiva se evidencia una influencia creciente de la Teoría de la Actividad. Esta teoría desarrollada en la Unión Soviética (Leontyev, 1978; Vygotsky, 1978; Bedny, 2007) pone un especial énfasis en los aspectos socioculturales del pensamiento humano y los objetivos que el ser humano tiene para desarrollar una tarea. En primer lugar, es necesario considerar que una persona durante la interacción con los elementos del sistema de trabajo lleva a cabo acciones que se pueden definir como actos conscientes que la persona realiza para conseguir un objetivo. Para llevar a cabo estas acciones la persona realiza operaciones que no requieren atención consciente, pero, las acciones si son planificadas conscientemente para formar lo que se llama la actividad de la persona.

2.2.4 La situación

La tarea se realiza dentro de una situación o contexto. Muchas veces la misma tarea puede realizarse de forma diferente dependiendo del contexto o situación. Es necesario distinguir dos tipos

de situaciones, las situaciones estáticas y las situaciones dinámicas. Una situación estática es aquella en la que los componentes del sistema de trabajo cambian, responden o se modifican como consecuencia de la conducta del ser humano. Por el contrario, una situación dinámica es aquella en la que los componentes del sistema de trabajo cambian independientemente de la conducta humana, aunque ésta puede indudablemente afectar a los cambios.

2.2.5 La interacción

La interacción es la comunicación entre el ser humano y los demás elementos del sistema de trabajo. Cuando se considera la interacción entre una persona y un artefacto, se debe tener en cuenta, tanto la funcionalidad del artefacto, como su interfaz. Existen tres posibles tipos de interacción:

1. Una persona quiere realizar unas tareas específicas con el artefacto. La interfaz debe ser diseñada con cuidado, considerando cuáles son las tareas que la persona quiere realizar. Los conceptos semánticos y formales de los objetos representados en la interfaz deben corresponder a las expectativas del usuario con respecto a una tarea específica. La interacción se restringe a un conjunto de objetos predeterminados y que son seleccionados para que se correspondan con los objetos que son relevantes para realizar la tarea.
2. Una persona quiere investigar lo que el artefacto puede ofrecerle, es decir, quiere explorar el artefacto. El diseño puede incluir elementos en la interfaz que no son inmediatamente obvios para el usuario. El usuario puede elegir entre considerar estos elementos y usar sólo los que son familiares y parecen ser suficientes para realizar la tarea. Sin embargo, muchos usuarios quieren, de hecho explorar la interfaz y a través de esta exploración encontrar nuevas funciones que pueden no ser esperadas. Este tipo de interacción es desde el punto de vista del usuario es exploratoria, mientras que desde el punto de vista del diseñador la interfaz es sugestiva y debe invitar a la exploración.
3. La persona quiere ordenarle que realice una serie de tareas sin tener que precisarle mucho las órdenes. Se encuentran situaciones donde la tarea del usuario está poco especificada y la interacción debe ser cooperativa. Cuando una persona utiliza uno de estos sistemas lo hace muchas veces sin saber qué es lo que busca exactamente y cuál es la información que el sistema tiene almacenada. De esta manera, la interacción es como una negociación, donde

el usuario comienza la búsqueda, el sistema ofrece sugerencias y el usuario basándose en ellas modifica la búsqueda.

2.2.6 La interfaz

De una forma simple, se puede decir que una interfaz es el medio a través del cual se comunican la persona y la máquina. La comunicación se establece en las dos direcciones. Por tanto, al hablar de una interfaz se incluye el medio por el cual la máquina presenta información a la persona y el medio por el cual la persona introduce información en la máquina. Cuando se habla de la interfaz se incluye todo lo que son las imágenes y textos presentes en pantallas o impresoras, así como sonidos producidos por altavoces, que se presentan en el medio de comunicación, y en general todas las formas en las que una persona puede introducir información.

Las interfaces han ido evolucionando a lo largo del tiempo con el objetivo que la comunicación entre la máquina y la persona se realice eficientemente, de nada vale diseñar un artefacto y hacer que funcione si la persona que debe usarlo no sabe cómo comunicarse con él.

2.2.7 La cognición

La cognición se refiere a la adquisición, mantenimiento y uso del conocimiento. Si el interés es estudiar el conocimiento que una persona tiene hablamos de cognición mental. Por otra parte, si lo que interesa es cómo varias personas comparten y comunican sus conocimientos se habla de cognición comunicativa. Finalmente, si lo que interesa es la transferencia de conocimiento entre una persona y un artefacto, se habla de cognición distribuida (Cañas, 2004).

La combinación de los términos cognición y ergonomía se hace para indicar que el objetivo es estudiar los aspectos cognitivos de la interacción entre las personas, el sistema de trabajo y los artefactos, con el objeto de diseñarlos para que la interacción sea eficaz. Los procesos cognitivos, como percepción, aprendizaje o solución de problemas que juegan un papel importante en la interacción son considerados para explicar tareas cognitivas, tales como la búsqueda de información y su interpretación, la toma de decisiones y la solución de problemas.

La automatización constituye uno de los objetivos fundamentales a los que debe enfrentarse un diseñador. Siempre que se diseña un sistema, hay que decidir qué funciones se dejan al operador

humano y qué funciones deben asignarse a los artefactos. Sin embargo, tanto los procesos cognitivos como los motivacionales (aburrimiento, estrés, etc.) actúan de manera diferente cuando al ser humano se le quitan funciones para asignárselas a los artefactos. Al considerar al artefacto como un agente cognitivo que debe ser modelado al mismo nivel que el ser humano dentro del sistema cognitivo conjunto, la interacción entre los seres humanos y los artefactos se convierte en el fenómeno de estudio propiamente dicho de la ergonomía cognitiva ([figura 2.2](#)).

Figura 2.2. Interacción humano-artefacto en el sistema cognitivo conjunto



Fuente: propia

2.3 PROCESOS COGNITIVOS INVOLUCRADOS EN LA INTERACCIÓN

El modelo cognitivo general anteriormente mencionado ha guiado la investigación sobre los temas centrales que se han ido planteando durante el proceso del diseño de interfaces. A continuación se revisarán algunos de estos temas en relación a los procesos cognitivos implicados.

2.3.1 La sensación

También conocida como procesamiento sensorial, es la recepción de estímulos mediante los órganos sensoriales. Estos transforman las distintas manifestaciones de los estímulos importantes para los seres vivos de forma calórica, térmica, química o mecánica del medio ambiente en impulsos eléctricos y químicos para que viajen al sistema nervioso central o hasta el cerebro para

darle significación y organización a la información. Esto, dependiendo de la particular forma de procesamiento o percepción de cada ser vivo.

El proceso sensorio-perceptivo se puede dividir en varias etapas. En un primer momento un estímulo se presenta en el medio y los sentidos, dependiendo su modalidad, están adaptados para responder a tal estímulo, que podemos llamar estímulo distal. Los sentidos poseen unas neuronas especializadas que se encargan de activarse frente a un tipo de energía en especial. Estas neuronas receptivas toman información del estímulo y reproducen su esencia, esto es, elaboran un estímulo proximal que describe las cualidades del estímulo real y envían esa información a otras neuronas a modo de impulsos electroquímicos. Estas otras neuronas, conocidas como inter-neuronas, retransmiten la información al sistema nervioso central, para que este le dé sentido, la relacione con conocimientos previos y finalmente la reconozca.

En el instante en que la transmisión del estímulo pasa al sistema nervioso central para ser integrado se puede determinar la diferencia entre el proceso sensorial y el proceso perceptivo, puesto que el primero se limita a una recepción de estímulos físicos aislados simples del ambiente mientras que la percepción es una interpretación, significación y organización de esa información que brinda el proceso sensorial. Es decir, sentimos enrarecimientos del aire (ondas), pero percibimos sonidos; sentimos acciones mecánicas, pero percibimos caricias o golpes; sentimos gases volátiles, pero percibimos la fragancia de un perfume o el aroma del desayuno. De modo que nuestras percepciones no son registros directos del mundo que nos rodea, sino que se construyen internamente siguiendo reglas innatas y constricciones impuestas por las capacidades del sistema nervioso.

Colores, sonidos, olores y sabores son construcciones mentales creadas en el cerebro por el procesamiento sensorial. No existen como tales fuera del cerebro. Solo si existe un organismo capaz de procesar la información del exterior esta tendrá sentido. Nuestro cerebro crea el mundo en el que vivimos, y son la sensación y luego la percepción los procesos encargados de absorber la información del mundo externo, y también del interno para dar significado a las cosas. Por ejemplo, los colores no existen fuera del organismo, solo existen los distintas medidas del espectro de luz. Según la más reciente perspectiva no parece existir el tiempo, lo que se da es el cambio de las cosas, pero nuestro cerebro crea una línea temporal para permitirnos mover en un parámetro de continuidad entre unas acciones y otras (Goldstein, 2013).

Cuando se diseña una interfaz lo primero que se debe considerar es que los estímulos llegan al sistema cognitivo humano a través de los sentidos. Por ello, las características de los sistemas sensoriales humanos deben ser tenidas en cuenta en el diseño. Especialmente importante es considerar en cada sistema sensorial las características del procesamiento del estímulo físico y el almacenamiento del resultado de este procesamiento en unas memorias temporales que cada sistema tiene asociada. Hasta ahora los sistemas sensoriales que han interesado a los ergónomos han sido el visual, el auditivo, el propioceptivo y el kinestésico. La razón del interés en estos sistemas hay que buscarla en cómo los diseñadores de interfaces han utilizado estos canales sensoriales para presentar estímulos a la persona. Sin embargo, los nuevos desarrollos tecnológicos requerirán que se preste atención a otros canales sensoriales. Por ejemplo, el desarrollo de la realidad virtual permitirá (exigirá) presentar estímulos olfativos.

2.3.2 La percepción

Obedece a los estímulos cerebrales logrados a través de los 5 sentidos: vista, olfato, tacto, audición y gusto, los cuales dan una realidad física del entorno. Es la capacidad de recibir por medio de todos los sentidos, las imágenes, impresiones o sensaciones para conocer algo. También se puede definir como un proceso mediante el cual una persona, selecciona, organiza e interpreta los estímulos, para darle un significado a algo. Toda percepción incluye la búsqueda para obtener y procesar cualquier información.

La percepción es el primer proceso cognitivo, a través del cual los sujetos captan información del entorno, la razón de ésta información es que usa la que está implícita en las energías que llegan a los sistemas sensoriales y que permiten al individuo animal (incluyendo al humano) formar una representación de la realidad de su entorno.

El proceso de la percepción, es de carácter inferencial y constructivo, generando una representación interna de lo que sucede en el exterior al modo de hipótesis. Para ello se usa la información que llega a los receptores y se va analizando paulatinamente, así como información que viene de la memoria tanto empírica como genética y que ayuda a la interpretación y a la formación de la representación.

Mediante la percepción, la información recopilada por todos los sentidos se procesa, y se forma la idea de un sólo objeto. Es posible sentir distintas cualidades de un mismo objeto, y mediante la

percepción, unirlos, determinar de qué objeto provienen, y determinar a su vez que este es un único objeto. Percibir significa interpretar el estímulo. Actualmente la mayoría de los computadores personales tienen sistemas operativos donde el usuario dispone de interfaces gráficas con iconos, gráficos, etc. En el diseño se ha impuesto, en cierta medida, el concepto de interfaces de manipulación directa (Hutchins y otros, 1986). En este tipo de interfaces el usuario trabaja directamente con objetos que representan algo. Por ejemplo, una interfaz que presenta un icono para representar un fichero almacenado en el disco duro es una interfaz de manipulación directa. El usuario puede trabajar con el fichero (grabarlo, cambiarle de nombre, copiarlo, etc.) actuando directamente sobre el objeto, normalmente utilizando un artefacto de punteo (pointing device) como un ratón o un lápiz óptico.

Existen dos grandes metáforas de la interacción con interfaces. Con la metáfora de la conversación se considera la interfaz como un lenguaje con el que el usuario y el artefacto tienen una conversación sobre un dominio del mundo que no está representado directamente en la interfaz. Los sistemas operativos como el MSDOS responden a este tipo de metáfora. Existe un lenguaje por el cual el usuario le dice al artefacto lo que quiere que haga (v.g. COPY fichero.txt A:/) y la interfaz puede comunicarle al usuario el resultado de la operación que ha realizado (v.g. un fichero copiado). Cuando se usa este tipo de metáfora el usuario no actúa sobre los objetos con los que está trabajando. El fichero está almacenado en el disco y no es visible para el usuario (Hutchins y otros, 1986).

Las interfaces de manipulación directa se han impuesto porque tanto la intuición como la investigación psicológica han demostrado que el compromiso directo permite mayor eficacia en la interacción. Sin embargo, estas interfaces plantean problemas psicológicos interesantes derivados del hecho que los objetos que se presentan en la interfaz representan objetos reales, pero sin embargo, el objeto real y el objeto representado en la interfaz no son siempre iguales.

Sin embargo, lo más interesante es saber cuáles son las características de los íconos que los hacen superiores a las palabras. En el diseño de objetos en interfaces de manipulación directa se debería tener en cuenta la distancia articuladora entre el objeto real y el objeto representado (dibujo). En los lenguajes naturales, la distancia articuladora hace referencia a la relación entre la forma física de una expresión y el significado de dicha expresión. Por ejemplo, una onomatopeya tiene una distancia articuladora pequeña, porque la grafía y la fonética de la palabra son cercanas al significado. De la misma forma, cuando se diseñan iconos para representar objetos podemos hablar

de distancias articulatorias cortas y largas. Un icono que tenga una distancia articulatoria corta tendrá una forma muy cercana al significado del objeto que representa, mientras que un icono con una distancia articulatoria larga no tendrá ninguna relación entre la forma y el significado (Hutchins y otros, 1986).

El efecto de la organización y la localización de los iconos, se ha encontrado en numerosas ocasiones. La organización y la distancia semántica interactúan entre sí. Además parece existir una interacción con el nivel de experiencia de los usuarios. Los iconos que representan de forma directa los comandos de un procesador de textos sólo son superiores al texto en las primeras fases del aprendizaje.

2.3.3 La memoria

La información que es percibida se almacena en recuerdo para poder ser utilizada posteriormente. La tradición de la investigación sobre memoria en psicología cognitiva se postula que existen dos formas de almacenamiento, uno permanente y otro temporal. Al almacén temporal se le ha llamado memoria de corto plazo o memoria operativa. La diferencia entre los dos términos es más bien geográfica, en la tradición americana se le suele llamar memoria a corto plazo y en la tradición europea se le llama memoria operativa. La característica fundamental de este almacén es su limitación temporal y espacial. Cuando una unidad de información entra en la memoria operativa es almacenada allí y si no se hace nada con ella desaparece después de un intervalo de aproximadamente 20 segundos (Brown, 1959; Peterson y Peterson, 1959). Además, existe un límite en la cantidad de información que puede ser mantenida al mismo tiempo en la memoria operativa. Esta cantidad es de aproximadamente de 7 unidades de información, si en un momento determinado hay siete unidades y entra una nueva unidad, una de las que ya están almacenadas será desplazada. Por tanto, la información puede perderse por dos razones, por el paso del tiempo o por desplazamiento. El desplazamiento ocurre, sobre todo cuando se ejecutan tareas que requieren almacenar gran cantidad de información. La forma de evitar el olvido es el repaso mental (Rundus, 1971).

Dentro de los tipos de memoria que utilitarias para un sistema de interacción humano- máquina se deben tener en cuenta las siguientes:

- **Memoria operativa.** El modelo de memoria operativa más aceptado actualmente con

algunas modificaciones fue propuesto a mediados de los años setentas (Baddeley y Hitch, 1974). Según estos autores, la función de la memoria operativa es la de almacenar información temporalmente y procesarla para que pueda ser transferida posteriormente a la memoria de largo plazo. La memoria operativa está compuesta de dos sistemas esclavos, el lazo articulatorio y la agenda viso-espacial que mantienen información verbal y visual respectivamente. Estos sistemas son usados por un ejecutor central que procesa información dentro de cada sistema, transfiere la información de un sistema a otro e integra la información almacenada en ellos con la información almacenada en la memoria a largo plazo.

Algunos estudios han demostrado que, debido a las limitaciones en capacidad y procesamiento en memoria operativa, se cometen frecuentemente dos tipos de errores: (1) errores por pérdidas de información, cuando el usuario olvida la información sobre lo que debe hacer; (2) errores de elección, cuando el usuario elige una opción incorrecta (Huguenard y otros, 1997).

- **Memoria a largo plazo: procedimental y declarativa.** La memoria a largo plazo contiene la información permanente del sistema. La memoria a largo plazo declarativa que contiene la información sobre los hechos que conocemos y la memoria a largo plazo procedimental que contiene la información sobre cómo hacer algo (Anderson, 2000).

La característica fundamental de la información contenida en la memoria a largo plazo es que está organizada en estructuras. En la memoria declarativa la información está organizada en estructuras semánticas (ej. categorías, esquemas, guiones, etc.) entre las cuales, la más importante desde el punto de vista de la ergonomía cognitiva es el modelo mental. En la memoria procedimental la unidad organizativa es la regla de producción.

El concepto de regla de producción tiene su origen en la investigación de solución de problemas (Simon, 1996) sobre solución de problemas. Una regla de producción está compuesta por una condición y una acción, y tiene la forma: si condición, entonces acción. La condición es una unidad de información que puede estar presente en el ambiente o en la memoria operativa. La acción es una modificación que el sistema hace directamente en el ambiente o en los contenidos de la memoria operativa.

Por otro lado, la memoria declarativa está subdividida a su vez en *memoria semántica*, donde se

encuentra la información sin referencia a cuándo y dónde se ha adquirido, y la *memoria episódica* que contiene la información que puede ser recordada junto al momento y lugar de su adquisición.

Los investigadores han utilizado la distinción entre memoria semántica y memoria episódica para estudiar cómo los programadores reutilizan códigos de otros programas cuando están escribiendo uno nuevo. Es evidente que los programadores tienen conocimiento semántico sobre programación. Conocen gran cantidad de algoritmos que pueden ser utilizados en diferentes contextos, tienen conocimiento sobre cómo planificar estructuras de datos, conceptos ligados al lenguaje de programación que están utilizando, etc. Sin embargo, se sabe que utilizan conocimiento de cómo ellos resolvieron un problema similar en un programa anterior o recuerdan un programa que leyeron y en el que otro programador solucionó un problema parecido.

El conocimiento necesario para realizar la tarea de comprensión está compuesto de tres tipos de conocimiento:

1. **Conocimiento experto.** Es el conocimiento almacenado en memoria semántica que el programador tiene sobre conceptos de programación, el lenguaje en el que el programa está escrito, etcétera.
2. **Conocimiento externo.** Es el conocimiento que el programador adquiere de la información presentada en la pantalla. Este conocimiento es almacenado en la memoria operativa y transferido a la memoria episódica.
3. **Conocimiento situacional.** Es el conocimiento que el programador tiene sobre lo que ha hecho durante el tiempo que ha estado comprendiendo el programa. Este conocimiento está almacenado en memoria a largo plazo episódica.

Con este modelo, que combina el conocimiento almacenado en la memoria operativa con el conocimiento episódico y semántico, los autores simularon la conducta de la programadora mientras que navegaba a través de la pantalla para poder comprender lo que el programa hacía. Durante el aprendizaje la persona adquiere también conocimientos de las relaciones estructurales y el funcionamiento del sistema con el que está interactuando. Los investigadores han llamado a este conocimiento modelo mental del sistema (Moran, 1981; Gentner y Stevens, 1983). Un modelo mental de un sistema físico es un modelo del sistema que el usuario tiene y que incluye la representación de su estructura y su funcionamiento.

2.3.4 Las búsquedas de información

La mayoría de las interfaces de los programas de computador presentan menús de opciones y en su diseño la pregunta que más a menudo surge es cómo se puede organizar un menú para que la búsqueda sea más efectiva.

Cuando se trabaja con una interfaz que dispone de un menú de opciones, la operación más importante es la de buscar la palabra que representa la acción que se quiere realizar. Generalmente, un usuario experto sabe la palabra que está buscando y dónde se encuentra. Sin embargo, no siempre es así, especialmente cuando el usuario está aprendiendo a trabajar con el programa. Por ello, es importante saber cómo se realizan las tareas de búsqueda visuales para diseñar los menús de tal manera que se pueda optimizar la búsqueda en términos de errores y de tiempo de búsqueda. Para esto, es posible recurrir a la extensa investigación llevada a cabo en psicología cognitiva sobre las tareas de búsqueda.

Una cuestión interesante es saber cómo se pueden organizar las opciones en el menú para que la búsqueda sea más rápida, especialmente cuando se llevan a cabo búsquedas de equivalencia semántica, en principio son tres las formas en las que se pueden presentar las opciones de un menú: listas alfabéticas, listas aleatorias y organizadas por categorías. Las listas alfabéticas posibilitan una búsqueda más rápida que las aleatorias (Perlman, 1984), sin embargo, las listas alfabéticas son también mejores que las categorizadas (Card, 1982).

Intuitivamente, el tiempo de búsqueda dependerá, fundamentalmente, del número de ítems que tiene el menú. Investigaciones llevadas a cabo ha demostrado que el tiempo de búsqueda es una función lineal del número de ítems que hay en el menú. Sin embargo, cuando la palabra que se está buscando no está en el menú y es necesario realizar una comparación de equivalencia semántica, saber que existe una función lineal entre el número de ítems y el tiempo de búsqueda no es suficiente. En este caso es más importante saber cuál es la estrategia que el usuario utilizará para determinar cuándo el ítem buscado se ha encontrado y parar la búsqueda e iniciar la acción. Para investigar las estrategias de búsqueda que los usuarios utilizan se ha realizado una serie de investigaciones utilizando dos tipos de técnicas.

Otro grupo de investigadores ha registrado los movimientos oculares de los sujetos mientras que buscan el ítem en el menú. Con esta técnica se ha encontrado que la búsqueda sigue unos patrones

que son difíciles de predecir con un modelo simple de reconocimiento. Por ejemplo, los sujetos saltan de una parte de la pantalla a otra y no continúan buscando en el sitio donde se predice que el ítem estará. También ocurre que una vez encontrado el ítem buscado, continúan la búsqueda examinando uno o dos ítems más del menú (Paap y otros, 1987).

3. LA USABILIDAD Y SU EVALUACIÓN

Aunque el concepto de usabilidad es fácil de asimilar, conseguir que un producto sea usable es más difícil. En general, cuando se diseña un producto, más si se trata de un sistema basado en software, se está más preocupado de la funcionalidad que de la usabilidad del mismo. Los diseñadores asumen que si ellos y sus compañeros pueden utilizar el software y lo encuentran atractivo ya es suficiente. Además, prefieren evitar evaluar el producto con usuarios porque incrementa el tiempo de desarrollo, cuesta más dinero y sobretodo porque temen el trabajo adicional que puede suponer implementar los cambios derivados de la evaluación. Sólo se preocupan de probar la parte funcional del sistema.

Por otra parte, la evaluación consiste en probar algo, tanto para saber si funciona correctamente como no, si cumple con las expectativas o no, o simplemente para conocer cómo funciona una determinada herramienta o utensilio, la evaluación de la usabilidad es una actividad que comprende un conjunto de metodologías y técnicas que analizan la usabilidad de un sistema en diferentes etapas del ciclo de vida del software (Granollers y Lóres, 2005). De la misma forma, se debe comprender que es necesario complementar la evaluación desde la perspectiva del usuario, utilizando métodos de indagación y desde la perspectiva del experto, utilizando métodos de inspección. Un excelente trabajo de revisión sobre varios aportes al concepto de usabilidad y su evaluación se recoge en (Ankita y Sanjay, 2012), allí, en una de las referencias, se plantean diez factores de usabilidad y veintiséis criterios de evaluación (Seffah y otros, 2006), que posteriormente son agrupados y plasmados en una taxonomía (Rios y otros, 2010).

Recientemente, se ha hecho evidente la preocupación por la evaluación de la usabilidad y calidad del software de uso industrial. Se han propuesto enfoques mediante el uso de redes neuronales artificiales, que agilizan la evaluación en contextos particulares (Da Ponte y Da Silveira, 2008). Otros enfoques han sido el desarrollo de taxonomías para facilitar la identificación y recogida de las variables asociadas a los datos de interacción de los usuarios con el software, tales como rutas de navegación y agrupación de caracteres, y determinar así el comportamiento de los usuarios durante la interacción con la interfaz (Hanna y otros, 2012). Igualmente, la utilización de la Teoría Inventiva para la Resolución de Problemas o TRIZ, que combina reglas del diseño de la interacción, métodos múltiples de evaluación de la usabilidad, recolectores de tendencias de la evolución de la interacción (Filippi y Barattin, 2012), modelos formales de tareas basados en TaMoGolog (Rukh, 2012), la Teoría de la Actividad (Cao y otros, 2012), y otros relacionados con

la combinación de Teoría del Diseño y los Sistemas de Información en la Interacción Humano-Computador (Spagnoletti y Tarantino, 2013).

Para especificar o medir la usabilidad es necesario identificar las metas y descomponer la efectividad, eficiencia y satisfacción, así como los componentes del contexto de uso en subcomponentes con atributos medibles y verificables:

- **Eficacia:** definido en términos de la exactitud y completitud con que usuarios específicos pueden lograr metas específicas en ambientes particulares.
- **Eficiencia:** referido a los recursos gastados en relación con la precisión y completitud de la meta lograda, es decir recursos de tiempo, financieros y humanos.
- **Satisfacción:** que evalúa el confort o comodidad y la aceptabilidad del trabajo del sistema para sus usuarios y otras personas afectadas por su uso.

3.1 OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN DE USABILIDAD

La evaluación, tiene definidos tres objetivos principales:

- Comprobar la extensión de la funcionalidad del sistema.
- Comprobar el efecto de la interfaz en el usuario.
- Identificar cualquier problema específico con el sistema.

La funcionalidad del sistema es importante, en tanto a que debe estar completamente de acuerdo con la especificación de los requisitos. En otras palabras, el diseño del sistema debe permitir al usuario llevar a término las tareas de forma más fácil, el cual incluye que el sistema no sólo debe realizar apropiadamente las funcionalidades disponibles, sino que además debe permitir alcanzar dichas funcionalidades de manera clara en términos de las acciones que el usuario necesita realizar para completar dichas tareas.

Adicionalmente a la comprobación del diseño del sistema en términos de su capacidad funcional, es importante comprobar el impacto de dicho diseño sobre el usuario. Ello incluye considerar aspectos como conocer lo fácil que le resulta su aprendizaje, su manejabilidad en el espectro más amplio de usuarios posibles (sin excluir aquellos con necesidades especiales), o identificar, por ejemplo, aquellas áreas del diseño que puedan requerir una sobrecarga de la cantidad de

información que el usuario debe recordar (Dix y otros, 2004, p. 364). El objetivo final de la evaluación es la identificación de los problemas específicos del diseño, que pueden ser aspectos del mismo que, estando el usuario en su contexto, causen resultados inesperados o confusión entre varios usuarios.

Las evaluaciones pueden realizarse en espacios especialmente equipados o laboratorios, en salas de reuniones, en el propio entorno donde los usuarios realizan sus tareas habitualmente o simplemente en cualquier lugar donde puedan reunirse usuarios y evaluadores. Por tanto, no existe ninguna restricción física que limite las posibilidades para poder realizar evaluaciones de sistemas interactivos diversos.

Pero como todo proceso, se debe contar con una serie de pasos y etapas que deben ser respetadas, desarrolladas y aplicadas detenida y estructuradamente. Por ende, a continuación se refiere el proceso de evaluación que debe aplicarse para este caso, de manera tal que quede indicado cuál es su procedimiento y pasos por seguir para su cumplimiento.

3.1.1 El laboratorio de usabilidad

Los laboratorios de usabilidad son espacios especialmente adaptados para la realización de pruebas de evaluación de la usabilidad. Consisten normalmente en dos salas o habitaciones, una es la sala de observación (para los evaluadores) y otra la de la prueba (para los usuarios), entre las cuales normalmente hay instalado un cristal de separación que sólo permite ver a los usuarios desde la sala de observación, pero no desde el lado opuesto ([figura 3.1](#)).

Figura 3.1. Sala de observación de un laboratorio de usabilidad



Fuente: centro de estudios tecnológicos para la atención de la dependencia y la vida autónoma, 4all-

L@b, 2010.

Normalmente un laboratorio de usabilidad está equipado con cámaras de vídeo controladas remotamente desde la sala de observación que se pueden usar para mostrar una visión general de la prueba que se está realizando o para enfocar puntos concretos como por ejemplo la cara del usuario, el teclado, el manual o la documentación. Adicionalmente, algunos laboratorios disponen de una sala adjunta a la sala de observación para que otros observadores puedan debatir la prueba que se está realizando sin distraer a los observadores principales, los especialistas en usabilidad en la sala principal de observación.

En la sala de observación se mezclan las señales de vídeo para producir una sola secuencia que se graba junto al instante en el que se ha generado cada secuencia para posteriormente compararlo con la grabación del uso del sistema. Para realizar experimentos de laboratorio, lo que sí resulta imprescindible es disponer de un espacio de experimentación modulable y que sólo se use para esta finalidad. Por ejemplo, si se trata de hacer experimentos con usuarios de navegación web, se necesita una habitación con condiciones ambientales estándar (luz, ruido, temperatura, etc.) y computadores en red, mientras que para hacer experimentos de control remoto de una silla de ruedas, el laboratorio se puede llenar de obstáculos y señales simulando situaciones habituales, es decir, tener un sitio que pueda modularse para recrear un ambiente experimental determinado.

Por otra parte, e igual que pasa en los laboratorios de usabilidad, es deseable disponer de dispositivos que permitan registrar la interacción entre los usuarios y la tecnología (cámaras, instrumentos que permitan inspeccionar respuestas psico-fisiológicas, eyetracking, micrófonos o anotadores de web logs) junto a dispositivos de filtrado y análisis, como filtros de respuestas psico-fisiológicas o paquetes estadísticos que permiten analizar la información recogida.

3.2 APORTES A LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE USABILIDAD

Existe una amplia variedad de métodos de evaluación, cada uno de ellos utiliza unos determinados medios y técnicas e intentan medir diferentes aspectos. La elección de un método u otro no depende sólo de cuál es la respuesta que se quiere conocer sino de múltiples factores que pueden resumirse en ¿cuánto cuesta y qué se obtiene con su realización? Los métodos no son totalmente independientes, sino que se traslapan en cuanto a las actividades que desarrollan (Rodeiro, 2001).

Los estudios realizados permiten afirmar que aún a la actualidad no existe un acuerdo unificado para clasificar los métodos de evaluación de usabilidad y que los diferentes autores e investigadores del campo, han definido sus propias clasificaciones de métodos para la evaluación de la usabilidad, aunque existe coincidencia en algunas categorías y solapamiento entre otras, como se expone a continuación:

3.2.1 Nielsen y Molich

Estos investigadores dividen los métodos de evaluación en cuatro categorías (Nielsen y Molich, 1990):

- ***Evaluación formal.*** Realiza la evaluación de la interfaz de usuarios mediante algunos análisis técnicos. Los modelos de análisis formal son actualmente objeto de extensa investigación para poder ser aplicados en proyectos de desarrollo de software real.
- ***Evaluación automática.*** Aquella que utiliza procedimientos computarizados para la evaluación de usabilidad.
- ***Evaluación empírica.*** Realizada mediante experimentos con pruebas de usuario, con el objetivo de lograr una completa evaluación de usuario. Actualmente la mayoría de situaciones prácticas no conducen a evaluaciones empíricas por falta el tiempo, especialización, inclinación, o simplemente tradición para hacerlo.
- ***Evaluación heurística.*** Realizada revisando la interfaz del usuario y generando un informe de acuerdo a la propia opinión.

3.2.2 Wixon y Wilson

Estos autores ofrecen una visión amplia y sugieren que la ingeniería de usabilidad coloca al usuario en el centro del proceso. Proponen la siguiente clasificación (Wixon y Wilson, 1997):

- ***Evaluación formativa vs. sumativa.*** Los métodos de evaluación formativa son usados para generar nuevas ideas durante el desarrollo, en tanto que los métodos de evaluación sumativos son usados para evaluar sistemas existentes.
- ***Método de evaluación de descubrimiento vs método de decisión.*** Los métodos de descubrimiento o también llamados métodos cualitativos son usados para descubrir cómo trabajan, se comportan o piensan los usuarios y que problemas tienen. Por otro lado los

métodos de decisión también llamados cuantitativos, son usados en la selección de un diseño determinado entre algunas alternativas o para escoger elementos de diseño de interfaz.

- ***Evaluación formalizada vs evaluación informal.*** Los primeros utilizan análisis técnico mientras los segundos son más bien de juicio.
- Evaluación con usuarios comprometidos vs. Evaluación con usuarios no comprometidos. Estos métodos se diferencian en el grado de compromiso del usuario en la evaluación, análisis y diseño
- ***Evaluación completa vs evaluación de componente.*** Los primeros llamados así por que cubren todos los pasos necesarios para completar los esfuerzos de diseño de usabilidad, mientras que los segundos representan solo una parte de un proceso completo de usabilidad.

3.2.3 Preece

Por su parte Preece (Preece, 1993), (Preece y otros, 2002) considera cuatro métodos para la evaluación de usabilidad:

- ***Evaluación de expertos:*** también conocido como evaluación heurística, normalmente es llevada a cabo por personas experimentadas en diseño de interfaces y/o en la investigación de factores humanos a quienes se solicita describir los problemas potenciales que ellos consideran para usuarios menos experimentados, sugiriendo soluciones a los problemas que ellos identifican. Estos expertos no deberán haber estado involucrados con versiones previas del prototipo bajo evaluación y su rol necesita estar definido previamente para asegurar que ellos adopten la apropiada perspectiva cuando usamos el prototipo.
- ***Evaluación observacional:*** permite la colección de datos que proporcionan información acerca de lo que los usuarios están haciendo cuando interactúan con el software.
- ***Evaluación por investigación:*** empleada para conocer las opiniones de los usuarios o para entender sus preferencias sobre un producto potencial o uno existente a través de cuestionarios y entrevistas.
- ***Evaluación experimental:*** en esta evaluación, un evaluador puede manipular un número de factores asociados con la interfaz de usuario y estudiar sus efectos en el desempeño del usuario. Es necesario planear muy cuidadosamente el nivel de experiencia requerido del usuario, hipótesis a ser probada, estructura de las tareas y tiempo necesario para completar el experimento, entre otros.

3.2.4 Baecker

Este investigador considera los siguientes métodos de evaluación (Baecker y *otros*, 1995):

- **Métodos experimentales:** se diseñan experimentos con la formulación de una hipótesis e hipótesis alternativas y se evalúa cómo el usuario percibe el producto en evaluación. Requiere que tanto desarrolladores como usuarios estén en permanente contacto, se prueban aspectos específicos del software y los cambios se producen muy dinámicamente, lo que no permite que el sistema sea utilizado por usuarios reales hasta que esté maduro.
- **Métodos observacionales:** el evaluador observa el comportamiento del usuario mientras utiliza el sistema. En general estas técnicas son complementarias y deberían ser usadas en conjunto con otras técnicas
- **Métodos basadas en preguntas:** se basan en el uso de preguntas informales y/o estructuradas que permiten al evaluador formarse una idea de la percepción del usuario sobre el producto en evaluación. Aquí se aplican cuestionarios o encuestas, también se usan las páginas de preguntas más frecuentes y de sugerencias de los usuarios.
- **Métodos de evaluación cooperativa:** es una validación empírica que tiene dos puntos importantes: no es necesario ser un especialista en factores humanos para usarlo, y los diseñadores lo pueden usar para encontrar problemas inesperados en sus propios diseños. Esta técnica requiere utilizar un prototipo y usuarios representativos de los usuarios finales.
- **GOMS (Goals Operators Methods and Sequences).** Definido según Baecker como un método que emplea un modelo del proceso cognitivo humano para definir cómo hacer una tarea en términos de metas, operadores, métodos y reglas de selección. Sin embargo, tiene una utilidad limitada debido a que está restringida a describir habilidades y rendimiento sin error. Además los diseñadores están en la necesidad de especificar un modelo de su sistema.
- **Inspecciones cognoscitivas:** especialistas en software examinan el código en una búsqueda metódica de problemas. Seleccionan un conjunto de tareas representativas y prueban comando a comando, menú por menú, se formulan preguntas que están basadas en la teoría cognoscitiva de las relaciones entre metas, acciones y el estado visible de la interfaz.
- **Evaluación heurística:** proceso de aplicar reglas o principios de diseño de interfaces a un sistema o prototipo, identificando problemas de usabilidad. Evalúa la consistencia, mensajes de error, el lenguaje, la existencia de ayuda en línea y elementos como iconos, entre otros.

3.2.5 Scriven

Distingue dos aproximaciones para la evaluación de la usabilidad basadas en el objetivo de la evaluación (Scriven, 1967):

- **Evaluación formativa:** aquella realizada durante el desarrollo para mejorar un diseño, es decir, se basa en encontrar problemas de usabilidad para lograr así que un diseño de interacción pueda ser mejorado, y
- **Evaluación sumativa:** aquella realizada después que el diseño de la interfaz de usuario (o componente) ha sido completado, para realizar una valoración absoluta o comparativa del diseño. Consiste de una valoración y comparación estadística de dos o más configuraciones de diseño.

3.2.6 Whitefield, Wilson y Dowell

Proponen una clasificación de métodos de evaluación de usabilidad, subdividiendo los recursos que están disponibles durante la evaluación en cuatro categorías (Whitefield, Wilson y Dowell, 1991): usuarios reales, computadoras reales, usuarios representativos y computadoras representativas, y ubican estas categorías en una matriz de dos por dos, para poder clasificarlos como: observacional, reporte de especialistas, reportes de usuarios y métodos analíticos, de tal manera que satisfagan la matriz, tal como se muestra en la [tabla No. 3.1](#).

Tabla No. 3.1. Métodos de evaluación según Whitefield

	Usuario representativo	Usuario real
Computador representativo	Métodos analíticos	Reporte del usuario
Computador real	Reporte del especialista	Métodos observacionales

Fuente: Whitefield y otros, 1991.

En síntesis los 4 métodos propuestos por estos investigadores son:

- **Método observacional:** sólo puede ser usado con usuarios reales y computadoras reales. En este caso los recursos computadora y usuarios están realmente disponibles, así que un número

de métodos de evaluación pueden y deben ser usados.

- **Reporte de usuarios:** sólo puede ser obtenido cuando están disponibles usuarios reales y computadoras representativas.
- **Reporte de especialistas:** puede ser obtenido de usuarios representativos, quienes por definición son descripciones o modelos de usuarios. La palabra especialista en este reporte implica algo diferente del usuario real definido o representativo y, finalmente
- **Método analítico:** preparado como una guía sólo cuando algunas de las técnicas no encajan fácilmente en una clasificación debido a que su uso puede ser considerablemente variable.

3.2.7 Coutaz y Balbo

Estos autores han diseñado una taxonomía que permita seleccionar opciones de evaluación. Para ellos existen cinco dimensiones que delimitan el tipo de método a utilizar (Coutaz y Balbo, 1994):

- **Recursos de conocimiento:** el primer interés de esta taxonomía es el conocimiento necesario para conducir la evaluación. Los autores consideran dos tipos de conocimiento requerido: la descripción necesaria como una entrada para la evaluación y el nivel de experiencia requerida de la evaluación para ejecutar la misma.
- **Recursos de ambiente:** la siguiente preocupación es la que concierne al recurso de ambiente que define el contexto de la evaluación. Esta dimensión es expresada usando un conjunto de cinco ejes. La ubicación donde la evaluación tiene lugar, la estructura de los diálogos proporcionados por la interfaz, las fases del ciclo de vida de desarrollo de software en que la evaluación puede ser conducida, el tipo de interfaz que está siendo evaluado y la restricción financiera o temporal sobre la evaluación.
- **Recursos humanos:** los recursos humanos conciernen a las personas involucradas en el proceso de evaluación, referida tanto a los evaluadores como a los sujetos. Para los evaluadores, la taxonomía toma en cuenta su número y su nivel de experiencia, que es directamente enlazada a la preocupación del recurso de conocimiento. El segundo aspecto de los recursos humanos concierne a los usuarios: su número, su tipo y también su origen.
- **Recursos hardware:** estos recursos cubren los componentes físicos para la evaluación. Incluyen el objeto de la evaluación (es decir qué es evaluado) y los instrumentos usados para

capturar los datos. Este segundo concepto enfatiza nuevamente la importancia de la observación del usuario final manipulando la interfaz de usuario mientras se está llevando a cabo la evaluación.

- **Resultados:** los resultados de una técnica o método de evaluación están caracterizados por el soporte dado, así como el tipo de información proporcionada. Este segundo eje permite información objetiva, resultados cuantitativos o la medida correctiva a ser distinguida.

3.2.8 Hix y Hartson

Describen dos clases de evaluación (Hix y Hartson, 1993):

- **Evaluación analítica:** basada en análisis de las características de un diseño, a través de la revisión de la representación de un diseño, prototipo, o implementación.
- **Evaluación empírica:** basada en observación del desempeño del usuario del diseño en uso.

Como conclusión, la evaluación de la usabilidad puede aplicarse a un componente o al producto completo, dependiendo de las características del método utilizado y de los requisitos y objetivos de evaluación, así como del contexto de evaluación. Se descartan métodos como GOMS y Cooperativo por no considerarse suficientemente relevantes.

3.3 PLAN DE EVALUACIÓN

En un proceso de diseño centrado en el usuario o DCU, la evaluación como parte esencial del mismo debe comenzar tan pronto como sea posible, y cuanto más tardemos en realizar tareas de comprobación más difíciles de implementar serán los cambios, los errores detectados y/o los requisitos establecidos.

En (Granollers, 2004) se plantea unas pautas generales plasmadas en el siguiente plan de evaluación:

- Antes de empezar una evaluación debe tenerse muy claro los objetivos de la misma. No como sistema global, sino sólo en la parte que va a ser probada y qué se espera de la prueba.
- Cada evaluación debe tener un responsable (integrante del equipo de desarrollo), que tendrá las siguientes responsabilidades:

- Moderar las sesiones.
 - Reclutar a los usuarios y/o a los evaluadores.
 - Reservar el lugar de celebración de la evaluación (tanto si se trata del laboratorio como del lugar de trabajo).
 - Dirigir las tareas a evaluar (en función de los objetivos del punto anterior).
 - Disponer los recursos necesarios para la evaluación (prototipos, dispositivos necesarios)
 - Tener claras las tareas a probar.
 - Qué técnicas de evaluación se utilizarán.
- c. La evaluación debe encajar según la planificación y el presupuesto económico determinados para el proyecto. En esta planificación se preverán tantas actividades como sean necesarias, en cada una de las cuales se aplicará uno o más métodos de evaluación de usabilidad y/o accesibilidad de los que veremos a continuación.
- d. Documentar los resultados de la evaluación (responsabilidad que también recae en el responsable) y distribuirlos entre los miembros del equipo de desarrollo que precisen de sus resultados (responsabilidad del jefe del proyecto).

3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD

Los métodos de evaluación, pueden clasificarse de varias maneras (Granollers, 2004) (ver [tabla 3.2](#)).

En cuanto al lugar de realización, se distinguen dos categorías generales:

- a) **Los que se realizan en el laboratorio.** El objetivo del evaluador, a veces, es comprobar aspectos sin que precise la ayuda de los usuarios. Este tipo de comprobaciones las realiza, normalmente, en su entorno de trabajo o sea en el laboratorio, donde puede además traer usuarios para un estudio particular.
- b) **Los que se realizan en el entorno natural o habitual del escenario donde se realizan las tareas a evaluar.** Esta situación se produce cuando el evaluador realiza su trabajo en el lugar natural donde se realiza la escena, el lugar de interacción habitual del usuario.

En cuanto al tipo de técnica, se distinguen tres categorías:

- a) **Métodos de inspección:** su principal característica es que unos expertos examinan aspectos de la interfaz del sistema relacionados con la usabilidad y la accesibilidad que la misma ofrece a sus usuarios. Estos métodos tienen en cuenta las opiniones, juicios, informes de los inspectores sobre elementos específicos de la interfaz como factor fundamental de la evaluación de la usabilidad. Son populares en el ámbito de las empresas de producción de servicios software, pues permiten identificar, clasificar y contabilizar un gran número de errores potenciales de usabilidad a precio relativamente bajo.
- b) **Métodos de indagación:** la información acerca del agrado del usuario, quejas, necesidades e identificación de requisitos, son informaciones indispensables sobre todo en etapas tempranas del proceso de desarrollo para que proporcionen información relacionada con el uso y las posibilidades de acceso de un producto. Este tipo de métodos se realiza hablando con los usuarios, observándolos, usando el sistema en trabajo real, y obteniendo respuestas a preguntas verbalmente o por escrito.
- c) **Métodos de test:** en estos métodos, los usuarios representativos trabajan en tareas concretas utilizando el sistema (o el prototipo) y los evaluadores utilizan los resultados para ver cómo la interfaz de usuario da soporte a los usuarios con sus tareas.

En cuanto a la automatización, se pueden distinguir entre métodos:

- a) **Automáticos:** son aquellos métodos que disponen de mecanismos (hardware y/o software) que facilitan la comprobación de los aspectos a validar. Los métodos automáticos resultan altamente eficientes puesto que se realizan muy rápidamente y los resultados provienen de los propios parámetros, sin apreciaciones subjetivas. Una de las características que hacen más atractivos a estos métodos es la posibilidad de realizar tests remotamente (Bartek y Cheatham, 2003; Dray y Siegel, 2004) a través de Internet. Su desventaja es que se usan en sistemas ya finalizados y no en etapas tempranas del ciclo de vida del desarrollo.
- b) **Manuales:** al contrario de los métodos anteriores, no disponen de mecanismos que automaticen su realización. Éstos consumen más recursos: tiempo, evaluadores, etc., pero pueden evaluar aspectos que se salen del patrón y pueden realizarse en cualquier etapa del desarrollo y con cualquier tipo de prototipo.

Según el tipo de participantes, en la evaluación, se pueden distinguir los siguientes métodos:

- a) **Con usuarios y/o implicados:** son los métodos en los que se evalúa el sistema con la intervención directa de usuarios representativos, pudiendo también participar en las sesiones personas que sin ser usuarios finales tienen la condición de implicados del sistema.
- b) **Métodos sin usuarios y/o implicados:** estos métodos los realizan sólo expertos evaluadores con la ayuda de guiones, pautas o documentos que permiten hacer un seguimiento de los que han hecho los usuarios mientras utilizaban el sistema.

Tabla 3.2. Clasificación de los métodos de evaluación de la usabilidad

CLASIFICACIÓN	TIPO
Lugar	Laboratorio
	Entorno real
Técnica	Inspección
	Indagación
	Test
Participantes	Con usuarios
	Sin usuarios
Automatización	Automáticos
	Manuales

Fuente: propia

3.5 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD

A continuación se presenta la [tabla 3.3](#), que representa la comparación de los métodos de evaluación de la usabilidad presentados con la finalidad de disponer de una perspectiva global que permita ver, entre otras cosas, las principales características de cada uno de ellos en relación a las diferentes clasificaciones mostradas, los momentos del ciclo de vida más adecuados para su

aplicación o el reflejo de cada uno de ellos respecto a los parámetros que definen la usabilidad.

El cuadro también indica si los resultados obtenidos son cuantitativos o no lo son, o sea, si al final de la prueba dispondremos de una lista de errores o mejoras detectados o de acciones concretas a realizar, o si contrariamente disponemos de un conjunto de datos que posteriormente deben analizarse.

Tabla 3.3. Comparación de los métodos de evaluación de la usabilidad

Método	Tipo	Lugar	Usuarios	Automático	Remoto	Datos cuantitativos
Heurística	Inspección	L	No	No	Sí	Si
Rec. Usabilidad plural		L	Si	No	No	No
Recorrido cognitivo		L	No	No	No	Si
Recorrido cognitivo con usuarios		L/E	Si	No	No	Si
Rev. de estándares		L	No	No	Si	Si
Observación de campo	Indagación	E	Si	No	No	No
Focus group		L/E	Si	No	No	Si
Entrevistas		L/E	Si	No	No	No
Cuestionarios		L/E	Si	Ambos	Si	Si
Logging		L/E	No	Si	Si	Si
Medida de prestaciones	Test	L/E	Si	Ambos	No	Si
Thinking Aloud		L/E	Si	No	No	No
Interacción constructiva		L/E	Si	No	No	Si
Test retrospectivo		L/E	Si	No	No	Si
Método conductor		L/E	Si	No	No	No
Ordenación de targetas		L/E	Si	Ambos	Si	Si

Fuente: Granollers, 2004.

3.6 EVALUACIÓN DE USABILIDAD DE INTERFACES DE SUPERVISIÓN DE PROCESOS

Desde el punto de vista de Interfaces para Monitorización y Supervisión Industrial, aun son

escasos los aportes sobre metodologías de evaluación de usabilidad, debido a la separación existente entre las operaciones automatizadas de los procesos y su interpretación a través de la interfaz para la toma de decisiones por parte del operador. Una aproximación para tal integración es la metodología de modos de marchas y paros o guía GEMMA (Ponsa y otros, 2007) que combina sistemas de eventos discretos DES y actividades humanas, así el operador humano puede cumplir un rol dentro de las acciones de los dispositivos automáticos sobre el proceso. La misma guía es posteriormente aplicada sobre un simulador para el entrenamiento de operadores (Ponsa y otros, 2009). Otra propuesta metodológica, involucra nuevas tendencias en supervisión de procesos como aportes preliminares para la construcción de sistemas de supervisión holónicos (ente autónomo y cooperativo) que relacionan aspectos formales (modelos) con aspectos tecnológicos (interfaces de operador) (Zapata y otros, 2011), pero no plantea la manera de evaluar la usabilidad de tal conjunción.

Por ello, en esta Tesis se desarrolla una metodología que hace un aporte al campo de evaluación de usabilidad de interfaces de Humano-Máquina, para la Supervisión de procesos automatizados, y mejorar así la toma de decisiones por parte del operador, especialmente en situaciones de alto riesgo.

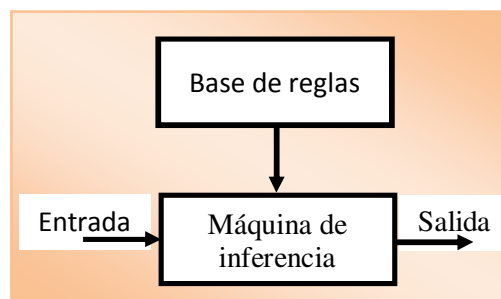
4. SISTEMAS ADAPTATIVOS DE INFERENCIA NEURODIFUSA

4.1 LOS SISTEMAS DIFUSOS

Los sistemas difusos, proporcionan un marco de procesamiento numérico para la información propia de los sistemas basados en conocimiento, formulándolo de una manera sistemática que intenta emular las propiedades del razonamiento humano. Esta técnica combina la teoría de los conjuntos difusos y la lógica difusa para reproducir comportamientos complejos, en general no lineales, enunciados en forma de relaciones cualitativas e imprecisas, propios del lenguaje natural, y expresarlos en términos numéricos, compatibles con los métodos usados en los sistemas de ingeniería (Zadeh, 1973).

La estructura básica de un sistema difuso se muestra en la [figura 4.1](#) y consta de dos bloques fundamentales: el bloque de base de reglas y el bloque de la máquina de inferencia. El primero sistematiza y estructura los enunciados que constituyen el conocimiento que se posee sobre el problema en cuestión, en forma de sentencias condicionales del tipo si A (situación), entonces B (acción), que resultan especialmente adecuadas para tareas de control. Cada una de estas sentencias posee dos importantes características: en primer lugar, expresan un conocimiento cualitativo más que cuantitativo; y en segundo lugar, establecen una relación causa efecto que posee un carácter marcadamente local. Ambas características se formalizan y convierten a términos numéricos con la ayuda de los conceptos de la teoría difusa. Así su carácter cuantitativo se recoge en el concepto de conjunto difuso, mientras que la localidad de relación causal se corresponde con el concepto de relación difusa, o implicación difusa.

Figura 4.1. Diagrama de bloques de un sistema difuso



Fuente: propia

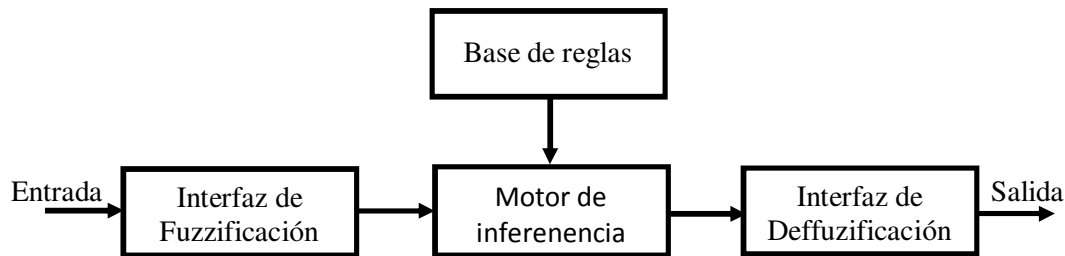
Por otra parte, la capacidad de generalización del experto humano se formaliza mediante la Máquina de Inferencia que combina la información almacenada en la base de reglas empleando el concepto de regla de composición. De este modo, para una entrada dada que expresa una situación, no necesariamente coincidente con alguna de las recogidas en la base de reglas, pero que presenta cierta semejanza con una o varias de ellas, el sistema proporciona a la salida una acción adecuada, no necesariamente coincidente con alguna de las recogidas en dicha base, aunque más próxima a aquella respuesta que proporcionaría la regla o reglas con la que presente mayor semejanza.

Aunque bastante adecuado para emular a un operador humano desde un punto de vista conceptual y cualitativo, el sistema difuso así definido no resulta útil en problemas prácticos de ingeniería y control automático, donde tanto las situaciones, (señales medidas de sensores), como las acciones, (señales de control sobre accionamientos), vienen expresadas como variables reales. Por esta razón los controladores difusos incorporan dos elementos de interfaz adicionales al esquema básico del sistema difuso:

- Un sistema, fuzzificador, que convierte un valor no difuso crisp, en un conjunto difuso; y
- Un sistema defuzzificador, que convierte la salida del sistema difuso en un valor real crisp.

La [figura 4.2](#) muestra un esquema de la configuración básica de un sistema de control difuso, que incorpora los bloques de interfaz antes mencionados. Cada uno de los bloques que aparecen en la figura puede ser caracterizado mediante fórmulas matemáticas precisas proporcionadas por la teoría de los conjuntos difusos. De esta manera un controlador difuso con múltiples entradas y múltiples salidas realiza en general un mapeado no lineal de vectores del espacio de entrada en vectores del espacio de salida, por lo que, desde este punto de vista, puede ser considerado como un sistema aproximador de funciones. Este es un aspecto importante que diferencia a los sistemas difusos de los sistemas expertos y de inteligencia artificial, y que los hace más atractivos que éstos para su implementación software o hardware en tareas de control automático.

Figura 4.2. Diagrama de bloques de un sistema de control difuso



Fuente: propia

El procedimiento que realizan los controladores difusos, llamado inferencia difusa o razonamiento aproximado en general comprende los siguientes pasos (Jang, 1993):

1. Evaluar el grado de pertenencia de cada entrada a cada conjunto difuso o etiqueta lingüística definida en su espacio de entrada, este proceso se denomina fuzzificación.
2. Combinar los grados de pertenencia de cada una de las entradas que constituyen el antecedente de regla para obtener el peso de cada regla en la salida global, por medio del operador t-norma.
3. Evaluar cada regla para obtener su consecuente a partir del peso dado por el antecedente y la función de pertenencia asociada al consecuente, este proceso se denomina implicación difusa.
4. Componer los consecuentes de cada regla para obtener una conclusión, este proceso se denomina regla de composición.
5. Obtener una acción de control no difusa, proceso denominado defuzzificación.

En la práctica se distinguen tres tipos fundamentales de sistemas de inferencia difusa que se diferencian básicamente en la representación de los consecuentes de las reglas difusas y en sus procedimientos de agregación y defuzzificación (Jang, 1993) (Lin, 2013):

- **Tipo 1:** es el caso más general. Emplea reglas enunciadas en términos de variables lingüísticas tanto para las entradas como para las salidas en la forma:

$$\text{SI } x_1 \text{ es } A_i, \dots, \text{ y } x_n \text{ es } B_i, \text{ Entonces } y = C_i$$

La salida difusa de cada regla se obtiene combinando su función de pertenencia de salida, bien

empleando un operador de mínimo (modelo de Mamdani), bien un operador producto (modelo de Larsen), con un factor obtenido de evaluar el antecedente de la regla para una entrada dada. La salida difusa del sistema se obtiene combinando con operador máximo las salidas de todas las reglas. Para obtener una salida no difusa del sistema se pueden emplear diferentes métodos, siendo el más usado el llamado método del centroide.

- **Tipo 2 (modelo de Tsukamoto):** emplea reglas del mismo tipo que el anterior, salvo que la función de pertenencia de la salida C_i es una función monótona creciente. La salida final del sistema es la suma ponderada de cada salida de regla, dada por el peso de la regla resultante del antecedente y por la función monótona creciente del consecuente.
- **Tipo 3 (modelo de Takagi-Sugeno):** emplea reglas enunciadas en términos de variables lingüísticas para las entradas, y el consecuente de cada regla se obtiene como una combinación lineal de los valores de entrada más un término constante.

$$\text{SI } x_1 \text{ es } A_i, \dots \text{ y } x_n \text{ es } B_i, \text{ Entonces } y = f_i(x_1 \dots x_n)$$

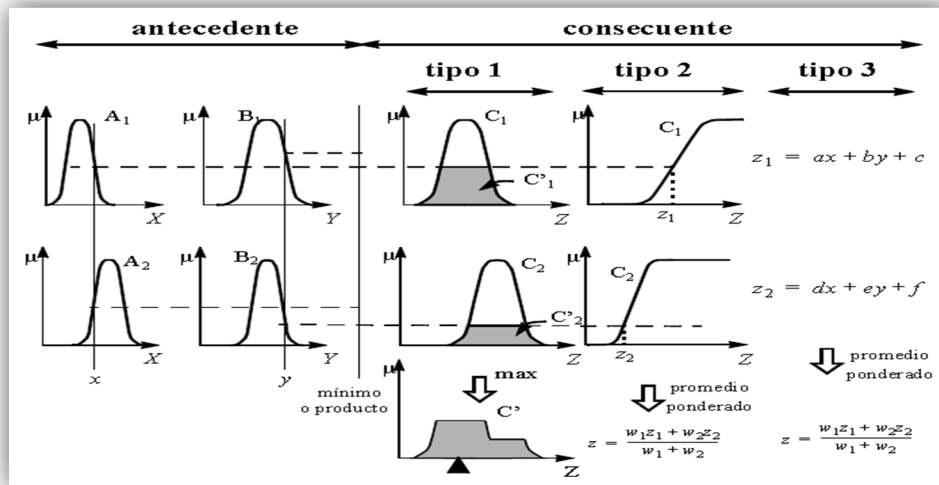
La salida del sistema es una suma ponderada de las salidas de las reglas. Los tres tipos de inferencia se ilustran en la [figura 4.3](#) (Jang, 1993), en la que por simplicidad se muestra el caso de un sistema con dos entradas. A pesar de su popularidad, la implementación hardware de cualquiera de estos tres mecanismos de razonamiento en su forma más general resulta costosa en términos de área de silicio y consumo de potencia. Un caso particular, común a los tres tipos de inferencia difusa, es aquel en que las reglas difusas quedan enunciadas así:

$$\text{SI } x_1 \text{ es } A_i, \dots \text{ y } x_n \text{ es } B_i, \text{ Entonces } y = y^*$$

Donde y^* es un valor constante no difuso o singleton. Para el tipo de razonamiento 1, ya sea el modelo de Mamdani, o el modelo de Larsen, el singleton es un caso extremo de función de pertenencia correspondiente a un conjunto difuso normalizado cuyo soporte y núcleo coinciden en un único valor. En el tipo de razonamiento 2 de Tsukamoto, se encuentra el equivalente si se consideran funciones escalón en el consecuente, centradas en el valor del singleton. Finalmente, este razonamiento coincide también con el de tipo 3 o de Takagi-Sugeno cuando sólo el término independiente de la expresión lineal del consecuente es distinto de cero, lo que se conoce como modelo de Sugeno de orden cero (Jang y Tsun, 1995). Se demuestra (Jang, 1993) que bajo ciertas condiciones, el sistema de inferencia así obtenido es capaz de aproximar cualquier función no lineal

arbitraria con el grado de precisión que se desee. Debido a esto, y a su sencillez en el cálculo del consecuente este tipo de razonamiento es el más extendido entre las implementaciones hardware de los sistemas de inferencia difusos.

Figura 4.3. Mecanismos más usuales de razonamiento difuso



Fuente: adaptado de Jang, 1993.

En el diseño de sistemas difusos se explota su característica transparencia al conocimiento humano para definir su estructura, esto es, para determinar el número de entradas, número de etiquetas lingüísticas necesarias, forma y distribución de las funciones de pertenencia sobre el espacio de entrada, número de reglas, sistema de inferencia a emplear, etc. Sin embargo, no existe un método sistemático de diseño que pueda ser empleado de forma general y casi siempre, después de haber determinado su estructura se hace necesario un proceso de ajuste fino para conseguir que la relación entrada-salida deseada se mantenga dentro de un error aceptable.

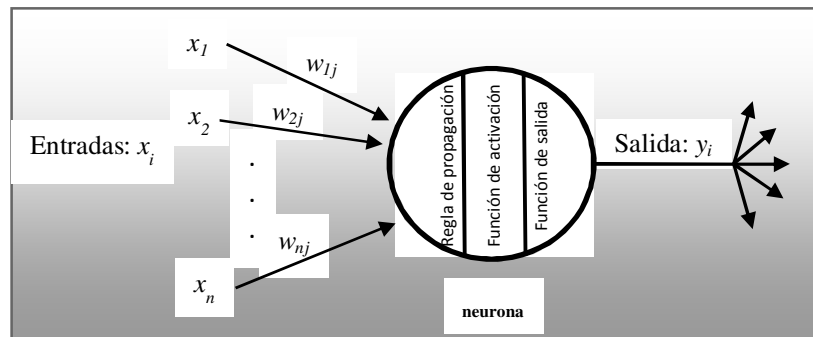
4.2 LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

En los años 50, dos neurocientíficos, Warren McCulloch y Walter Pitts, propusieron un modelo básico de neurona. Aunque no fueron los primeros en considerar las neuronas como sistemas para realizar cálculos, sí fueron los pioneros en el intento de definir formalmente a las neuronas como elementos computacionales y explorar las consecuencias de las propiedades neuronales (McCulloch y Pitts, 1943).

4.2.1 Componentes de una neurona artificial

A continuación se describen los componentes de una red neuronal. Estos componentes son válidos aun cuando la neurona sea usada en la entrada, salida, o capa oculta (figura 4.4).

Figura 4.4. Elementos básicos de una neurona artificial



Fuente: propia

- **Entradas:** entradas x_j a la neurona.
- **Pesos:** normalmente una neurona recibe muchas y múltiples entradas simultáneas. Cada entrada tiene su propio peso relativo el cual proporciona la importancia de la entrada dentro de la función de agregación de la neurona. Estos pesos realizan la misma función que realizan las fuerzas sinápticas de las neuronas biológicas. En ambos casos, algunas entradas son más importantes que otras de manera que tienen mayor efecto sobre el procesamiento de la neurona al combinarse para producir la respuesta neuronal. Los pesos son coeficientes que pueden adaptarse dentro de la red que determinan la intensidad de la señal de entrada registrada por la neurona artificial. Ellos son la medida de la fuerza de una conexión de entrada. Estas fuerzas pueden ser modificadas en respuesta de los ejemplos de entrenamiento de acuerdo a la topología específica o debido a las reglas de entrenamiento.
- **Función de propagación:** esta regla permite obtener, a partir de las entradas y los pesos el valor del potencial post-sináptico h_i de la neurona:

$$h_i(t) = \sigma_i(w_{ij}, x_j)$$

La función más habitual es la suma ponderada de todas las entradas. Se pueden agrupar las entradas y pesos en dos vectores (x_1, x_2, \dots, x_n) y $(w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj})$ y calcular esta suma realizando el

producto escalar sobre estos dos vectores.

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} \bullet x_j$$

La función de propagación puede ser más compleja que simplemente una suma de productos. Las entradas y los pesos pueden ser combinados de diferentes maneras antes de sobrepasar el valor a la función de activación. Por ejemplo, puede usarse como función de propagación, el mínimo, máximo, la mayoría, producto, o diversos algoritmos de normalización. El algoritmo específico para la propagación de las entradas neuronales está determinado por la elección de la arquitectura.

- **Función de activación o transferencia:** el resultado de la función de propagación, en la mayoría de los casos es una suma ponderada, es transformada en la salida real de la neurona mediante un proceso algorítmico conocido como función de activación.

$$a_i(t) = f_i(a_i(t-1), h_i(t))$$

En este caso la función de activación depende del potencial post-sináptico $h_i(t)$ y del propio estado de activación de anterior. Sin embargo, en muchos modelos de redes neuronales se considera que el estado actual de la neurona no depende de su estado anterior $a_i(t-1)$, sino únicamente del actual

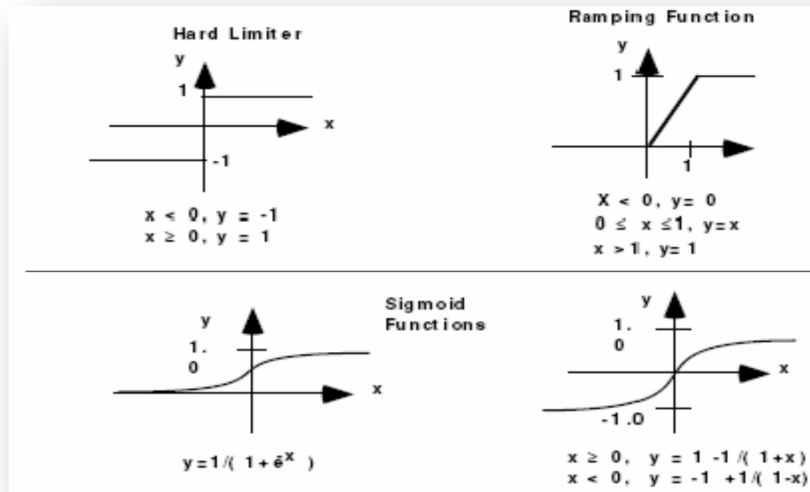
$$a_i(t) = f_i(h_i(t))$$

En la función de activación el valor de la salida de combinación puede ser comparada con algún valor umbral para determinar la salida de la neurona. Si la suma es mayor que el valor umbral, neurona generará una señal. Si la suma es menor que el valor umbral, ninguna señal será generada. Normalmente el valor umbral, o valor de la función de transferencia, es normalmente no lineal. El uso de funciones lineales es limitado ya que el valor de la salida es proporcional al de la entrada, de hecho este fue uno de los problemas en los primeros modelos de redes neuronales que fue identificado (Minsky y Papert, 1969).

La función de activación pudiera ser algo tan simple como dependiente sobre si el resultado de la función de combinación es positivo o negativo. Algunas funciones de transferencia pueden verse en

la [figura 4.5](#).

Figura 4.5. Ejemplos de funciones de activación



Fuente: adaptado de Martínez, 2007.

De las funciones presentadas en la figura 4.5 destacan las funciones sigmoideas. Desde el punto de vista matemático, la utilidad de estas funciones es que ella y sus derivadas son continuas. Estas funciones funcionan bastante bien y son normalmente las elegidas. Existen otras funciones de transferencia que son específicas de algunas arquitecturas.

Antes de aplicar la función de activación, se puede añadir cierto ruido a las entradas. La fuente y la cantidad de este ruido están determinadas por el modo de entrenamiento de una red particular. Este ruido normalmente es conocido como temperatura de la neurona. De hecho, al añadir diferentes niveles de ruido al resultado de la combinación lleva a crearse un modelo más parecido al cerebro. El uso del ruido por temperatura está aún en fase de investigación y no es aplicado habitualmente en las aplicaciones.

4.2.2 Escalonamiento y limitación

El valor de salida de la función de activación puede ser procesado de manera adicional mediante un escalamiento y limitación. El escalamiento simplemente multiplica el valor de la función de transferencia por un factor de escala y después se le suma un desplazamiento.

El mecanismo de limitación es el que asegura que el resultado del escalamiento no excede una cota superior o inferior. Esta limitación se realiza de manera adicional a los límites que puede imponer la función de transferencia original. Normalmente este tipo de escalamiento y limitación es usado principalmente en topologías usadas para verificar modelos neuronales biológicos.

4.2.3 Función de salida (competitividad)

Cada elemento de procesamiento tiene permitido una única salida $y_i(t)$ que puede estar asociada con un número elevado de otras neuronas. Normalmente, la salida es directamente equivalente al valor resultante de la función de activación.

$$y_i(t) = F_i(a_i(t)) = a_i(t)$$

Algunas topologías de redes neuronales, sin embargo, modifican el valor de la función de transferencia para incorporar un factor de competitividad entre neuronas que sean vecinas. Las neuronas tienen permitidas competir entre ellas, inhibiendo a otras neuronas a menos que tengan una gran fortaleza.

4.2.4 Función de error y el valor propagado hacia atrás

En la mayoría de algoritmos de entrenamiento de redes neuronales necesitamos calcular la diferencia entre la salida actual y la esperada. Esta diferencia es transformada por la función de error correspondiente a la arquitectura particular.

El error de la neurona se propaga normalmente dentro del algoritmo de aprendizaje de otra neurona. Este término de error es algunas veces denominado error actual y normalmente es propagado hacia atrás a la capa anterior, siendo este valor o bien el valor actual de error de esa capa obtenido al escalarlo de alguna manera (lo habitual es usando la derivada de la función de transferencia) o bien es tomado como la salida esperada (esto sucede en algunas topologías). Normalmente el valor que se propaga hacia atrás, una vez escalado por la función de aprendizaje, se multiplica por los pesos de la neurona para modificarlas antes de pasar al ciclo siguiente.

4.2.5 Tasa de aprendizaje

La tasa de aprendizaje de la RNA depende de distintos factores controlables que hay que tener en cuenta. Obviamente, un valor bajo de tasa de entrenamiento equivale a que se necesite gastar mucho tiempo para llevar a cabo el entrenamiento para producir una RNA bien entrenada. Con valores de entrenamiento mayores, la red puede no ser capaz de discriminar de manera tan adecuada como un sistema que aprende más despacio.

Generalmente, factores adicionales a parte del tiempo tienen que ser considerados cuando se discute el entrenamiento off-line:

- Complejidad de la red: tamaño, paradigma, arquitectura
- Tipo de algoritmo de aprendizaje empleado.
- El error admitido de la red final.

Si se cambia alguno de estos factores podemos o aumentar el tiempo de entrenamiento a un valor elevado u obtener un error inaceptable. La mayoría de algoritmos de aprendizaje requieren que se les pase una tasa de aprendizaje, o un término una constante de aprendizaje. Normalmente este término es un valor positivo entre 0 y 1. Si la tasa de aprendizaje es mayor que 1, es fácil para el algoritmo de aprendizaje provocar que se creen pesos incorrectos y la red oscilará. Pequeños valores de tasa de aprendizaje no corregirán el error actual de manera rápida.

4.3 ARQUITECTURA DE REDES NEURONALES

Se denomina arquitectura a la topología, estructura o patrón de conexionado de una red neuronal. En un RNA los nodos se conectan por medio de sinapsis, esta estructura de conexiones sinápticas determina el comportamiento de la red. En general, las neuronas se suelen agrupar en unidades estructurales que se denominan capas. Finalmente, el conjunto de una o más capas constituye la red neuronal.

Se distinguen tres tipos de capas:

- **De entrada:** una capa de entrada o sensorial está compuesta por neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno.
- **Ocultas:** es aquella que no tiene conexión directa con el contorno, es decir, que no se conecta directamente ni a órganos sensores ni a efectores.
- **De salida:** es aquella cuyas neuronas proporcionan la respuesta de la red neuronal.

Las conexiones entre las neuronas pueden ser excitatorias o inhibitorias: un peso sináptico negativo define una conexión inhibitoria, mientras que uno positivo determina una conexión excitatoria.

Las conexiones intra-capas, también denominadas laterales, tienen lugar entre las neuronas pertenecientes a una misma capa, mientras que las conexiones inter-capas se producen entre las neuronas de las diferentes capas. Existen además conexiones realimentadas, que tienen un sentido contrario al de entrada-salida. En algunos casos puede existir realimentación incluso de una neurona consigo misma.

Atendiendo a todos estos conceptos, se puede establecer distintos tipos de arquitecturas neuronales, entre ellas:

- **Redes monocapa:** son aquellas compuestas por una única capa de neuronas.
- **Redes multicapa (*layered networks*):** son aquellas cuyas neuronas se organizan en varias capas.

Atendiendo al flujo de datos en la red neuronal, se puede hablar de:

- **Redes unidireccionales (*feedforward*):** la información circula en un único sentido desde las neuronas de entrada a las de salida.
- **Redes recurrentes o realimentadas (*feedback*):** la información puede circular entre las capas en cualquier sentido.

4.4 ENTRENAMIENTO DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL

El en el proceso de entrenamiento se modifican los pesos que afectan a las entradas de la

neurona. Este proceso de cambio en los pesos de las conexiones de entradas para conseguir un valor deseado también es llamado función de adaptación. Las RNA pueden ser entrenadas mediante entrenamiento supervisado o entrenamiento no supervisado.

4.4.1 Entrenamiento supervisado

La mayor parte de arquitecturas de RNA son entrenadas mediante métodos supervisados. En este tipo de entrenamiento, la salida de la RNA es comparada con el valor deseado de salida. Los pesos, que normalmente han sido establecidos de manera aleatoria en un principio, son ajustados por la red de manera que en la siguiente iteración, también denominado ciclo, producirá un resultado más cercano entre el valor esperado y la salida real.

Una vez que el entrenamiento termina los pesos se fijan, aunque algunas redes permiten el entrenamiento continuo pero con una tasa de aprendizaje baja. Esto ayuda a la red a adaptarse de manera gradual a situaciones de cambio. El conjunto de patrones de entrenamiento necesita ser lo suficientemente grande como para contener toda la información necesaria para que la red aprenda todas las relaciones que son importantes. No sólo los conjuntos de patrones de entrenamiento tienen que ser grandes sino que las sesiones de entrenamiento deben incluir una gran cantidad y variedad de datos.

Si la red es entrenada con un ejemplo cada vez, todos los pesos son establecidos de manera demasiado meticulosa, para cada hecho puede ser drásticamente alterado por el entrenamiento para el siguiente hecho, esto puede provocar que la red se olvide de algunos hechos durante el entrenamiento para aprender otros. Como resultado, el sistema tiene que aprender todo a la vez, buscando la mejor combinación de pesos para todos los hechos.

4.4.2 Entrenamiento no supervisado

Actualmente este tipo de entrenamiento está limitado a las redes conocidas como mapas auto-organizados (Kohonen maps, SOM). Aún están en proceso de estudio ya que su funcionamiento no es del todo conocido.

4.4.3 Fase de recuerdo

Generalmente (aunque no en todos los modelos), una vez que el sistema ha sido entrenado, el aprendizaje se desconecta, por lo que los pesos y la estructura quedan fijos, estando la red neuronal ya dispuesta para procesar datos. Este modo de operación también es denominado *recall*.

4.4.4 Arquitecturas de RNA

En la [tabla 4.1](#) se presentan algunos de los modelos de las redes neuronales más populares.

Tabla No. 4.1. Resumen de arquitecturas de redes neuronales

Modelo	Campo de aplicación
Red de Hopfield	Optimización y asociación de patrones
Red perceptron multicapa (retropropagación)	Aproximación de funciones, clasificación, pronóstico y control
Red de Kohonen (mapas de auto organización MAO)	Clustering y clasificación
Cuantificación del vector de aprendizaje (CVA)	Clasificación
Teoría de resonancia adaptativa (TRA)	Clustering y clasificación
Funciones de base radial	Aproximación de funciones, clasificación, pronóstico y control
Conteopropagación	Clasificación y aproximación de funciones
ADALINE-MADALINE	Sistemas de comunicación y control

Fuente: propia

4.5 SISTEMAS NEURODIFUSOS

Estos sistemas son el resultado de la simbiosis de dos tecnologías: las Redes Neuronales y los Sistemas difusos, las cuales compiten en el campo del diseño de sistemas inteligentes con las técnicas de la Inteligencia Artificial (IA) y las de la Teoría de Control (TC) convencional e incluso las mejoran, en el caso en que estos sistemas han de trabajar en entornos ruidosos, cambiantes y con

cierto grado de imprecisión e incertidumbre.

Tratan de explotar la complementariedad existente entre ambas tecnologías, aprovechando los méritos, y eludiendo las lagunas de cada una de ellas por separado. Las redes neuronales, debido principalmente a su capacidad de aprendizaje y adaptación, resultan apropiadas para sistemas que procesan y adquieren automáticamente información numérica proveniente de sensores o que resuelven problemas de reconocimiento de patrones o de optimización. Sin embargo su modo de procesar la información resulta difícil de expresar en términos de lenguaje natural, (se dice que las redes neuronales no son transparentes al conocimiento estructurado), lo que muchas veces dificulta o impide explotar el conocimiento del experto en las tareas de diseño.

Por su parte los sistemas difusos, debido principalmente a su habilidad para incorporar a su estructura información lingüística tomada del experto humano (transparencia), son especialmente atractivos para automatizar sistemas que son controlados con éxito por operadores humanos y que bien por su complejidad, bien por su deficiente especificación, debida principalmente a las imprecisiones e incertidumbres del entorno en que se desarrollan, resultan difíciles o muy costosos de modelar con la simplicidad necesaria para ser tratados por otros métodos. Sin embargo su principal dificultad estriba su falta de adaptabilidad.

Los sistemas neuro-difusos, además de los rasgos que son comunes a ambas tecnologías, (mapeado no lineal, tolerancia a fallos, operación en tiempo real, etc.), se benefician de:

- La transparencia propia de los Sistemas difusos que mejora la comprensión de la Red Neuronal.
- La capacidad de aprender y adaptarse de las Redes Neuronales que aporta un mecanismo de sintonización automática, y adaptabilidad al Sistema Difuso.

Tanto las redes neuronales, como los sistemas de inferencia difusas son sistemas dinámicos que pueden ser considerados como aproximadores de funciones sin modelo, entendiendo por tal, sistemas que tienen la capacidad de estimar el valor la función que caracteriza su relación entrada-salida, para cualquier elemento de su soporte, sin necesidad de disponer de un modelo o descripción analítica de la misma. En ambos casos, esta estimación es realizada partir de información adquirida por medio de ejemplos proporcionados por el diseñador.

Debido a su naturaleza, esencialmente numérica, ambos sistemas admiten un soporte matemático

riguroso y una caracterización algorítmica que favorece el uso de herramientas de cálculo para su evaluación, y que resulta atractiva para su implementación mediante circuitos electrónicos integrados, debido principalmente a su marcado carácter de procesamiento paralelo.

En un contexto más amplio la integración de los sistemas difusos y las redes neuronales sigue tres líneas diferentes de trabajo que da lugar a tres tipos diferentes de sistemas (Lin y otros, 2013; Kaholi y otros, 2013):

- **Sistemas neuro difusos:** usan las redes neuronales como herramienta para el diseño de Sistemas difusos.
- **Redes neuronales difusas:** traducen a términos de los sistemas difusos las redes neuronales tradicionales.
- **Sistemas híbridos neuro-difusos:** incorporan ambas tecnologías en un nuevo sistema híbrido.

Los sistemas neuro-difusos, son sistemas difusos que aprovechan métodos de ajuste propios de las redes neuronales; por tanto en ellos se siguen identificando con los bloques fundamentales del sistema difuso (base de reglas, máquina de inferencia, e interfaces de fuzzificación y defuzzificación). Las redes neuronales son utilizadas para aumentar y mejorar la capacidad de procesamiento del sistema difuso, en tareas como la definición y ajuste de las funciones de pertenencia y el diseño y ajuste de la base de reglas. Como estos sistemas siguen siendo sistemas difusos su principal área de aplicación sigue siendo la del control.

Las redes neuronales difusas, mantienen las propiedades y estructura básicas de las redes neuronales e introducen conceptos de la Lógica Difusa en alguno de sus elementos. En algunos casos los conceptos difusos se introducen en la topología de la red. Así aparece la neurona difusa en la que su respuesta deja de ser una función de tipo sigmoïdal, para ser sustituida por una relación difusa. En otros casos, la formalización del conocimiento en forma de conjuntos difusos es usada para mejorar las propiedades de los algoritmos de aprendizaje, el modo de actualización de pesos y la velocidad de convergencia, aumentando sus capacidades de interpretación. Debido a que estos sistemas son básicamente redes neuronales, su campo de aplicación sigue siendo fundamentalmente el de aplicaciones de reconocimiento de patrones.

En los sistemas híbridos neuro-difusos, los sistemas difusos y las redes neuronales realizan su propio trabajo de forma independiente y complementaria y cooperan en las diferentes funciones

para cumplir el objetivo común del sistema global. Son en general sistemas cuya arquitectura depende mucho del tipo de aplicación y resultan adecuados tanto para tareas de control como de reconocimiento de patrones.

Los sistemas objeto de esta tesis quedan están enmarcados dentro del campo de los sistemas neuro-difusos por ser su estructura básica la de la red adaptativa ANFIS que permite trasladar los diversos algoritmos de inferencia difusa a una topología de red neuronal, incorporándoles la capacidad de aprendizaje. Las principales características de esta red serán descritas con posterioridad en este capítulo.

4.6 SISTEMA DE INFERENCIA TAGAKI-SUGENO

De las diferentes maneras de realizar este algoritmo difuso que se proponen en la literatura (Chen y otros, 2013) y (Jang y Sun, 1995), el sistema de inferencia de Takagi-Sugeno donde el consecuente de regla es un valor constante o singleton (Takagi y Sugeno, 1989), también llamado sistema Takagi-Sugeno de orden cero, es el más popular y más ampliamente utilizado en las realizaciones hardware. Esto es debido a que establece un muy buen compromiso entre la simplicidad, en cuanto diseño y circuitos necesarios para su realización, y la eficiencia en el control. A continuación se describen su principales características, tal y como es empleado en la metodología de evaluación de la usabilidad de interfaces.

En el sistema de inferencia Takagi-Sugeno de orden cero, cada una de las reglas difusas toma la forma

$$SI (x_1 \text{ es } A_{1k}) \text{ Y } (x_2 \text{ es } A_{2k}) \text{ Y } \dots (x_M \text{ es } A_{Mk}), \text{ Entonces } y = y^*_k \quad (1 \leq k \leq N)$$

Donde y^*_k es el valor singleton asociado a la k -ésima regla, y N el número total de reglas del sistema. Esta elección resulta ventajosa para su realización hardware porque permite implementaciones más simples, con lo que se reduce la ocupación de área y el consumo de potencia, a la vez que facilita la incorporación de programabilidad, al mejorar la interpretación de las reglas. Además, se demuestra que el sistema difuso así obtenido se comporta como aproximador universal de funciones, siendo capaz de aproximar cualquier superficie de control con el grado de precisión que se desee, (Gao y otros, 2012) y (Wang y otros, 2012).

La superficie de control se obtiene como una combinación lineal de *funciones base* según la expresión

$$y = f(x) = \sum_{k=1, N} y_k^* w_k^*(x) \quad (4.1)$$

Una función base multidimensional normalizada, correspondiente a la salida del antecedente de la k -ésima regla difusa, mientras que el coeficiente es el valor singleton asociado a su consecuente. Con la normalización se garantiza que la salida del sistema en cualquier punto no toma valores mayores que el mayor de los valores singleton. En la expresión (5.1) los valores singleton son parámetros reales, mientras que las funciones base normalizadas se calculan según la expresión,

$$w_k^*(x) = \frac{w_k(x)}{\sum_{k=1, N} w_k(x)} \quad (4.2)$$

Donde corresponde con la salida del antecedente de la k -ésima regla difusa y se obtiene a partir de las entradas según la expresión,

$$w_k(x) = \min \{s_{1k}(x_1), s_{2k}(x_2), \dots, s_{Mk}(x_M)\} \quad (4.3)$$

En esta expresión $\min\{\bullet\}$ es el operador mínimo multidimensional, mientras que $s_{ik}(x_i)$, son las funciones de pertenencia sobre las que se evalúan el grado de coincidencia entre las entradas y las etiquetas lingüísticas difusas.

Estas funciones de pertenencia, junto con los valores singleton, que en el contexto de aproximación de funciones pueden ser considerados como muestras de la superficie de control deseada, constituyen los elementos primarios de información a partir de los cuales el sistema de inferencia difusa reconstruye la superficie de control completa. De manera que, como muestra la expresión (4.1), la salida y para un vector de entrada x , se obtiene agregando de forma ponderada las muestras de la superficie de control deseada, siendo el factor de ponderación el resultado de la evaluación de cada función base $w_k^*(x)$ para dicho vector de entrada.

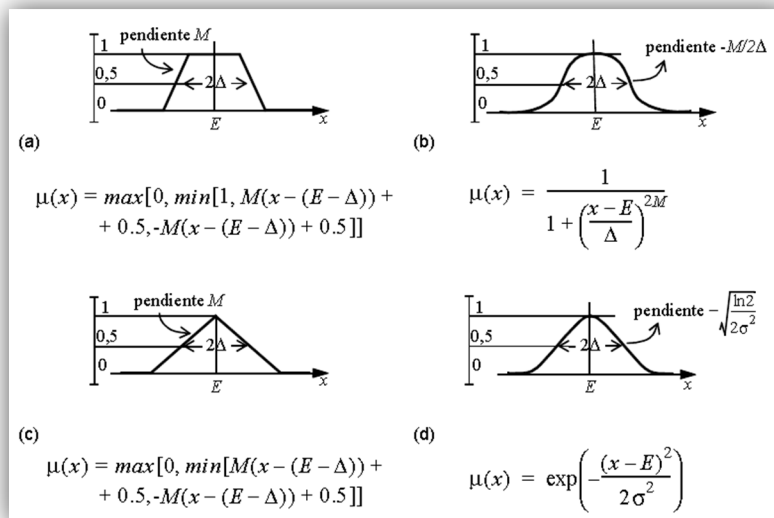
En la [figura 4.6](#) se muestran diferentes funciones utilizadas para representar a las funciones de pertenencia unidimensionales, junto con su expresión analítica (Jang y Sun, 1995). Cada una de

ellas queda perfectamente caracterizada a partir de tres parámetros:

- Anchura (2Δ), que se define como la longitud del intervalo que determinan las abscisas en los puntos en que la función toma el valor 0.5;
- Centro (E_C), que se define como el punto medio de dicho intervalo; y
- Pendiente (ζ), que se define como el valor absoluto de la pendiente de la función en los puntos de valor 0.5, o puntos de cruce.

Así, para aproximar cualquier función arbitraria, un primer paso consiste en determinar cuántas de estas funciones de pertenencia hay que emplear por cada entrada, y, para cada una de ellas, cuál es el valor que ha de tomar cada uno de estos tres parámetros.

Figura 4.6. Funciones típicas de pertenencia: a) trapezoidal, b) campana, c) triangular y d) gaussiana

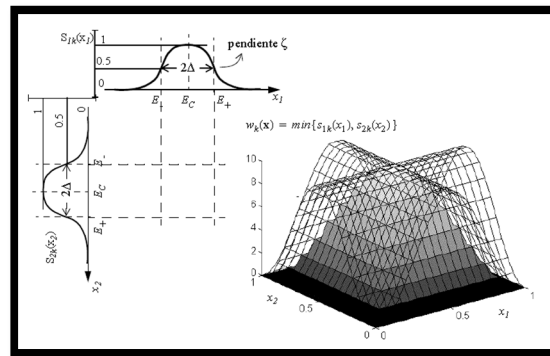


Fuente: adaptado de Navas, 2000.

En la [figura 4.7](#) se representa de forma cualitativa el procedimiento para obtener una función base bidimensional, que corresponde al antecedente de regla para un sistema de dos entradas, a partir de funciones de pertenencia unidimensionales del tipo campana $s_{1k}(x_1)$, y $s_{2k}(x_2)$, en este caso se tiene que:

$$w_k(x) = \min \{s_{1k}(x_1), s_{2k}(x_2)\}$$

Figura 4.7. Obtención de función de pertenencia bidimensional



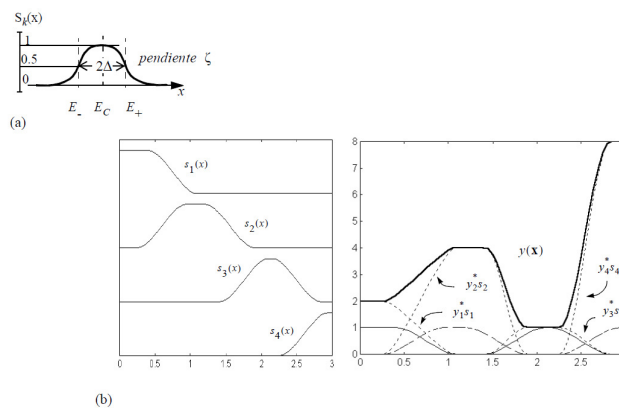
Fuente: adaptado de Navas, 2000.

A fin de ilustrar el procedimiento de construcción de la superficie de control a partir de la información local representada por las funciones de pertenencia y los valores Singleton, en la [figura 4.8](#), se muestra el ejemplo simple de un controlador unidimensional con cuatro reglas. Para este controlador cada una de las cuatro reglas se enuncia.

Si x es A_k , Entonces $y = y^*_k$, con $1 \leq k \leq 4$

Y está asociada a cada una de las cuatro etiquetas A_k , que se han definido en su espacio de entrada. En la parte derecha de la figura 4.8 b) se muestran las cuatro funciones de $s_k(x)$ pertenencia, que en este ejemplo aparecen auto-normalizadas (Wang y otros, 2012).

Figura 4.8 Controlador unidimensional con cuatro reglas. a) Forma de la función de pertenencia unidimensional; b) Función para un controlador difuso unidimensional con Singleton en el consecuente.



Fuente: adaptado de Navas, 2000.

La validez de cada regla para un valor concreto de la variable de entrada se obtiene evaluando la correspondiente función de pertenencia para esa entrada. Si la entrada actual corresponde con el centro del intervalo para la k -ésima función de pertenencia, entonces y la salida del sistema viene dada por el valor del k -ésimo singleton. Para cualquier punto distinto de los centros de los intervalos de las funciones de pertenencia la salida no coincide con ninguno de los valores singleton y se obtiene usando la siguiente expresión:

$$y = y_1^* s_1^*(x) + y_2^* s_2^*(x) + y_3^* s_3^*(x) + y_4^* s_4^*(x) \quad (4.4)$$

Donde

$$s_k^* = s_k / \left[\sum_{k=1,4} s_k \right]$$

Es la función de pertenencia unidimensional normalizada. En la figura 4.8 b), se ilustran diferentes pasos para evaluar las expresión (4.4) y obtener la curva de salida y . En la parte izquierda se pueden ver las cuatro funciones de pertenencia $s_k(x)$, mientras que en la parte derecha se muestra el resultado de ponderar cada una de ellas con su correspondiente valor singleton $s_k^*(x)y_k^*$, y finalmente la agregación de todas para obtener y .

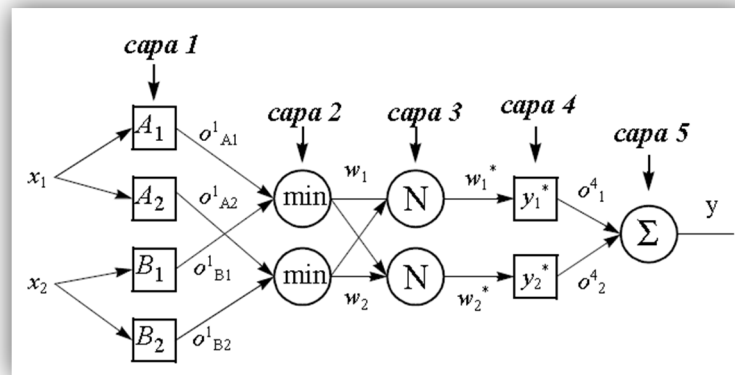
4.7 ARQUITECTURA ANFIS

En el contexto de esta tesis, resulta de especial importancia la representación como red adaptativa de un sistema de inferencia difusa o en inglés Adaptive-Networks Based Fuzzy Inference Systems, ANFIS (Jang, 1993), que permite mapear sobre una estructura de red neuronal cualquiera de los tres principales tipos de sistemas de inferencia difusa (Mamdani, Tsukamoto, Takagi-Sugeno). En el caso particular del sistema de Takagi-Sugeno la arquitectura ANFIS se muestra en la [figura 4.9](#) para dos entradas y dos reglas difusas,

SI x_1 es A_1 Y x_2 es B_1 , Entonces y_1^*

SI x_1 es A_2 Y x_2 es B_2 , Entonces y_2^*

Figura 4.9. Arquitectura ANFIS para un controlador difuso



Fuente: propia

La arquitectura ANFIS correspondiente a estas dos reglas consta de cinco capas, siendo la función asociada a cada nodo:

- **Capa 1:** los nodos de esta capa tienen asociada la función de pertenencia correspondiente a la etiqueta lingüística del nodo,

$$o_{A_i}^1 = \mu_{A_i}(x_1), \quad o_{B_i}^1 = \mu_{B_i}(x_2), \quad i = 1, 2 \quad (4.5)$$

- **Capa 2:** la función de este nodo es fija y consiste en realizar la t-norma entre los grados de pertenencia dados por la *Capa 1*, dando el peso de la regla en el proceso de obtención del consecuente. En (Jang, 1993) se propone el operador producto para la realización de la t-norma, y como tal se asocia a este nodo. Sin embargo, por razones de conveniencia desde el punto de vista de la implementación hardware, el operador mínimo se escoge aquí para realizar la t-norma,

$$w_i = \min(\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2)) \quad (5.6)$$

La falta de diferenciabilidad de este operador puede resultar un inconveniente en algunos algoritmos de aprendizaje, razón por la cual (Jang, 1993) escoge el producto, pero existen alternativas tanto en el sentido de sustituirlos por operadores pseudo-mínimos derivables (Li y otros, 2012), como en el de escoger algoritmos de aprendizaje que no exijan diferenciabilidad (Zhang y otros, 2013).

- **Capa 3:** esta capa tiene asociada la función,

$$w_i^* = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (5.7)$$

es decir, da el peso de la regla normalizado con respecto al peso de todas las reglas.

- **Capa 4:** multiplica el peso normalizado del antecedente de la regla por el valor del singleton asociado al consecuente,

$$o_i^4 = w_i^* y_i^* \quad i = 1, 2 \quad (5.8)$$

- **Capa 5:** contiene un sólo nodo que agrega los singletons ponderados para obtener la salida del sistema.

5. METODOLOGÍA AUTOMATIZADA PARA LA EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD DE INTERFACES HUMANO-MÁQUINA

Como se ha mencionado en la tesis, en la actualidad existen diferentes aproximaciones sobre la representación, modelación, interpretación y análisis del funcionamiento de plantas automatizadas de procesos desde el punto de vista de la ingeniería, que solo son útiles en escenarios estáticos. Por el contrario, en un escenario dinámico, el operador utiliza un modelo mental sobre funcionamiento de una planta por la información que recibe a través de interfaces humano-máquina. Con base en ese modelo mental, durante la operación de la planta, el operadores que toma de decisiones y pueden ser determinantes particularmente en situaciones de alto riesgo. La elaboración de esa estructura mental, depende de modelos del comportamiento humano y de los procesos cognitivos durante la interacción, que fueron analizados en los capítulos anteriores.

Dado que el elemento más importante dentro del proceso de interacción entre el operador y el artefacto es la interfaz, es necesario evaluar su usabilidad, básicamente para:

- Comprobar la funcionalidad de las pantallas de la interfaz.
- Analizar el efecto de la interfaz durante la interacción entre el operador y la planta.
- Identificar los problemas de diseño de la interfaz durante la interacción con el operador.

El objetivo de esta tesis, es desarrollar una metodología automatizada para la evaluación de la usabilidad de interfaces humano-máquina para la supervisión de procesos, con el fin de identificar problemas específicos de su diseño que limitan la interacción con el operador. A continuación, se describen los pasos de la metodología que puede ser utilizada en cualquier planta automatizada de proceso, tomando como soporte el concepto de sistema cognitivo conjunto.

El sistema tecnológico de la metodología de evaluación de usabilidad, consta de un sistema de adquisición de datos para supervisión y control de procesos, con la utilidad de diseño de interfaces para la interacción con el operador de la planta. Una aplicación para el registro de eventos de interacción que se encuentra incorporada en el sistema de supervisión o que puede ser instalado como una aplicación adicional, un sistema de conteo y clasificación de los eventos de interacción generados en criterios de usabilidad y un sistema de inferencia difuso basado en la adaptación de

una red neuronal. El sistema tecnológico fue entrenado con los datos de las interfaces de dos procesos que fueron evaluadas por un experto en usabilidad. Estos son los pasos seguidos por la metodología:

Paso 1. El lugar de realización de la evaluación: la tabla descriptiva presentada al final del capítulo 3, se describe los métodos que se pueden ser aplicados en un laboratorio, en un entorno natural o en ambos. Para el entrenamiento del sistema tecnológico de éstaa metodología se aplicó en dos lugares, una sala de automatización de procesos que funciona como un entorno natural de supervisión ([figura 5.1](#)) y una sala especialmente equipada para realizar evaluaciones como laboratorio de usabilidad ([figura 5.2](#)). La sala de automatización consta de los siguientes elementos:

- 4 Bancos de trabajo para el montaje de procesos eletroneumáticos con diversos dispositivos
- 4 Bancos de trabajo para el montaje de procesos hidráulicos con diversos dispositivos
- 8 Autómatas programables Mitsubishi FX3U48MR
- 2 Autómatas modulares gama baja Mitsubishi serie alfa
- 1 Autómata modular gama alta Mitsubishi serie Q
- 1 Módulo de Interfaz Humano Máquina táctil Mitsubishi GOT1000
- 1 Sistema de control de movimientos con servomotores Mitsibishi BJ3
- 2 Sistema de control de velocidad de motores por variación de frecuencia Mitsubishi E700.
- 5 Arquitecturas de red de comunicación industrial (Modbus 232, Profibus, CCLink, Ethernet
- 4 Licencias de FX Developer (PLC)
- 4 Licencias de GX Gonfigurator (red)
- 4 Licencias de FR Configurator (variadores)
- 4 Licencias de GT Works (IHM)
- 4 Licencias de AlphaWin (gama baja)
- 1 Licencia de Wonderware developer studio (Monitorización)

La sala de evaluación de usabilidad consta de los siguientes elementos:

- 1 Un tablero interactivo Smart Board (pantalla sensible al tacto) de 165.7 cm × 125.7 cm × 13 cm, con resolución al tacto de 4000 × 4000
- 2 Proyector para tablero interactivo Smart Board
- 3 20 computadores personales
- 4 20 puestos de trabajo removibles.
- 5 Protocolo de comunicación inalámbrica entre el tablero interactivo Smart Board y los computadores personales.

- 6 Módulo de conversión RS-232 a USB para comunicación serial al tablero interactivo SmartBoard.
- 7 Sistema de audio USB con dos bafles de 15 watts montados sobre el tablero interactivo SmartBoard.
- 8 Borradores y lápices de colores especiales para el tablero.
- 9 Licencias de SMART Notebook

Esta tecnología ha sido desarrollada para ser utilizada en entornos educativos que para este trabajo permite:

- Utilización por cualquier persona con conocimientos básicos de interfaces de procesos. Su uso es simple e intuitivo.
- Manipulación directa de las pantallas de la interfaz por parte del operador del proceso.
- Utilización de manera eficiente y cómoda y con un mínimo de fatiga.
- Comunicación de manera eficaz de la información necesaria para el operador, independientemente de las condiciones ambientales o las capacidades sensoriales.
- Minimización de los riesgos y las consecuencias adversas de acciones accidentales o no deseadas.
- Por su tamaño y espacio adecuados, enfocar, alcanzar, manipular y usar, independientemente del tamaño del cuerpo del operador, la postura o la movilidad.
- Escribir notas relacionadas con la interacción con el proceso sobre las pantallas de la interfaz.

Figura 5.1. Sala de automatización de procesos para evaluación como entorno natural



Fuente: propia

Figura 5.2. Sala equipada como laboratorio de usabilidad



Fuente: propia

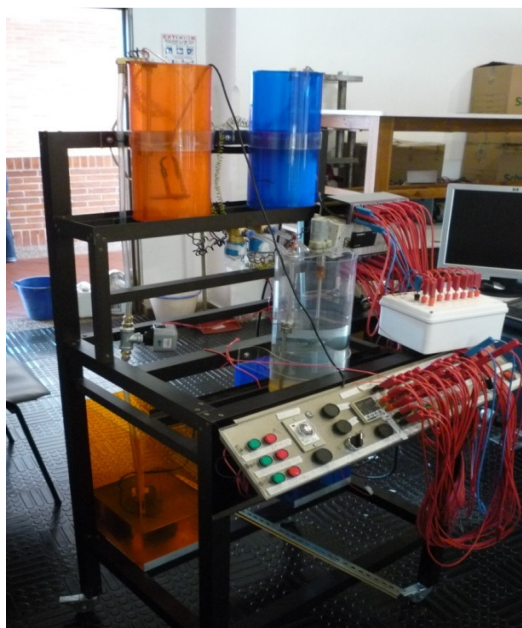
Paso 2. El artefacto (planta): una planta industrial es el conjunto de elementos (máquinas y mecanismos), cuya función es transformar materia o energía de acuerdo con un proceso establecido. Actualmente, la automatización de la operación de la planta, se ha constituido en la tarea esencial para el ser humano en las industrias actuales. La automatización de la operación comprende el conjunto de acciones encaminadas a asegurar el correcto funcionamiento, incluso en situaciones de riesgo, mediante la vigilancia para detectar la presencia de comportamientos anómalos y actuar en consecuencia ajustando parámetros, cambiando consignas y activando accionamientos para conservar la capacidad operativa del proceso o prevenir problemas mayores. Entonces, con la automatización, la planta igualmente contiene varios artefactos, que están diseñados para que sean agentes inteligentes y su principal función es ayudar al operador humano en el control del proceso. Esto quiere decir, que si no se tiene en cuenta la interacción entre dos sistemas cognitivos, el humano y el que constituye el artefacto, será insuficiente para explicar el funcionamiento de un sistema de supervisión. El sistema de supervisión de la planta realiza las tareas de:

1. Adquisición de señales provenientes de instrumentos distribuidos en la planta (sensores, transductores, tratamiento de señales, comunicación industrial).
2. Procesamiento numérico de las señales (correlaciones, métodos estadísticos, análisis espectral, filtrado, etc.)
3. Organización de la información, relativa al proceso (variables, imágenes, manuales, bases de datos, abstracciones, etc.)
4. Presentación de la información a través de interfaces de usuario

ARTEFACTO 1: PLANTA PARA UN PROCESO DE DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS

El primer artefacto es una planta automatizada para un proceso de dosificación de líquidos. Ésta planta realiza operaciones de control de nivel y temperatura de dos sustancias ([figura 5.3](#)).

Figura 5.3 Planta de dosificación de líquidos



Fuente: propia

La supervisión del proceso se realiza por un operador a través de una interfaz remota, desarrollada en un paquete comercial. En la planta, es posible programar fallas, con el fin de estimular al operador al análisis y toma de decisiones a través de la interfaz. La planta se compone de los elementos descritos en la [tabla 5.1](#), el diagrama de instrumentación P&ID se presenta en la [figura 5.4](#). La descripción del proceso es el siguiente:

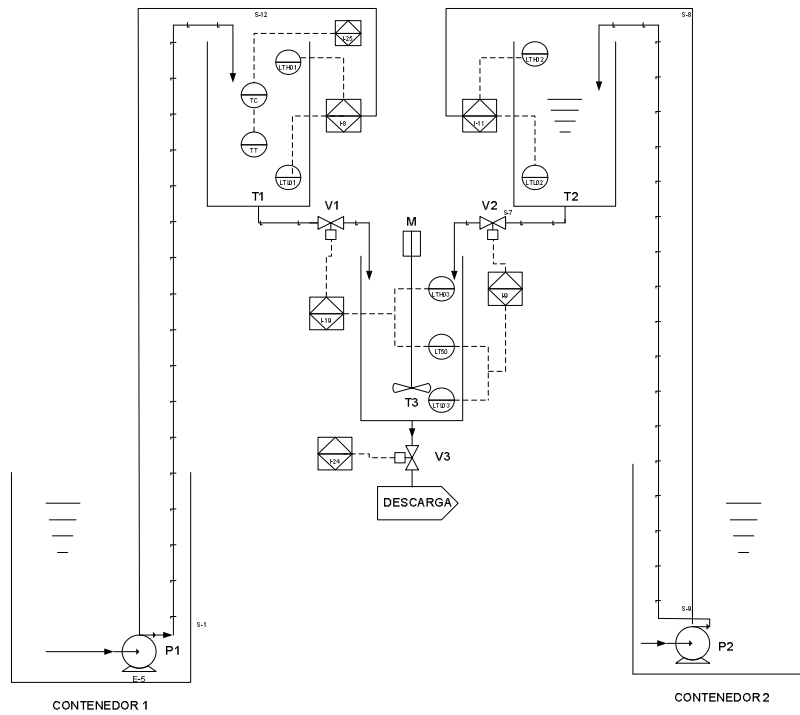
- *Tanque 1 (sustancia A)*: si está vacío (LTLTK1, límite inferior) se activa la bomba (P1) para llenar el tanque, cuando el nivel del tanque llega a su límite superior (LTHTK1), un sensor de temperatura (TT) toma la medida y de acuerdo a la consigna se activa o no la resistencia (R) calentando la sustancia A.
- *Tanque 2 (sustancia B)*: si está vacío (LTLTK2, límite inferior) se activa la bomba (P2), para llenar el tanque, hasta el nivel superior (LTHTK2). Este tanque igual que el tanque 1 permanecerá con agua ya que al detectarse niveles bajos se activan las bombas.

- *Tanque 3*: si está vacío (LTLTK3, nivel inferior) se activa la electroválvula (V2) dando paso al flujo de la sustancia *B* contenida en el tanque 2 hasta llegar al nivel medio (LT50-50TK3). Estando en este nivel y la sustancia *A* contenida en el tanque 1 en su temperatura adecuada, se activa la electroválvula (V1) para llenar el tanque hasta el nivel superior (LTHTK3). Cuando exista el 50% de la sustancia *A* y el 50% de la sustancia *B*, se activa el motor (M) del agitador de la mezcla durante un tiempo determinado, donde posteriormente se desactiva paralelamente activando la electroválvula (V3) para vaciar el tanque, enviando la mezcla a los tanques de almacenamiento para continuar con el ciclo nuevamente.

Tabla 5.1. Identificación de cada elemento del proceso de dosificado de líquidos

T1	Tanque 1
T2	Tanque 2
T3	Tanque 3
P1	Bomba 1
P2	Bomba2
M1	Motor de mezclador
R	Resistencia eléctrica
V1	Electroválvula tanque T1
V2	Electroválvula tanque T2
V3	Electroválvula tanque T3
LTH01	Trasmisor de nivel bajo tanque T1
LTL01	Trasmisor de nivel alto tanque T1
LTH02	Trasmisor de nivel bajo tanque T2
LTL02	Trasmisor de nivel alto tanque T2
LTH03	Trasmisor de nivel bajo tanque T3
LTL03	Trasmisor de nivel medio tanque T3
LTH01	Trasmisor de nivel alto tanque T3
TT	Sensor de temperatura
TC	Controlador temperatura tanque T1
FT	Sensor de Flujo
SP1	Sensor de intensidad bomba P1
SP2	Sensor de intensidad bomba P2
SV1	Sensor magnético electroválvula V1
SV2	Sensor magnético electroválvula V2
SV3	Sensor magnético electroválvula V3
SM	Sensor de intensidad motor M1
SR	Sensor de intensidad resistencia R
S3P	Selector 3 posiciones (automatic, off, manual)
SE3	Selector 2 posiciones (electroválvula3)
PHE	Pulsador de paro de emergencia
HP1	Pulsador piloto bomba P1
HP2	Pulsador piloto bomba P2
HV1	Pulsador electroválvula V1
HV3	Pulsador electroválvula V3
PV1	Piloto verde 1 (visor nivel T1 min)
PV2	Piloto verde 2 (visor de nivel T2 min)
PV3	Piloto verde 3 (visor de nivel T3 min)
PR1	Piloto rojo 1 (visor de nivel T1 max)
PR2	Piloto rojo 2 (visor de nivel T2 max)
PR3	Piloto rojo 3 (visor de nivel T3 max)

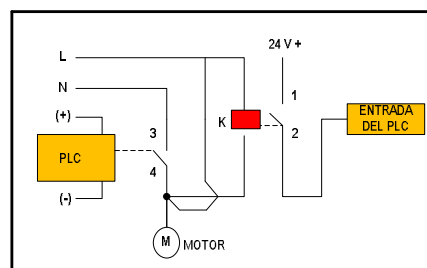
Figura 5.4 Diagrama P&ID del proceso de dosificación de líquidos



Fuente: González y otros, 2009.

Las fallas por intensidad de corriente son producidas por el aislamiento de voltaje en el circuito, es decir, si el circuito está abierto, el sistema detecta la falla solamente en el tramo donde se presenta el aislamiento de voltaje. Este tipo de falla fue ubicada por tramos en el circuito ([figura 5.5](#)).

Figura 5.5 Circuito del sensor de intensidad de corriente on-off



Fuente: González y otros, 2009.

Cuando se activan las bombas pero no fluye líquido por la tubería, se presenta una falla en la fase de llenado de tanques. Esta falla es detectada por sensores de flujo instalados en los circuitos hidráulicos. Las fallas eléctricas de las electroválvulas V1, V2 y V3, son detectadas por un sensor

ubicado en cada una, si en la fase de drenaje del tanque (1, 2 o 3) el interruptor no se activa, entonces el sistema detecta una falla en el solenoide de la válvula respectiva. En [tabla 5.2](#) se relacionan las fallas que se pueden programar durante la operación de la planta.

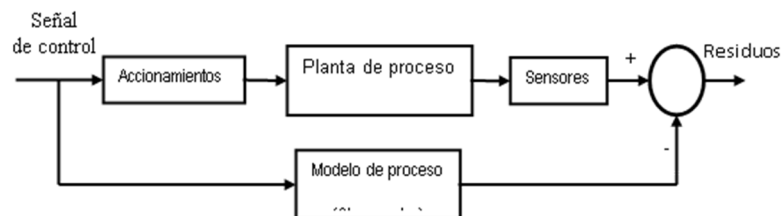
Tabla 5.2. Relación de fallas presentadas en la planta para el proceso de dosificado de líquidos.

Nº	Cód.	Descripción	Cód.	Descripción de la falla
1	V1	Válvula automática a la descarga del tanque T1 (abastece de líquido al tanque de mezclado).	O E D	Falla a la apertura. Falla al cierre. Falla al mantenimiento de la posición abierta.
2	V2	Válvula automática a la descarga del tanque T2 (abastece de líquido al tanque de mezclado).	O E D	Falla a la apertura. Falla al cierre. Falla al mantenimiento de la posición abierta.
3	V3	Válvula automática a la descarga del tanque T3 (descarga de la mezcla de sustancia así el dosificado).	O E D	Falla a la apertura. Falla al cierre. Falla al mantenimiento de la posición abierta.
4	P1	Bomba de abastecimiento de líquido al tanque T1.	S T	Falla al arranque. Falla por trabajo en vacío.
5	P2	Bomba de abastecimiento de líquido al tanque T2.	S	Falla al arranque.
6	M	Motor del mezclador para el tanque T3	T	Falla al arranque.
	R	Resistencia térmica para el calentamiento de sustancia en el T1.	R	Falla por resistencia abierta.

Fuente: González y otros, 2009.

Para la detección de fallas, se utilizó el método de generación de residuos basado en observadores de estados. Este método, requiere de un modelo de proceso que se ejecuta en un computador, por ende el modelo y el proceso funcionan de manera paralela desde su inicio. En el computador, las señales de interés del proceso son comparadas con las del modelo, si ocurre una falla, el sistema la detecta y lo informa a través de la interfaz de supervisión (ver [figura 5.6](#)).

Figura 5.6 Esquema del sistema de detección de fallas

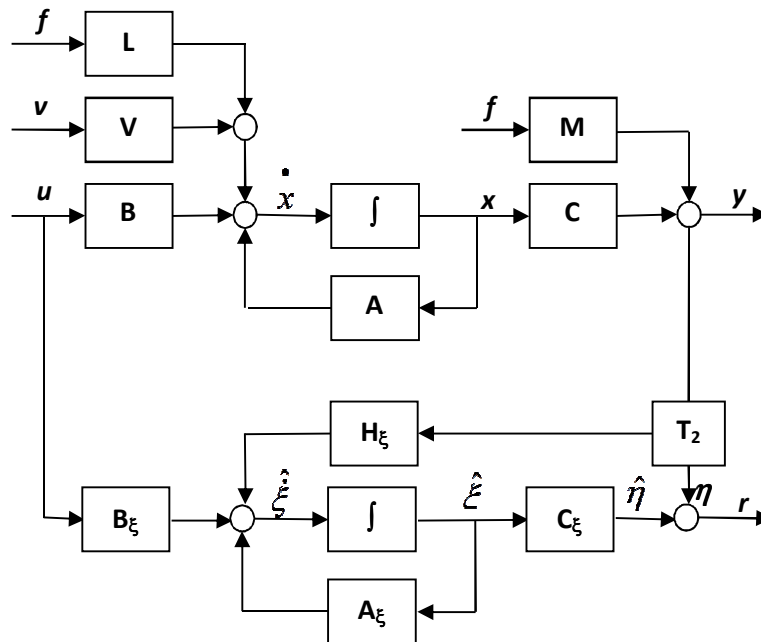


Fuente: propia

La aplicación del sistema para la detección de fallas del proceso de dosificado de líquidos se llevó a cabo utilizando herramientas computacionales de modelamiento, simulación y monitorización de procesos. Para el modelamiento se utilizó stateflow[®] de Matlab[®]. Stateflow es

una herramienta interactiva de modelamiento gráfico que trabaja con Simulink® para modelar y simular procesos ejecutados por eventos discretos o híbridos. El objetivo es reconstruir la salida por un modelo en el espacio de estado que genere solamente residuos para las fallas $f(t)$, y no para las señales medibles de entrada $u(t)$ y para las señales no medibles (desconocidas) $v(t)$ (Rosa y Silvestre, 2013), ver [figura 5.7](#).

Figura 5.7 Estructura del observador a la salida para la detección de fallas



Fuente: propia.

El proceso entonces está descrito por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Vv(t) + Lf(t) \quad (5.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Mf(t) \quad (5.2)$$

El objetivo es generar residuos, independientes de las entradas desconocidas $v(t)$. Entonces, la transformación lineal

$$\xi(t) = T_1 x(t) \quad (5.3)$$

Es aplicada para construir un observador con nuevas variables de estado $\xi(t)$. La salida del

observador es $\eta(t)$. Por lo tanto, se genera un error a la salida no directa con la salida del proceso $y(t)$, pero, un error a la salida con una transformación

$$\eta(t) = T_2 y(t) \quad (5.4)$$

El modelo del proceso transformado sin fallas bajo la influencia de las perturbaciones será entonces

$$\dot{\xi}(t) = A_\xi \xi(t) + B_\xi u(t) \quad (5.5)$$

$$\eta(t) = C_\xi \xi(t) \quad (5.6)$$

Y el correspondiente observador de estado, visto en la figura, es

$$\dot{\hat{\xi}}(t) = A_\xi \hat{\xi}(t) + B_\xi u(t) + H_\xi y(t) \quad (5.7)$$

$$\hat{\eta}(t) = C_\xi \hat{\xi}(t) \quad (5.8)$$

Este observador no retroalimenta la señal de error de las salidas, pero tiene el carácter de un modelo del proceso en paralelo. El error de los estados es

$$\tilde{\xi}(t) = \hat{\xi}(t) - T_1 x(t) \quad (5.9)$$

Insertando las ecuaciones 5.1 y 5.3, se llega a

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}}(t) &= \dot{\hat{\xi}}(t) - T_1 \dot{x}(t) \\ \dot{\tilde{\xi}}(t) &= A_\xi \tilde{\xi}(t) + (A_\xi T_1 + H_\xi C - T_1 A)x(t) + (B_\xi - T_1 B)u(t) - T_1 Vv(t) + (H_\xi M - T_1 L)f(t) \end{aligned} \quad (5.10)$$

y el residuo se halla con la ecuación 5.2, así

$$\begin{aligned}
r(t) &= \hat{\eta}(t) - \eta(t) \\
r(t) &= C_{\xi} \hat{\xi}(t) - T_2 y(t) \\
r(t) &= C_{\xi} \tilde{\xi}(t) + (C_{\xi} T_1 - T_2 C) x(t) + T_2 M f(t)
\end{aligned} \tag{5.11}$$

Ahora, para desacoplar el error de estado $\tilde{\xi}(t)$ y el residuo $r(t)$, de los estados desconocidos $x(t)$ de las perturbaciones desconocidas $v(t)$ y de las entradas $u(t)$, deben satisfacerse las siguientes ecuaciones

$$T_1 A - A_{\xi} T_1 = H_{\xi} C \tag{5.12}$$

$$B_{\xi} = T_1 B \tag{5.13}$$

$$T_1 V = 0 \tag{5.14}$$

$$C_{\xi} T_1 - T_2 C = 0 \tag{5.15}$$

Adicionalmente, la matriz del observador A_{ξ} es seleccionada como una matriz diagonal con polos estables. El conjunto de ecuaciones (5.12) a (5.15) puede solucionarse mediante la transformación de las ecuaciones de estado en la forma canónica de Kronecker (Frank y Wünnenberg, 1989), usando una asignación de eigen-estructura para el observador (Chen y Patton, 1999) o por un procedimiento iterativo basado en la descomposición del valor singular (Kinnaert, 1999).

Finalmente, el error de estado se convierte en

$$\tilde{\xi}(t) = A_{\xi} \tilde{\xi}(t) + (H_{\xi} M - T_1 L) f(t) \tag{5.16}$$

y el residuo en

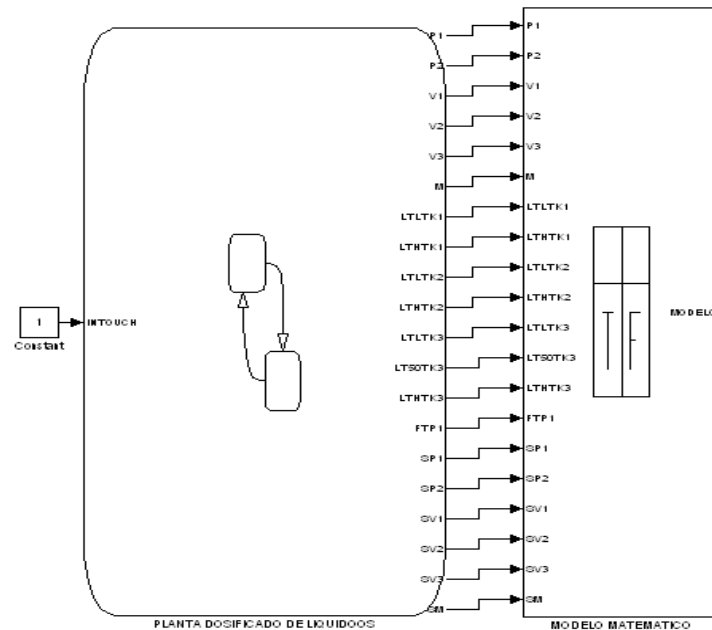
$$r(t) = C_{\xi} \tilde{\xi}(t) + T_2 M f(t) \tag{5.17}$$

Si los errores de estado tienden asintóticamente a cero, el residuo únicamente dependerá de las fallas $f(t)$ y no de las entradas desconocidas $v(t)$.

Para la ejecución de la secuencia de operación del modelo de la planta se utilizó la herramienta Stateflow[®] de Matlab[®] ([figura 5.8](#)). El modelo está representado por tres subsistemas que se encuentra en un súperestado llamado PLANTA que incluyen los siguientes comportamientos, indicando 1 como encendió y 0 como apagado:

1. Apagado o encendido del sistema basado en la acción sobre el selector en estado automático ubicado en el prototipo (on-off).
2. Apagado y encendido de la bomba sumergible (P1), sensor de flujo (FTP1) y sensor de aislamiento eléctrico (SP1) cuando se cumpla un tiempo establecido de 850 segundos y [TLTK1==1].
3. Apagado y encendido de la bomba sumergible (P2), sensor aislamiento eléctrico (SP2) cuando se cumpla un tiempo establecido de 450 segundos y enciende sensor de nivel [LTHTK2==1].
4. Encendido de la válvula (V2) y sensor de campo magnético (SV2) cuando se cumpla la condición [P1==0&P2==0] y apagado cuando se cumpla un tiempo establecido de 320000 segundos.
5. Encendido de la válvula (V1) y sensor de campo magnético (SV1) cuando se cumpla un tiempo establecido de 32000 segundos.
6. Apagado de la válvula (V1) y sensor de campo magnético (SV1) cuando se cumpla un tiempo de 38000 segundos y (LTHTK3==1)
7. Encendido del motor de mezclado (M), sensor de aislamiento eléctrico (SM) y sensor de nivel (LTHTK3) cuando se cumpla la condición del estado con el nombre de sensor_5.
8. Apagado del motor de mezclado (M), sensor de aislamiento eléctrico (SM), sensor de nivel (LTHTK3) y encendido válvula (V3), sensor de aislamiento (SV3) cuando se cumpla un tiempo establecido de 12000 segundos.
9. Apagado de válvula (V3), (SV3), (V2), (SV2), y (LTLTK3) cuando se cumpla un tiempo establecido de 42000 segundos.

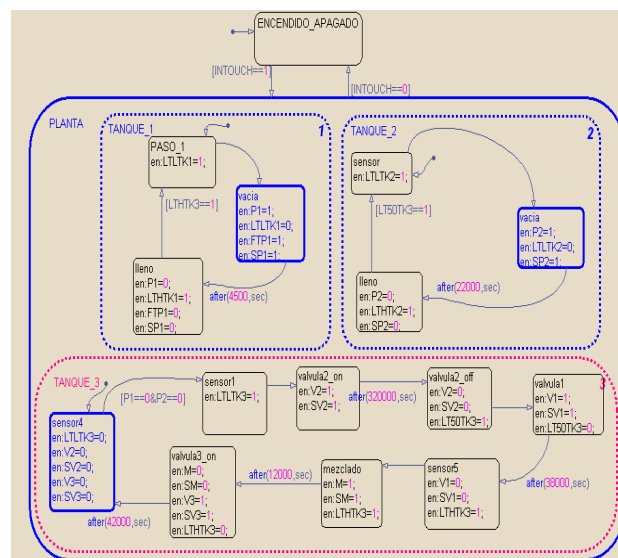
Figura 5.8 Esquema del modelo de proceso de dosificación en Stateflow[®].



Fuente: González y otros, 2009.

Cada vez que cambie de valor el selector se produce un cambio de estado en la máquina de estados raíz activándose alternativamente los estados PLANTA y ENCENDIDO. Cuando está activo el estado PLANTA se activan simultáneamente los tres subestados Tanque1, Tanque2 y Tanque 3. Ver [figura 5.9](#).

Figura 5.9 Diagrama de la secuencia de operación de la planta



Fuente: González y otros, 2009.

Para la detección de fallas fue necesario utilizar el protocolo de comunicación DDE (Dynamic Data Exchange) en Simulink®, que permite intercambiar datos entre aplicaciones de Windows. Este sistema de comunicación, se inició con el programa Excel que actuó como servidor de acuerdo a los datos enviados desde Matlab, que operó como cliente. Las condiciones y acciones de cada falla se representan con una tabla de verdad durante la simulación del modelo de la planta (figura 5.10).

Figura 5.10 Representación de las condiciones y acciones en tabla de verdad

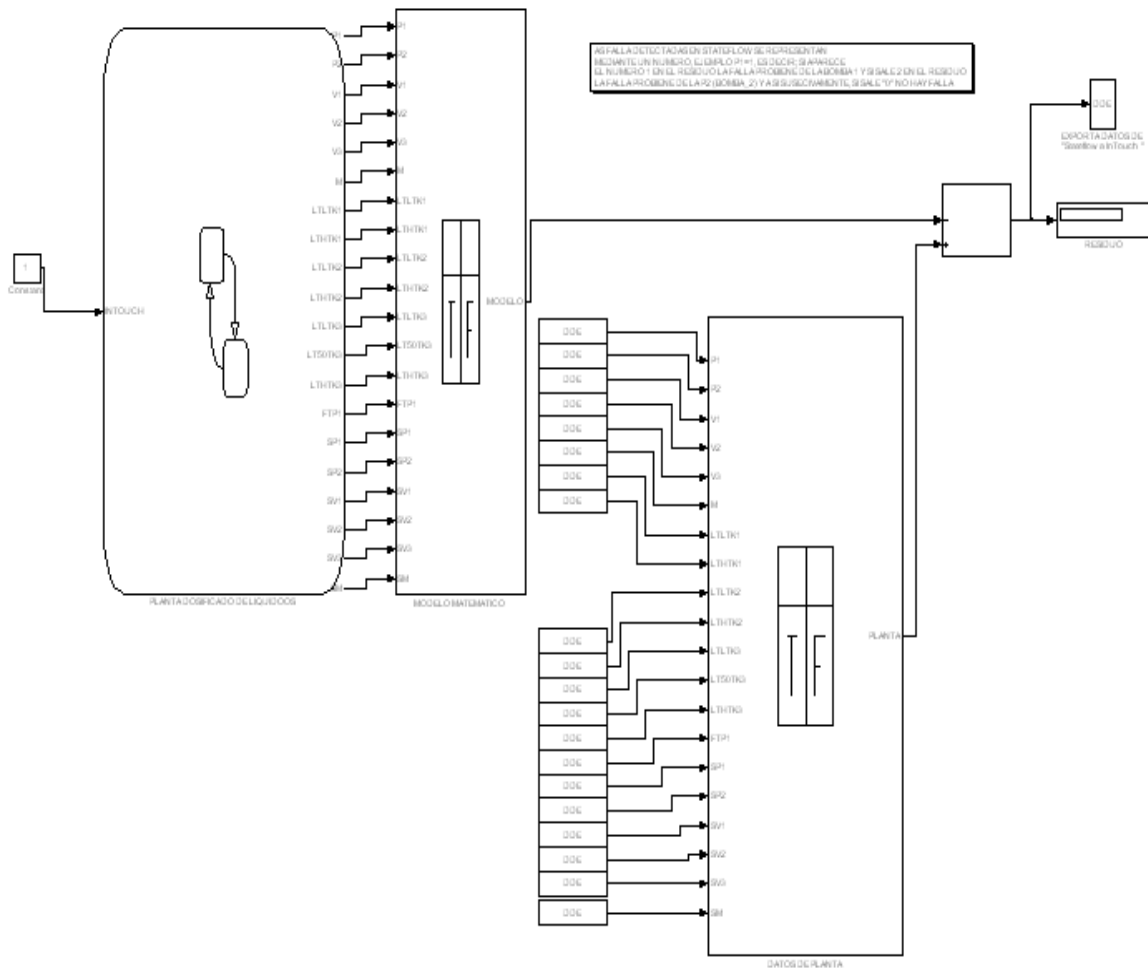
Block: MODELO_TABLA/DATOS DE PLANTA*											
File Edit Settings Add Help											
Condition Table											
	Description	Condition	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	
1	CONDICIÓN 1 ACTION 1	ESTAD01: P1 == 1	T	T	-	-	-	-	-	-	
2	CONDICIÓN 2 ACTION 2	ESTAD02: P2 == 1	-	-	T	-	-	-	-	-	
3	CONDICIÓN 3 ACTION 3	ESTAD03: V1 == 1	-	-	-	T	-	-	-	-	
4	CONDICIÓN 3 ACTION 3	ESTAD04: V2 == 1	-	-	-	-	T	-	-	-	
	Example condition 3	ESTAD05:									
Action Table											
#	Description	Action									
1	TANQUE DE ALMACENAMIENTO 1 SIN AGUA	A1: PLANTA = 1;									
2	CIRCUITO ABIERTO ENTRE EL SENSOR DE INTENSIDAD SP1 Y LA BOMBA 1	A2: PLANTA = 2;									
3	CIRCUITO ABIERTO ENTRE EL SENSOR DE INTENSIDAD SP2 Y LA BOMBA 2	A3: PLANTA = 3;									

Fuente: González y otros, 2009.

Las condiciones y acciones de la tabla de verdad establecen el residuo, es decir, cada vez que llegue un dato proveniente del paquete SCADA es comparado con el dato proveniente del modelo. Las fallas están representadas mediante números que aparecen en un display de Simulink, estos números indican el tipo de falla. Ejemplo: cuando aparece el número 1 en el display es porque se cumple la condición 1 (PLANTA= 1;) indicando que hay una falla en el tanque de almacenamiento

1 y cuando aparece el número 0 es porque no hay fallas en el proceso. la implementación del observador de estado se muestra en la [figura 5.11](#).

Figura 5.11 Implementación del observador de estado



Fuente: González y otros, 2009.

El prototipo utiliza un sistema de comunicaciones que soporta el intercambio de información entre los elementos de planta, la arquitectura de hardware implementada y los elementos de gestión. Permite implementar el sistema de controladores que realizará el intercambio de información entre los elementos de campo y el computador que realizará la recopilación de datos de información. La conexión se realiza mediante controladores genéricos. La comunicación realizada entre el dispositivo de control (PLC) y la interfaz humano-máquina del sistema de supervisión (SCADA) con la herramienta Top Server que cumple con el estándar OPC, para la comunicación entre aplicaciones.

El paquete de supervisión para la planta es InTouch de Wonderware®. InTouch como sistema de supervisión brinda la opción de presentar los datos enviados y recibidos por la comunicación entre las demás aplicaciones en tiempo real.

ARTEFACTO 2: PLANTA PARA UN PROCESO PASTERIZACIÓN

La pasterización es un proceso térmico realizado a líquidos, alterando lo menos posible su estructura física, sus componentes químicos y sus propiedades organolépticas, con el fin de reducir los agentes patógenos que pueden contener bacterias, protozoos, mohos y levaduras. La pasterización de alta temperatura en poco tiempo es un proceso que trata de eliminar las bacterias que contienen los productos alimenticios mediante el proceso de someterlos a altas temperaturas durante un breve espacio de tiempo. Este cambio brusco de temperatura mata dichas bacterias, quedando inertes en el producto. Tras la operación de pasterización, los productos se enfrían rápidamente y se sellan herméticamente con fines de seguridad alimentaria, por esta razón es básico el mecanismo de transferencia de calor en los alimentos.

Para el proceso de pasterización industrial, se utilizan plantas conformadas por un intercambiador de calor y un enfriador y los conductos y demás accesorios para la realización de la operación de pasterizado. Aquí se presenta un prototipo en miniatura PCT23 de planta de proceso de pasterización ([figura 5.12](#)). Del mismo modo que el caso anterior, la supervisión del proceso se realiza por un operador a través de una interfaz remota, desarrollada en un paquete comercial. En la planta, es posible programar fallas, con el fin de estimular al operador al análisis y toma de decisiones a través de la interfaz.

Figura 5.12 Planta para un proceso de pasterización PCT23.



Fuente: Armfield process plant trainer pct23, ficha técnica

La planta de pasteurización está compuesta por los siguientes elementos:

- Un depósito que almacena el producto que se desea tratar a través del proceso. Este depósito contiene una resistencia eléctrica que genera un flujo de calor en función de la potencia eléctrica, el depósito actúa como un acumulador de energía. Por otra parte, el calor acumulado se pierde a través del caudal que sale del depósito. El caudal del líquido que entra refleja la pérdida de calor si el circuito del líquido caliente es cerrado. El depósito tiene además, una válvula electrónica controlable para la alimentación del producto y una válvula manual para el vaciado. Para conocer la temperatura del líquido en el interior del tanque se utiliza un sensor (T2).
- Bomba peristáltica de producto. Es una bomba compuesta por un mecanismo giratorio que presiona a través de rodillos una manguera de goma, de manera que el líquido se ve obligado a avanzar por el interior del conducto, de esta manera, el producto no entra en contacto con la bomba directamente. El movimiento del líquido mediante el mecanismo giratorio de la bomba se denomina peristáltico y asemeja el sistema de empuje de los alimentos por el intestino humano. Ésta bomba extrae un caudal (qm^2), que vuelve a entrar a una temperatura inferior.
- Un intercambiador de calor de 3 fases. Permite el intercambio de calor entre líquidos que circulan a diferentes caudales y temperaturas por sus conductos internos. Estos conductos son dos circuitos internos individuales entre los que se transmite el calor por contacto y convección entre el fluido de mayor temperatura al otro de menor temperatura. Las tres fases son calentamiento, reciclado y enfriado.
- Un tubo de mantenimiento. Es un tubo aislado térmicamente, que mantiene el líquido a una temperatura determinada durante un espacio de tiempo determinado por la velocidad del líquido y la longitud del tubo. De esta manera, se espera que el líquido caliente a una determinada temperatura sea propicio para producir una acción bactericida.
- Una válvula de bypass. Es una válvula con una entrada y dos salidas de líquido con conmutación controlable eléctricamente. Permite desviar el producto medido correctamente por una salida y el producto de desecho por la otra salida. De esta manera se asegura que el producto es tratado en su totalidad. Se encuentra instalada al final del tubo de mantenimiento.
- Depósito de producto tratado. Se trata de un depósito en el que se almacena el producto tratado bajo las especificaciones del proceso se almacena.
- Depósito de calentamiento. Es el depósito donde se almacena el líquido que transmitirá la

energía térmica necesaria para elevar la temperatura del producto en proceso a través del intercambiador de calor. Consta de una resistencia eléctrica que entrega la potencia energética necesaria y es controlable. Además, dispone de un sensor para la monitorización y el control de la energía térmica que se introduce en el sistema.

- Válvula manual de reducción de presión de agua de entrada a la planta (PRV1).
- Válvula de control de flujo de agua fría (V1).
- Accionamiento de la válvula de bypass (SOL 1).
- Válvula eléctrica de selección de alimentación a los tanques A/B (SOL 2).
- Válvula eléctrica de enfriamiento del producto (SOL 3).
- Válvula eléctrica de alimentación del depósito de producto a tratar (SOL 4).
- Válvula eléctrica de alimentación del depósito de producto tratado (SOL 5).
- Bomba peristáltica de alimentación (N1).
- Bomba peristáltica de agua caliente (N2).
- Sensores de temperatura:
 - T1: a la salida del tubo de mantenimiento.
 - T2: temperatura del agua caliente.
 - T3: temperatura de salida de producto.
 - T4: temperatura de salida del producto calentado.
- Sensor de conductividad (C1): para medir la conductividad del fluido enfriado.
- Sensor de flujo (f1): mide el flujo del producto a tratar.
- Sensor de nivel (L1): sensor bajo presión, situado en la base del tanque A de alimentación de producto.
- Interruptor de nivel bajo (LL): detecta el nivel bajo de líquido en el tanque B.
- Interruptor de nivel alto (HL): detecta el nivel máximo de líquido en el tanque B.

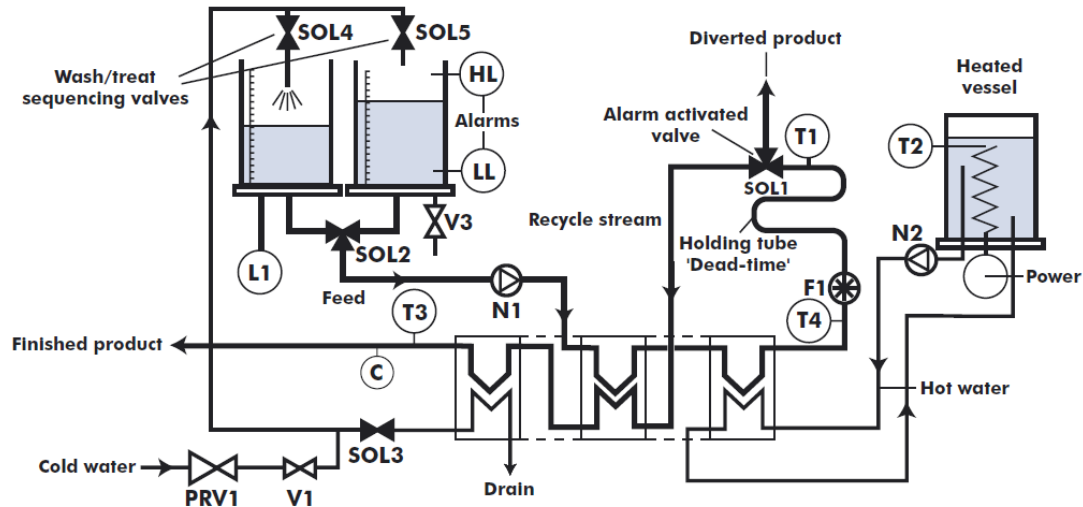
La planta PCT23 incluye también bucles típicos industriales (ver [figura 5.13](#)):

- Control de la temperatura del fluido caliente en función de la potencia aplicada.
- Control de la temperatura del producto calentado en función de la velocidad del motor de la bomba de circulación de agua caliente, la potencia aplicada al calentador o mediante un control en cascada que controle la temperatura del tanque de agua caliente y la velocidad de la bomba.
- Control del caudal del producto en función de la velocidad de la bomba de circulación de

producto.

- Control del nivel de uno de los tanques de almacenamiento en función de la velocidad de la bomba de circulación de producto.
- Control de la potencia del calentador.

Figura 5.13 Esquema de lazos de control del proceso en la planta piloto PCT23



Fuente: Armfield process plant trainer pct23, ficha técnica

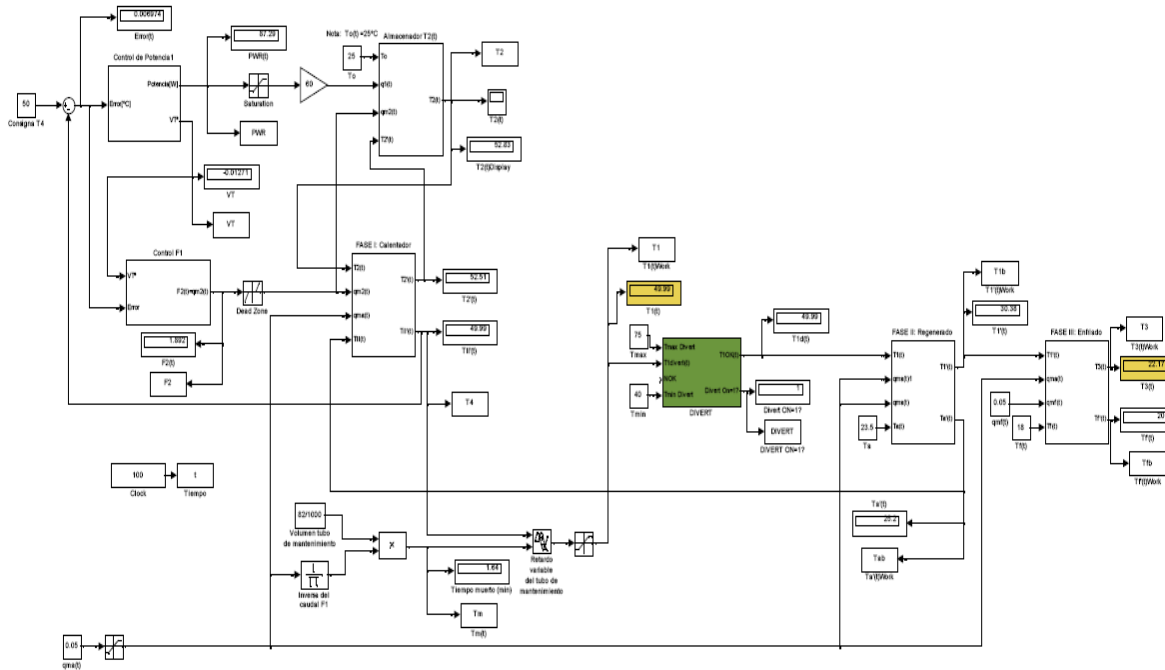
El paquete de supervisión para la planta es InTouch de Wonderware®. Éste SCADA, brinda la opción de realizar comunicaciones entre aplicaciones para monitorear procesos en tiempo real accediendo al diccionario de etiquetas, para ello, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Las memorias de etiqueta deben ser tipo I/O.
- El nombre de acceso para el programa con el que se va a enlazar.
- El nombre de las etiquetas debe coincidir con la de los ítems.

Al igual que en el capítulo anterior, la generación controlada de fallas en el proceso, permite estimular al operador la toma de decisiones durante la interacción a través de la interfaz de supervisión. Para la detección de fallas, se desarrolló un simulador del proceso de pasterización en el entorno Matlab®/Simulink® ([figura 5.14](#)), que permite programar fallas en cada uno de los componentes. La detección de fallas se realiza en la aplicación de supervisión del proceso mediante la comunicación con el simulador. Cuando se presenta una falla en un elemento del proceso aparece una ventana emergente para indicarla. Las fallas que se programan en la planta se relacionan en la

tabla 5.3 y el simulador con los detectores de falla se muestra en la figura 5.15.

Figura 5.14 Simulador del proceso de pasterización de la planta PCT23



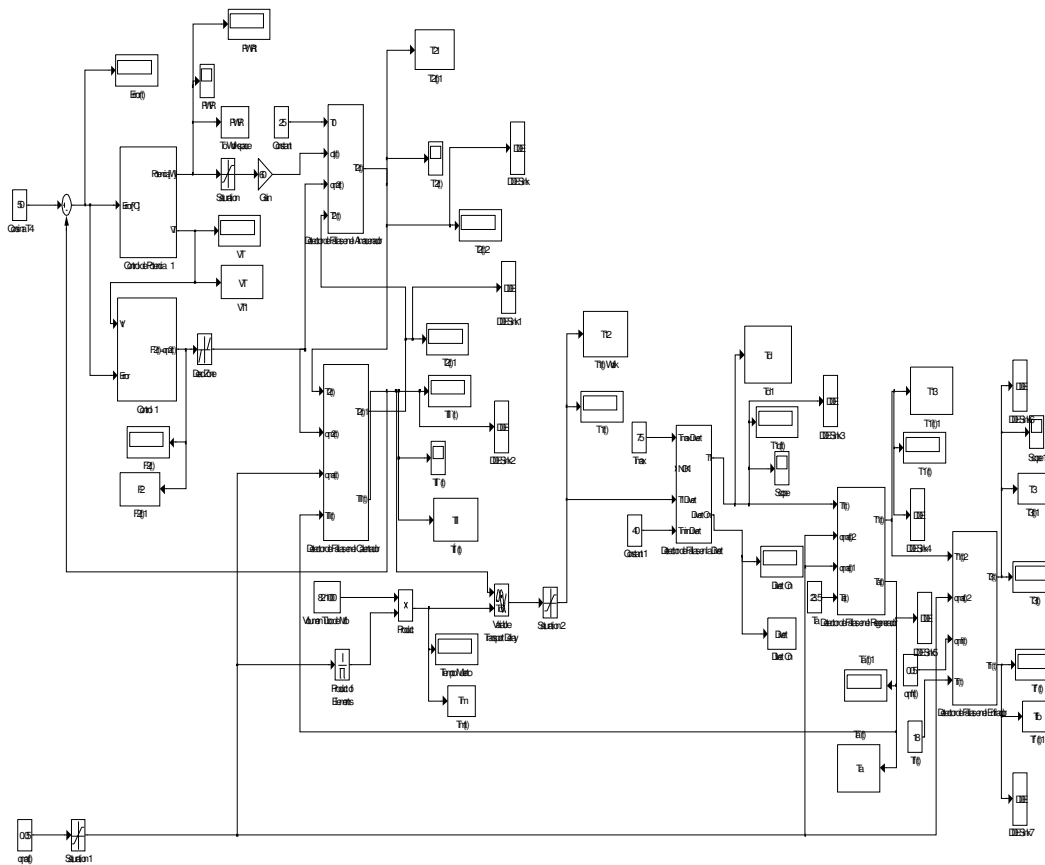
Fuente: Hernández y Vargas, 2010

Tabla 5.3 Resumen de fallas de la planta del proceso de pasterización en la planta PCT23

Nº	Cód.	Descripción	Descripción de la falla
1	To	Sensor de temperatura ambiente	Desconexión de la señal.
2	PWR	Resistencia eléctrica de calentamiento de agua.	Pérdida de suministro de flujo calorífico q_1 .
3	B2	Bomba de suministro de agua qm_2	Falla al arranque. Falla por trabajo en vacío.
4	T2'	Sensor de temperatura del líquido de retorno del depósito de agua caliente	Desconexión de la señal.
5	T2	Sensor de temperatura del depósito de agua caliente	Desconexión de la señal.
6	V1	Válvula de paso de agua fría hacia el intercambiador de calor	Bloqueo mecánico. Sin suministro de energía.
7	TII	Sensor de temperatura de agua	Desconexión de la señal.
8	T1	Sensor de temperatura de producto	Desconexión de la señal.
9	Ta	Sensor de temperatura	Desconexión de la señal.
10	T1'	Sensor de temperatura	Desconexión de la señal.
11	Tf	Sensor de temperatura	Desconexión de la señal.

Fuente: Hernández y Vargas, 2010.

Figura 5.15 Simulador del proceso de pasteurización incluyendo los detectores de fallas



Fuente: Hernández y Vargas, 2010

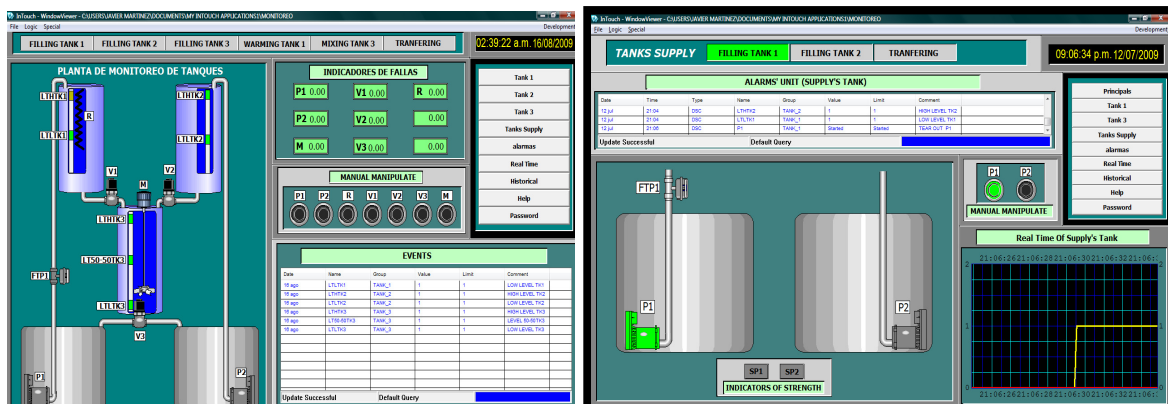
Paso 3. Las tareas (Proceso): para la metodología, las tareas tienen que ver con el conjunto de acciones que se encuentran interrelacionadas de forma dinámica y que se orientan a la transformación de materia o energía. Desde este punto de vista, lo que determina la necesidad del artefacto son los requerimientos de las tareas. El término funcionalidad hace referencia a las tareas que son desempeñadas por el artefacto, que pueden ser simples o complejas y además pueden analizarse a niveles diferentes de detalle. Para la planta de dosificación de líquidos las tareas son básicamente el control de nivel, temperatura y flujos a partir de las acciones de los dispositivos finales, y para la planta de pasteurización, las tareas son el control de caudal, nivel, temperatura tanto del fluido del intercambiador y del producto y la potencia del calentador.

Paso 4. La interfaz (la interacción): la interfaz es el medio a través del cual se comunican la persona y la planta. La comunicación se establece en las dos direcciones. Por tanto, al hablar de una

interfaz se incluye el medio por el cual la planta presenta información a la persona y el medio por el cual la persona introduce información en la planta. Cuando se habla de la interfaz se incluye todo lo que son los objetos, imágenes, texto, sonidos, etc. que se presentan en la pantalla, así como todas las formas en las que una persona puede introducir información como punteros de ratones, gestos, sonidos a través de un micrófono, etc.

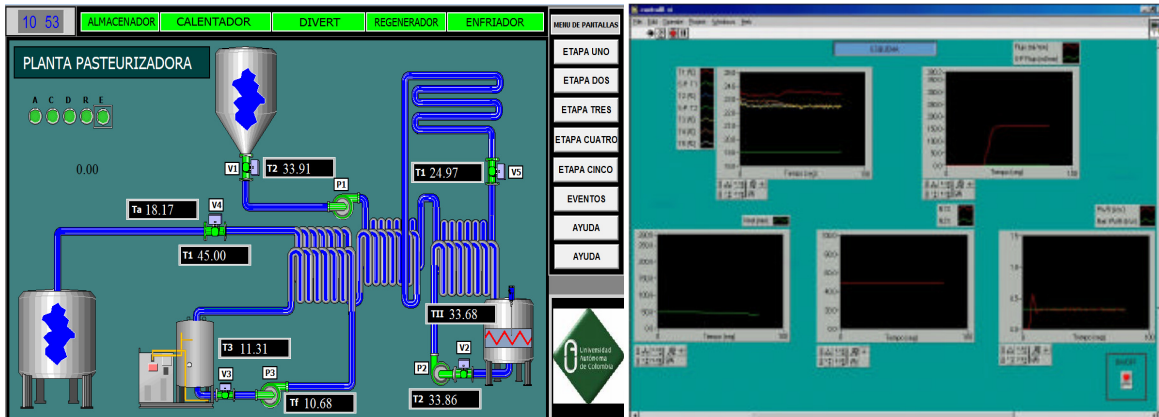
Los sistemas de supervisión comerciales cuentan con herramientas de desarrollo de interfaces de usuario para la interacción con el operador de la planta. El sistema SCADA que se utilizó para el entrenamiento del sistema tecnológico fue InTouch de Wonderware®. InTouch explota las características fundamentales de los sistemas operativos de Microsoft y permite construir con todas las funciones del sistema de supervisión. Este paquete cuenta con una base de datos de etiquetas de proyecto para gestionar datos en tiempo de ejecución, incluyendo tanto variables internas, como escaneado de E/S para dispositivos sensores y accionamientos, controladores configurables para comunicarse en tiempo real con controladores lógicos programables, dispositivos de E/S remotos y otros dispositivos de adquisición de datos; pantallas de interfaces animadas y cuadros de mando; y módulos opcionales, como registro de alarmas, registro de eventos, registro de tendencias, procedimientos, informes, lógica programable, programadores, un sistema de seguridad, y una completa base de datos de interface. Con este paquete se desarrollaron las pantallas de la interfaz de supervisión de la planta del proceso de dosificación de líquidos (figura 5.16) y de la planta del proceso de pasteurización (figura 5.17). Con cada interfaz se realizaron modificaciones en las pantallas, que a criterio del experto fueron catalogadas como buenas, regulares o malas, para el entrenamiento, la prueba y la validación.

Figura 5.16 Dos pantallas IHM para la supervisión del proceso de dosificación de líquidos.



Fuente: González y otros, 2009.

Figura 5.17 Dos pantallas IHM para la supervisión del proceso de pasteurización.



Fuente: Hernández y Vargas, 2010

Paso 5. El operador (las acciones): los operadores de los sistemas de supervisión se concentran en las salas de control. Una sala de control generalmente dispone de un gran número de dispositivos automáticos que funcionan bajo condiciones normales, pero cuando sucede un evento inesperado, el operador humano es el que tiene que tomar el control del proceso, interactuando directamente con los dispositivos.

Las labores de un operador en una sala de control consiste en supervisar lo que ocurre, conocer el estado del sistema, reprogramarlo, tomar el control de los procesos automatizados cuando sea necesario, intervenir cuando se requiera y planificar las acciones futuras a corto y largo plazo. Esto se lleva a cabo por la interacción con sistemas computarizados y con otras personas que se encuentran alrededor de la planta. Estas funciones tienen relación con los procesos cognitivos humanos y su correcto funcionamiento depende de la Interacción Humano-Máquina. Cuando el operador interactúa con la planta, normalmente modifica el estado del proceso o implementa un nuevo procedimiento.

Los operadores de salas de control necesitan utilizar modelos mentales de sistemas físicos y razonar cualitativamente sobre los efectos esperados por los diferentes factores que influyen en el estado de la planta, con el fin de localizar fallas e identificar las acciones para mitigarlas.

Para la operación de los artefactos (plantas de dosificación y pasteurización), se utilizaron 30 estudiantes de los programas de ingeniería entre 8 y 10 semestre que tienen competencias en procesos industriales relacionados con fluidomecánica, termotransferencia, máquinas,

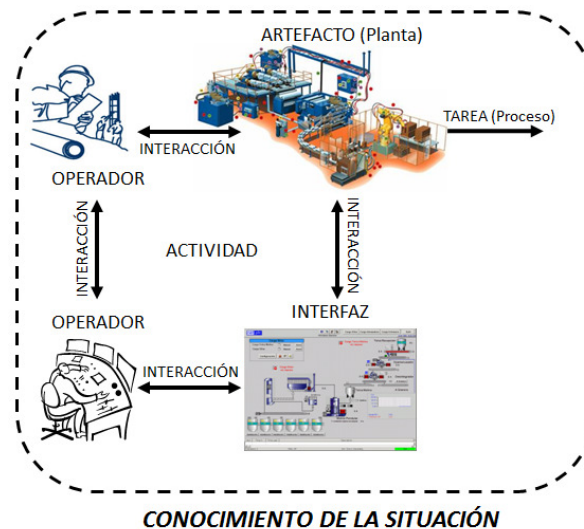
modelamiento, control y simulación de procesos industriales y automatización. El periodo de la experimentación de interacción fue de una hora. Además del diseño de la metodología, el autor de esta tesis actuó como facilitador de la evaluación.

Paso 6. La actividad: las actividades del operador están relacionadas con la supervisión de la planta, donde como se ha dicho anteriormente, el nivel inferior contiene la secuencia de control. La supervisión puede asignarse al nivel medio. El nivel superior comprende las acciones globales de coordinación, optimización y administración. La información importante acerca del proceso es mostrada por medio de una consola al operador. Sin embargo, la mayor parte de las funciones de control se realizan en los niveles inferiores, pero lo más importante son las funciones de supervisión, debido a que los operadores han sido removidos paulatinamente de los procesos. Las acciones de un operador humano no están orientadas solamente al control del proceso colocando las consignas o programando tiempos. El operador también supervisa el proceso, especialmente, si existe un contacto directo. Por consiguiente, el mejoramiento de las acciones de control en el bajo nivel, ha conllevado además al mejoramiento de las acciones de supervisión, que encierran la confiabilidad y seguridad del proceso. En resumen las actividades de supervisión comprenden las siguientes etapas:

1. Monitorización: la automatización de las tareas de seguimiento y vigilancia de un determinado proceso en la planta
2. Protección automática: en caso de originarse un estado peligroso del proceso se da inicio una acción correctora apropiada.
3. Mecanismo de supervisión; en caso de cambio en el comportamiento de alguno de los componentes del sistema (desviación no permitida de alguna de sus propiedades o parámetros característicos) de manera que éste ya no puede satisfacer la función para la cual ha sido diseñado
4. Sistema de diagnóstico de fallas: que en tiempo real, pueda dar información al sistema de supervisión.
5. Sistema de evaluación del riesgo de las fallas presentadas: para que active algún mecanismo de acción correctora.

Los anteriores pasos encierran el conocimiento de la situación en un entorno de supervisión de planta automatizada con interfaz humano-máquina. El conocimiento de la situación está definido como la percepción de los elementos en el medio ambiente dentro de un volumen de tiempo y espacio, la comprensión de su significado y la proyección de su situación en un futuro próximo (Endsley 2013). En la metodología, ello involucra la percepción de factores críticos en la supervisión de la planta, entender como intervienen esos factores, particularmente, cuando se integran con los objetivos de los operadores, y una comprensión de lo que sucederá con el sistema en el futuro cercano. La complacencia o exceso de confianza por la automatización, es uno de los factores asociados con la falta de atención durante la supervisión, los operadores pueden descuidar la automatización de la planta y la supervisión de variables, a cambio de otras tareas por el desplazamiento de la atención, esto da como resultado un bajo conocimiento de la situación. La demanda de tareas en ambientes de alta complejidad está ligada a los efectos de la complacencia (figura 5.18).

Figura 5.18 Conocimiento de la situación en la supervisión con interfaz humano-máquina.



Fuente: propia

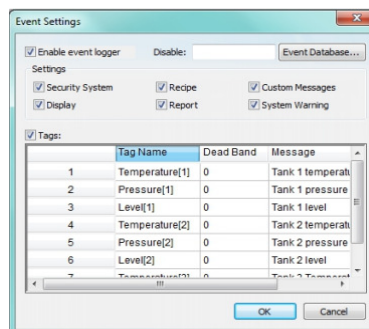
Paso 7. El registrador (Log event): varias aplicaciones de software han incluido un registrador de la actividad del usuario o registrador de eventos (Log event). La palabra log es un término anglosajón, equivalente a la palabra bitácora en español. Sin embargo, se utiliza en los países de habla hispana como un anglicismo derivado de las traducciones del inglés en la jerga informática. Del mismo término también proviene la palabra blog, que es la contracción de web log.

Un log es un registro oficial de eventos generados por el usuario durante un lapso de tiempo. Para los profesionales en seguridad informática es usado para registrar datos o información sobre ¿quién?, ¿qué?, ¿cuándo?, ¿dónde? y ¿por qué? un evento ocurre para un dispositivo en particular o aplicación.

La mayoría de los logs son almacenados o desplegados en un formato estándar, el cual es un conjunto de caracteres para dispositivos comunes y aplicaciones. De esta forma cada log generado por un dispositivo en particular puede ser leído y desplegado en otro diferente. También se le considera como aquel mensaje que genera el programador de un sistema operativo, alguna aplicación o algún proceso, en virtud del cual se muestra un evento del sistema.

El registrador de eventos ofrece la trazabilidad de las acciones del operador durante la interacción con la interfaz o de la actividad interna de la aplicación, como cambios en la seguridad del sistema, operaciones de apertura/cierre de pantallas, operaciones de ejecución de procedimientos o de informes, mensajes personalizados y alertas del sistema. Asimismo, cualquier cambio de valor de etiquetas incluyendo mensajes personalizados. Cada acción del operador tiene un código estandarizado como evento, el registro de los eventos es almacenado en archivos de la base de datos del SCADA ([figura 5.19](#)).

Figura 5.19 Módulo de registro de eventos del operador a través de la interfaz.



Fuente: propia

Paso 8. El clasificador (criterios de usabilidad): el clasificador es un programa que explora el registro de los eventos correspondientes a las acciones del operador durante una hora de interacción con la planta a través de la interfaz IHM. Los eventos son contabilizados, agrupados y clasificados en diez criterios de usabilidad de interfaces definidos en (Seffah y otros, 2006). La [tabla 5.4](#) muestra la agrupación de los eventos de seguridad de Microsoft Windows 7 y los criterios de usabilidad

asociados, que son utilizados como un vector de entrada a un sistema tecnológico de entrenamiento y valoración de la interfaz.

Tabla 5.4 Relación de ID de eventos de seguridad que se relacionan con los criterios de usabilidad

Event ID	Category	Subcategory	Criterio de usabilidad
4774 a 4777	AccountLogon	CredentialValidation	Accesibilidad
4768 a 4772	AccountLogon	KerberosAuthenticationService	Accesibilidad
4769 y 4770	AccountLogon	KerberosService Ticket Operations	Accesibilidad
4783 a 4790	Account Management	ApplicationGroup Management	Accesibilidad
4742 y 4743	Account Management	ComputerAccount Management	Accesibilidad
4744 a 4762	Account Management	DistributionGroup Management	Accesibilidad
4782 y 4783	Account Management	OtherAccount Management Events	Accesibilidad
4727 a 4764	Account Management	Security Group Management	Seguridad o fiabilidad
4720 a 4794	Account Management	UserAccount Management	Accesibilidad
4692 a 4695	Detailed Tracking	DPAPI Activity	Productividad o multitarea
4688 y 4696	Detailed Tracking	ProcessCreation	Productividad o multitarea
4689	Detailed Tracking	ProcessTermination	Productividad o multitarea
5712	Detailed Tracking	RPC Events	Productividad o multitarea
4928 a 4937	DS Access	DetailedDirectoryServiceReplication	Eficiencia o velocidad de respuesta
4662	DS Access	DirectoryService Access	Eficiencia o velocidad de respuesta
5136 a 5141	DS Access	DirectoryServiceChanges	Eficiencia o velocidad de respuesta
4932 y 4933	DS Access	DirectoryServiceReplication	Eficiencia o velocidad de respuesta
4625	Logon/Logoff	Account Lockout	Recuperación de errores
4978 a 4984	Logon/Logoff	IPsec Extended Mode	Recuperación de errores
4646 a 4654	Logon/Logoff	IPsecMainMode	Recuperación de errores
4655 a 5452	Logon/Logoff	IPsec Quick Mode	Recuperación de errores
4634/24/47	Logon/Logoff	Logoff	Recuperación de errores
4624	Logon/Logoff	Logon	Recuperación de errores
4625	Logon/Logoff	Logon	Recuperación de errores
6272 a 6280	Logon/Logoff	Network Policy Server	Recuperación de errores
4778/79 y 4801/03	Logon/Logoff	OtherLogon/LogoffEvents	Recuperación de errores
4964	Logon/Logoff	SpecialLogon	Recuperación de errores
4665 a 4668	Object Access	ApplicationGenerated	Interactividad
4868 a 4898	Object Access	CertificationServices	Interactividad
5140	Object Access	File Share	eficacia
4664/85	Object Access	File System	eficacia
5031 y 5154	Object Access	FilteringPlatformConnection	eficacia
5155 a 5159	Object Access	FilteringPlatformConnection	eficacia
5152 y 5153	Object Access	FilteringPlatformPacketDrop	eficacia
4656 a 4690	Object Access	HandleManipulation	eficacia
4671 a 4699, 4700 a 4702 y 5888 a 5890	Object Access	OtherObject Access Events	eficacia
4657 y 5039	Object Access	Registry	eficacia
4659 a 4663	Object Access	Special	eficacia
4715 y 4719, 4902 a 4912	PolicyChange	AuditPolicyChange	Confianza
4713 a 4718, 4739, 4864 a 4867, 4704 a 4714	PolicyChange	AuthenticationPolicyChange	Confianza
4709 a 4712, 5040 a 5048, 5440 a 5477	PolicyChange	FilteringPlatformPolicyChange	Confianza
4944 a 4958	PolicyChange	MPSSVC Rule-Level Policy Change	Confianza
4909 y 4910,	PolicyChange	OtherPolicyChangeEvents	Confianza
4670	PolicyChange	Subcategory (special)	Confianza
4672 a 4674	Privilege Use	Sensitive Privilege Use / Non Sensitive Privilege Use	Satisfacción o flexibilidad
4960 a 4965, 5478 a 5485	System	IPsec Driver	Coherencia
5024 a 5059	System	OtherSystemEvents	Satisfacción o flexibilidad
4608/09/16/21	System	Security StateChange	Seguridad o fiabilidad
4610 a 4614 y 4622/97	System	Security SystemExtension	Seguridad o fiabilidad
4612/15/18/16 y 5038/56 a 5062	System	SystemIntegrity	Coherencia

Fuente: adaptado de <http://windows.microsoft.com/es-xl/windows7/get-know-windows-7>

Paso 9. El sistema de inferencia (pesos de los criterios de usabilidad): para la metodología se utilizó un sistema de inferencia difuso que se adapta por el entrenamiento de la red neuronal o ANFIS por sus siglas en inglés (Jang, 1993). El sistema de inferencia, utiliza la base de conocimiento heurístico de las acciones de los operadores de la planta a través de la interfaz para el entrenamiento de la red neuronal. Cada regla del sistema de inferencia se establece de acuerdo con las actividades durante una hora de interacción con la interfaz de supervisión.

Para cada criterio de usabilidad se han definido tres funciones de pertenencia, baja, media y alta. En este caso se utilizó un sistema difuso que se basa en las reglas de Takagi-Sugeno, que usan una función lineal de las entradas al modelo como consecuente de las reglas. Tal estructura está en capacidad de representar una clase general de sistemas estáticos o dinámicos no lineales. El sistema completo es utilizado para determinar si la interfaz posee alta, media o baja usabilidad (como salida del sistema de lógica difusa).

El sistema de inferencia difuso bajo consideración presenta diez entradas correspondientes a los criterios de evaluación de usabilidad, cada entrada tiene tres posibilidades de valoración lingüística o funciones de pertenencia (baja, media y alta) de tipo gaussiana. Por consiguiente, se obtienen 30 reglas difusas de tipo si-entonces. Para este caso de ocho entradas y para el modelo difuso Takagi-Sugeno-Kang o TSK de primer orden, una primera regla sería de la forma:

Si

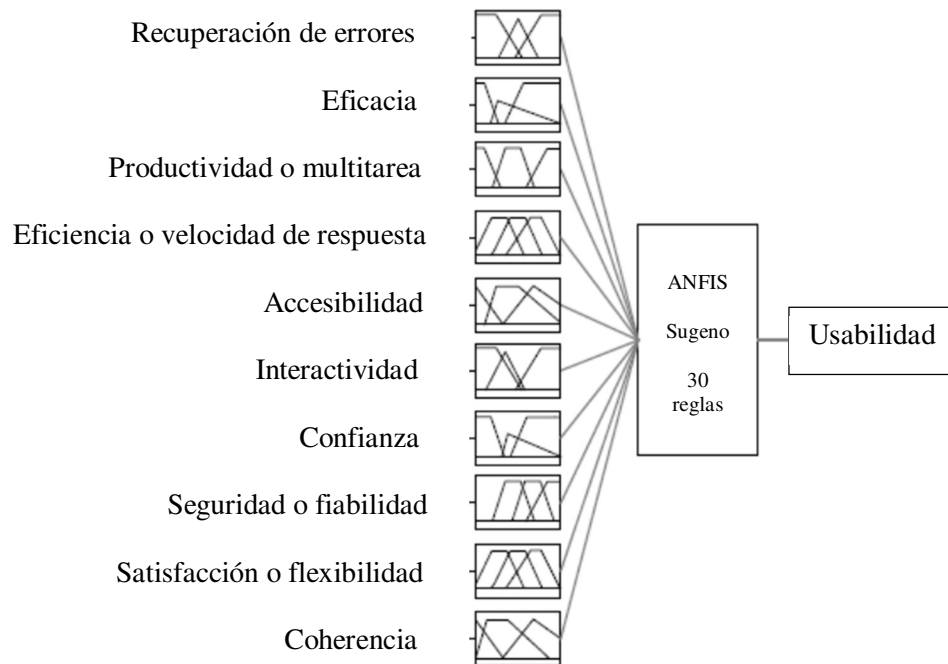
x_1 es A1 y x_2 es B1 y x_3 es C1 y x_4 es D1 y x_5 es E1 y x_6 es F1 y x_7 es G1 y x_8 es H1, y x_9 es I1 y x_{10} es J1,

entonces:

$$f_1 = p_{11} * x_1 + p_{12} * x_2 + p_{13} * x_3 + p_{14} * x_4 + p_{15} * x_5 + p_{16} * x_6 + p_{17} * x_7 + p_{18} * x_8 + p_{19} * x_9 + p_{20} * x_{10}$$

El superíndice en el coeficiente p denota el número de la regla y los parámetros p_{11} , p_{12} , p_{13} , p_{14} , p_{15} , p_{16} , p_{17} , p_{18} , p_{19} y p_{20} son los parámetros consecuente ([figura 5.20](#)).

Figura 5.20 Representación de las funciones de pertenencia de criterios de usabilidad



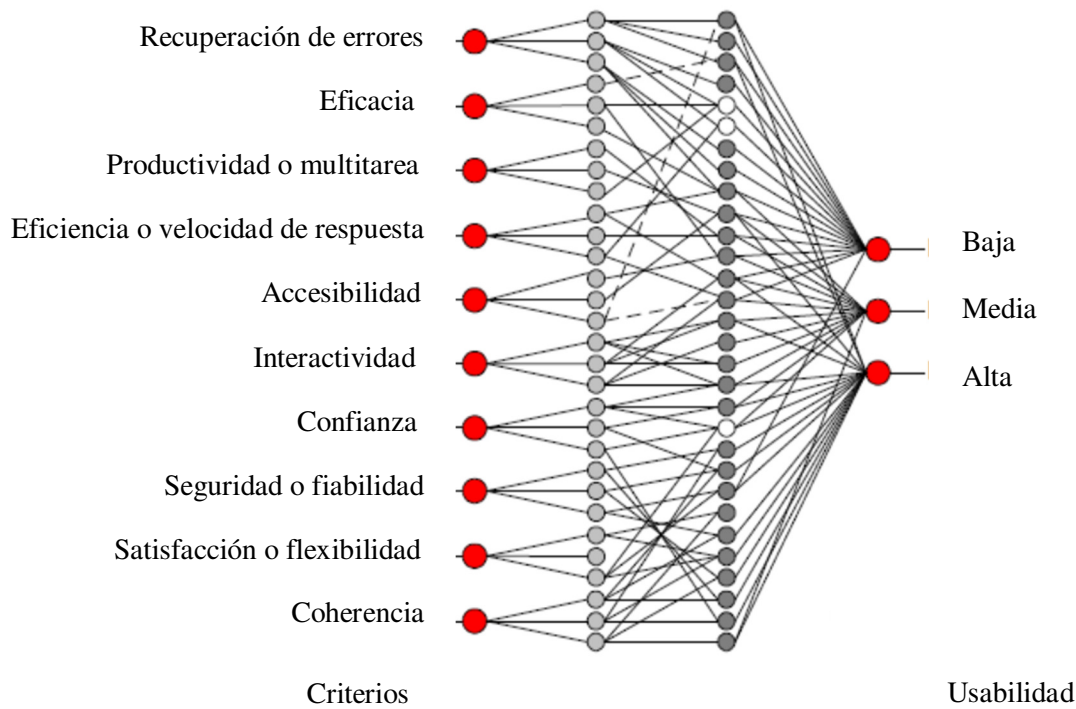
Fuente: propia

Paso 9. La red neuronal (entrenamiento de la interacción): se utilizó un red neuronal con cuatro capas (figura 5.21). La red neuronal utiliza el principio de retropropagación en donde se ajusta el valor de los pesos en función del error generado. Esta técnica permite tener un método de optimización que se encuentra al definir el gradiente del error y minimizarlo con respecto a los parámetros de la red neuronal.

Se denota la salida del i -ésimo nodo en la capa k como O_{ki} . Cada nodo de la capa 1 puede ser cualquier función de activación parametrizada $\mu_A(x)$, como por ejemplo la función campana generalizada, $\mu_A(x) = 1 / (1 + |x - c|/a)^{2b}$, donde las constantes a , b y c son referidas como los parámetros los antecedentes.

La función en cada nodo (regla) en la capa 2 genera como salida el producto de todas las entradas, en términos de la evaluación de las funciones de pertenencia respectivas que estipule la regla. Así, para: $i=1,2,\dots, 30$,

Figura 5.21 Estructura de la red neuronal para el entrenamiento con base en criterios de usabilidad



Fuente: propia

$$O2i = wi = \mu A_j(x1) * \mu B_j(x2) * \mu C_j(x3) * \mu D_j(x4) * \mu E_j(x5) * \mu F_j(x6) * \mu G_j(x7) * \mu H_j(x8) * \mu I_j(x9) * \mu J_j(x10)$$

$$j=1 \text{ ó } 2 \text{ (según la regla)} \quad (5.18)$$

Cada nodo en la capa 4 es una función parametrizada dada por:

$$O4i = wi * fi = wi * (pi1 * x1 + pi2 * x2 + pi3 * x3 + pi4 * x4 + pi5 * x5 + pi6 * x6 + pi7 * x7 + pi8 * x8 + pi9 * x9 + pi10 * x10)$$

$$\text{para } i=1, 2, \dots, 30 \quad (5.19)$$

Para la capa 4 hay tres salidas, que son los valores aproximados determinados por el modelo (salida calculada).

$$O4i = d = \Sigma i(wi * fi) = \Sigma i(O3i) \quad (5.20)$$

En el proceso de calibración del modelo se obtienen los valores de pi (parámetros consecuentes) de la regla TSK y los valores de a, b y c (parámetros de antecedentes), dependiendo del tipo de

conjunto difuso con el que se esté trabajando. La red ANFIS permite a los sistemas difusos aprender los parámetros, usando el algoritmo de aprendizaje.

El modelo ANFIS tiene dos tipos de parámetros que deben ser entrenados, los parámetros de los antecedentes, los cuales corresponden a las constantes que caracterizan las funciones de activación de los conjuntos difusos, y los parámetros del consecuente, estos son parámetros lineales de la salida del modelo de inferencia. El paradigma de aprendizaje del modelo ANFIS emplea algoritmos de gradiente descendente para optimizar estos parámetros y el algoritmo de mínimos cuadrados para determinar los parámetros lineales. A esta combinación se le conoce como regla de aprendizaje híbrido (Roger, 1995), la cual es usada en el aprendizaje de este modelo.

Para aplicar el aprendizaje en grupo en cada periodo de entrenamiento debe ejecutarse un paso hacia adelante y un paso hacia atrás. En el paso hacia adelante, los parámetros de las funciones de los conjuntos son inicializados y se presenta un vector de entrada-salida. Se calculan las salidas del nodo para cada capa de la red y, entonces, los parámetros del consecuente son calculados usando el método de mínimos cuadrados. Una vez identificados los parámetros del consecuente, el error es calculado como la diferencia entre la salida de la red y la salida deseada presentada en los pares de entrenamiento. En este caso se usa una de las medidas más empleadas para calcular el error de entrenamiento, que es la suma del error cuadrado (SEC), definido como:

$$SEC = \sum_{k=1}^n (d_k - f_k)^2 \quad (5.21)$$

Los d_k corresponden a los patrones de entrenamiento proporcionados (salidas deseadas) y f_k es la correspondiente salida de la red. En el paso hacia atrás, las señales de error son propagadas desde la salida, en dirección de las entradas y el vector gradiente es acumulado para cada dato de entrenamiento. Al final del paso hacia atrás para todos los datos de entrenamiento, los parámetros en la capa 1 (parámetros de los conjuntos) son actualizados por el método descendente en una magnitud $\Delta\alpha$ igual a:

$$\Delta\alpha = -\eta \frac{\delta E}{\delta\alpha} \quad (5.22)$$

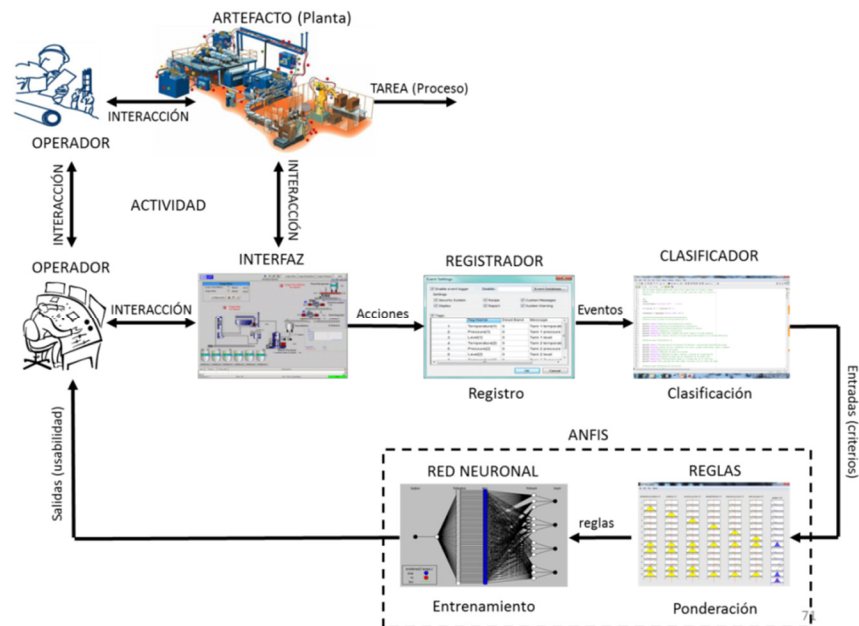
Donde E es el error de salida y η es la velocidad de aprendizaje, que puede ser expresada como:

$$\eta = \frac{p}{\sqrt{\sum \alpha \left(\frac{\delta E}{\delta \alpha}\right)^2}} \quad (5.23)$$

Aquí p es el tamaño del paso, o sea la longitud de cada transición a lo largo de la dirección del gradiente en el espacio de parámetros. Generalmente se puede cambiar el valor de p para variar la velocidad de convergencia de la siguiente manera: si p es pequeño, el método del gradiente aproxima de cerca la trayectoria del gradiente, pero la convergencia será lenta puesto que el gradiente se debe calcular muchas veces. Por otra parte, si p es grande, la convergencia será inicialmente muy rápida, pero el algoritmo oscilará sobre el grado óptimo.

El sistema de inferencia difuso se optimizó empleando el algoritmo de retropropagación de Levenbert-Marquardt (Jang y Mizutani, 1996), en un total de 500 iteraciones. Para el entrenamiento se definen 500 épocas con el método de adaptación basado el algoritmo de retropropagación de Levenbert-Marquardt. El resultado es validado con los datos de cada experimento por separado. Se pueden observar las características del sistema generado, con las funciones de pertenencia de cada variable de entrada. La salida del sistema de inferencia difuso es el criterio cualitativo de evaluación de la interfaz en términos alta, media y baja. El sistema tecnológico completo se muestra en la [figura 5.22](#).

Figura 5.22 Esquema general del sistema de evaluación de usabilidad de Interfaces de Supervisión de Procesos

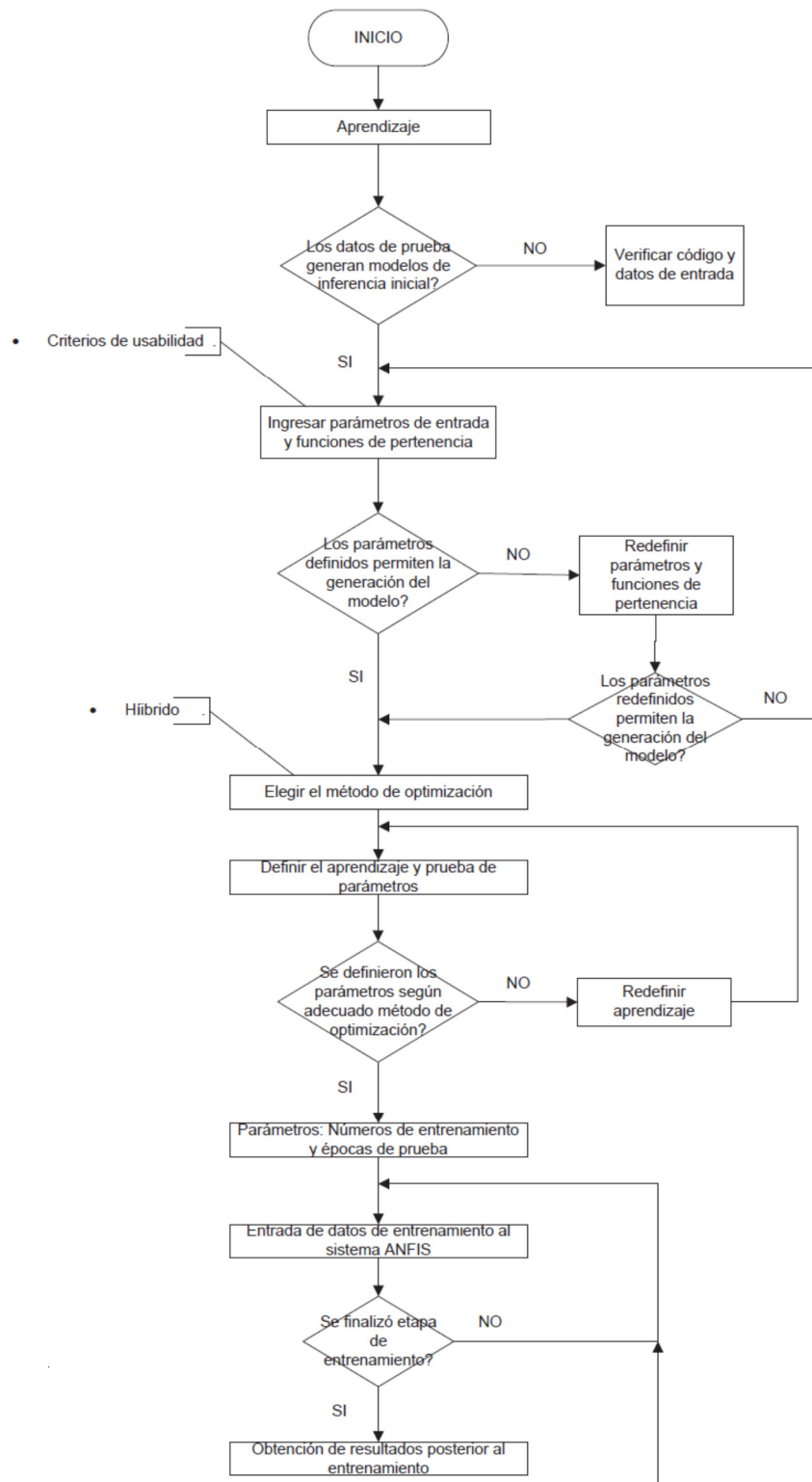


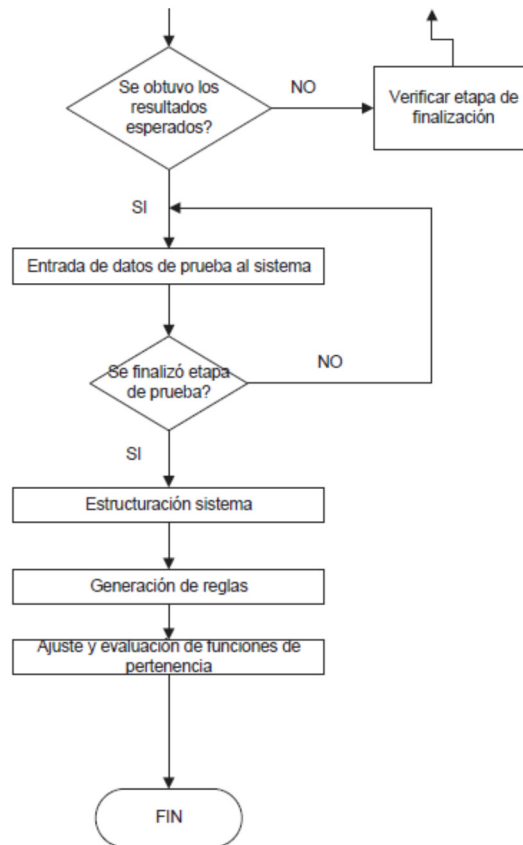
Fuente: propia

Como se mencionó, a partir de las acciones del operador se generan eventos en la interfaz de supervisión IHM, estos eventos se agruparon en diez criterios de usabilidad que son utilizados para generar el sistema de inferencia y entrenar una red neuronal. Un primer programa que se utilizó para probar el sistema tecnológico de la metodología se muestra a continuación. Uno más desarrollado con los ID's de los eventos de seguridad de Microsoft Windows versión 7 que sigue el siguiente diagrama de flujo ([figura 5.23](#)) se presenta en el anexo 1.

```
load ('entrenamiento.txt'); % archivo con datos de criterios de usabil
trnData = [entrenamiento];
numMFs = 3; % número funciones de pertenencia
mfType = 'gbellmf'; % tipo de funcion de pertenencia
epoch_n = 20;
in_fis = genfis1(trnData,numMFs,mfType); % generacion del FIS
plotmf(in_fis,'input',1)
out_fis = anfis(trnData,in_fis,20) % entrenamiento de la red
y1=evalfis(['prueba.txt'],out_fis) % archivo de criterios recopilados
```

Figura 5.23 Diagrama de flujo de la aplicación desarrollada para la ejecución de la metodología de evaluación de usabilidad de interfaces de supervisión





6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DEL ENTRENAMIENTO DEL ANFIS CON LA INTERFAZ DE LA PLANTA DEL PROCESO DE DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS

Para el entrenamiento de la red neuronal, se utilizó una muestra de un conjunto de 100 datos de la valoración dada por un experto en usabilidad de interfaces, una capa oculta de 10 neuronas y el algoritmo de retropropagación de Levenberg-Marquardt.

Tabla 6.1. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la planta de dosificación de líquidos durante el entrenamiento.

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,7	4,0	4,0	7,0	6,5	5,9	8,0	8,5	8,3
O2	4,3	4,0	5,0	6,6	6,0	6,0	8,5	8,0	8,0
O3	4,0	4,0	5,0	6,8	7,0	7,0	9,0	8,2	8,5
O4	4,0	4,0	4,9	6,5	6,0	7,0	8,4	8,0	8,0
O5	4,6	4,5	3,8	6,9	6,3	7,0	8,3	8,1	8,0
O6	4,8	4,0	5,0	6,7	6,4	7,0	9,1	8,6	8,9
O7	3,6	3,5	3,1	6,4	6,9	7,0	8,8	8,0	8,7
O8	4,2	3,0	3,2	6,3	6,0	7,0	9,0	8,5	8,9
O9	4,9	3,5	3,0	7,0	6,5	7,5	9,5	9,0	9,0
O10	4,5	3,0	3,0	6,5	6,0	7,1	9,0	9,2	9,0
O11	4,7	4,0	4,0	7,0	7,1	6,5	8,0	9,0	8,4
O12	4,3	4,0	5,0	6,6	7,0	6,9	8,3	9,0	8,3
O13	4,0	4,0	5,0	6,8	7,0	6,7	8,4	9,0	9,1
O14	4,9	4,5	4,0	7,0	6,4	6,4	8,9	9,0	8,8
O15	4,9	4,8	4,3	7,0	7,0	6,5	8,0	9,0	8,4
O16	5,0	4,7	4,4	7,0	7,0	6,9	8,3	9,0	8,3
O17	3,2	4,4	4,7	7,0	7,0	6,7	8,4	9,0	9,1
O18	5,0	4,5	4,0	7,0	5,2	6,4	8,9	9,0	8,8
O19	4,8	4,8	4,3	6,9	6,3	6,7	8,7	8,4	9,0
O20	4,9	4,7	4,4	6,8	7,1	6,4	8,4	8,9	9,0
O21	3,3	4,4	4,9	7,0	6,8	6,3	8,3	8,0	9,0
O22	4,7	4,4	5,0	6,7	6,4	7,0	9,0	8,5	9,6
O23	4,4	4,9	5,0	6,4	5,1	6,3	8,0	9,0	9,0
O24	4,3	4,0	5,0	6,3	5,2	7,0	8,5	9,6	9,5
O25	5,0	4,5	5,4	7,0	5,0	6,5	8,0	9,0	9,0
O26	3,0	4,3	4,0	7,0	5,0	6,4	8,0	9,0	9,0
O27	3,0	5,0	4,5	7,5	5,0	7,0	8,5	9,6	9,5
O28	3,0	4,5	4,0	7,0	5,0	6,6	8,0	9,0	9,0
O29	5,0	4,9	4,3	6,6	6,0	6,9	9,0	8,5	8,0
O30	4,0	5,0	5,0	6,5	6,0	6,8	9,0	8,5	8,0

Fuente: propia

Para comprobar la validez de la metodología automatizada (A), se realizó una prueba de hipótesis frente a otras dos metodologías tradicionales: inspección por un experto (E) e indagación a los usuarios (U), mediante una encuesta. Se tabularon los datos de la experimentación de interacción entre los operadores y las interfaces de supervisión de la planta del proceso de dosificación de líquidos. Las valoraciones arrojadas por el sistema desarrollado, sirvieron para clasificar las interfaces como de baja, media y alta usabilidad. La comparación se muestra en la [tabla 6.1](#).

Con los datos obtenidos, se desea suponer que por las valoraciones dadas, los tres métodos son aproximados. Entonces la hipótesis nula es que el promedio las valoraciones son iguales o estadísticamente existen diferencias significativas que permitan afirmar que el promedio de los tres métodos no es el mismo. Para probar esta hipótesis se elaboraron tablas de análisis de varianza o Anova.

En la tabla de Anova, la fuente de variación tiene dos componentes, el factor y el error. Esta fuente de variación se descompone en una suma de cuadrados, la suma de cuadrados del factor, expresada como una diferencia de cuadrados y la suma de cuadrados del error, otra diferencia de cuadrados. Los grados de libertad del factor es $c - 1$ y los grados de libertad del error es $n - c$, donde c es el número de columnas (3) y n es el número de datos (30). Igualmente, se calculó el cuadrado medio como la suma de cuadrados entre el grado de libertad, tanto para el factor como para el error. La última columna se calcula la estadística de prueba f , como el cuadrado medio del factor entre el cuadrado medio del error (ver [tabla 6.2](#)).

Tabla 6.2. Operaciones de Anova para la prueba de hipótesis

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	$SC_{factor} = \sum \frac{C_i^2}{k_i} - \frac{(\sum x)^2}{n}$	$c - 1$	$CM_{factor} = \frac{SC_{factor}}{c - 1}$	$\frac{CM_{factor}}{CM_{error}}$
Error	$SC_{error} = \sum x^2 - \sum \frac{C_i^2}{k_i}$	$n - c$	$CM_{error} = \frac{SC_{error}}{n - c}$	

Haciendo las operaciones y tomando de una tabla de valores críticos de distribución para un 1% de área de rechazo, se ubica la relación entre 3 grados de libertad para el factor y 27 grados de libertad para el error, se obtiene un valor crítico de 4,77. Los resultados para la estadística de prueba fueron para la usabilidad baja es 0,05, para media es 1,97 y para alta es 0,38. Esto indica que la hipótesis no se descarta, es decir, en promedio las valoraciones son similares. Con ello, se deduce

que la metodología propuesta, tiene equivalencia con dos metodologías tradicionales, la inspección de un experto y la indagación a los usuarios en un 99%, con la ventaja que es completamente automatizada. Las tablas de Anova, [tabla 6.3](#), [tabla 6.4](#) y [tabla 6.5](#), muestran los resultados de los cálculos del factor obtenidos para los datos de la evaluación de usabilidad baja, media y alta de las interfaces.

Tabla 6.3. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,20	3	0,07	0,05
Error	34,25	27	1,27	

Tabla 6.4. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	6,07	3	2,02	1,97
Error	27,80	27	1,03	

Tabla 6.5. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,77	3	0,26	0,38
Error	18,32	27	0,68	

Es importante aclarar, que esta metodología está en función de la interacción con el operador, pero el comportamiento del operador puede obedecer a otras variables no tenidas en cuenta en la metodología. Por ejemplo, los operadores pueden manifestar diversos comportamientos o realizar varias actividades que no están ligadas directamente con el proceso, incluso, la actividad de interacción con las pantallas de una interfaz puede generar aburrimiento entre los operadores. Estos elementos aunque importantes no son considerados dentro de esta metodología.

El desempeño del operador durante la interacción a través de la interfaz, tiene una relación directa con el conocimiento que tenga del proceso, haciéndolo más eficaz o menos productivo a la hora de realizar una tarea y/o tomar decisiones. Varias de las tareas asignadas a los operadores se rigen bajo ciertos patrones de secuencias a seguir, luego, depende del operador y su habilidad para memorizar y realizar n veces la misma acción, la cantidad de veces que se siga la misma secuencia en determinado tiempo.

6.2 RESULTADOS DEL ENTRENAMIENTO DEL ANFIS CON LA INTERFAZ DE LA PLANTA DEL PROCESO DE PASTERIZACIÓN

Del mismo modo, para el entrenamiento de la red neuronal, se utilizó una muestra de un conjunto de 100 datos de la valoración dada por un experto en usabilidad de interfaces, una capa oculta de 10 neuronas y el algoritmo de retropropagación de Levenberg-Marquardt. Para comprobar la validez de la metodología automatizada (A), se realizó una prueba de hipótesis frente a otras dos metodologías tradicionales: inspección por un experto (E) e indagación a los usuarios (U), mediante una encuesta. Se tabularon los datos de la experimentación de interacción entre los operadores y las interfaces de supervisión de la planta del proceso de pasterización.

Tabla 6.6. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la planta de pasterización durante el entrenamiento.

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,5	4,0	4,5	6,9	6,5	6,0	7,9	8,4	8,3
O2	4,1	4,0	4,5	6,6	6,0	6,1	8,4	8,0	8,5
O3	4,1	4,0	4,5	6,8	7,0	6,5	8,9	8,2	8,5
O4	4,1	4,0	4,0	6,5	6,0	6,8	8,3	8,0	8,5
O5	4,4	4,5	4,5	6,5	6,3	7,0	8,3	8,1	8,0
O6	4,7	4,0	4,5	6,7	6,4	7,0	9,1	8,6	8,5
O7	3,6	3,6	4,2	6,5	6,9	7,0	8,8	8,1	8,5
O8	4,0	3,2	4,3	6,4	6,2	6,7	9,0	8,5	8,6
O9	4,5	3,6	4,0	7,1	6,6	7,4	9,0	9,0	9,0
O10	4,5	3,2	4,0	6,6	6,2	6,9	8,5	9,2	8,9
O11	4,7	4,1	4,6	6,5	7,0	6,6	8,3	8,9	8,5
O12	4,3	4,0	4,4	6,6	7,0	7,0	8,5	8,9	9,0
O13	4,0	4,0	4,5	6,8	7,0	6,7	8,5	9,0	9,0
O14	4,9	4,5	4,5	7,0	6,4	6,4	8,5	9,0	9,0
O15	4,8	4,8	4,5	7,0	7,0	6,5	8,1	9,0	9,0
O16	4,9	4,7	4,4	6,5	7,0	6,8	8,4	9,0	8,7
O17	3,4	4,3	4,0	6,7	7,0	6,5	8,4	9,0	9,1
O18	4,4	4,5	4,3	6,8	6,6	6,3	8,9	9,0	8,8
O19	5,0	4,9	4,6	7,0	6,3	6,5	8,7	8,4	9,0
O20	5,0	4,7	4,4	7,0	7,1	6,5	8,4	8,9	9,0
O21	3,4	4,2	4,5	7,0	6,8	6,4	8,3	8,0	8,9
O22	4,7	4,4	4,5	6,7	6,4	6,9	8,9	8,5	9,5
O23	4,4	4,9	4,7	6,4	6,0	6,3	8,1	9,0	9,0
O24	4,3	4,0	4,8	6,3	6,0	6,9	8,6	9,4	9,5
O25	5,0	4,5	5,2	7,0	6,5	6,5	8,1	9,0	9,0
O26	3,5	4,3	3,7	7,0	6,5	6,6	8,2	9,0	9,0
O27	3,6	5,0	4,0	7,6	7,0	6,5	8,5	9,0	9,5
O28	3,9	4,5	4,2	7,0	6,5	6,5	8,1	9,0	9,0
O29	5,0	4,9	4,7	6,5	7,0	6,7	9,0	8,5	8,2
O30	4,0	5,0	4,5	6,5	7,0	6,5	9,0	8,5	8,0

Fuente: propia

Las valoraciones arrojadas por el sistema desarrollado, sirvieron para clasificar las interfaces como de baja, media y alta usabilidad. La comparación se muestra en la [tabla 6.6](#).

Con los datos obtenidos, se desea suponer que por las valoraciones dadas, los tres métodos son aproximados. Entonces la hipótesis nula es que el promedio las valoraciones son iguales o estadísticamente existen diferencias significativas que permitan afirmar que el promedio de los tres métodos no es el mismo. Para probar esta hipótesis se elaboraron tablas de Anova.

En la tabla de Anova, la fuente de variación tiene dos componentes, el factor y el error. Esta fuente de variación se descompone en una suma de cuadrados, la suma de cuadrados del factor, expresada como una diferencia de cuadrados y la suma de cuadrados del error, otra diferencia de cuadrados. Los grados de libertad del factor es $c - 1$ y los grados de libertad del error es $n - c$, donde c es el número de columnas (3) y n es el número de datos (30). Igualmente, se calculó el cuadrado medio como la suma de cuadrados entre el grado de libertad, tanto para el factor como para el error. La última columna se calcula la estadística de prueba f , como el cuadrado medio del factor entre el cuadrado medio del error (ver [tabla 6.7](#)).

Tabla 6.7. Operaciones de Anova

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	$SC_{factor} = \sum \frac{C_i^2}{k_i} - \frac{(\sum x)^2}{n}$	$c - 1$	$CM_{factor} = \frac{SC_{factor}}{c - 1}$	$\frac{CM_{factor}}{CM_{error}}$
Error	$SC_{error} = \sum x^2 - \sum \frac{C_i^2}{k_i}$	$n - c$	$CM_{error} = \frac{SC_{error}}{n - c}$	

Fuente: propia

Igual que en el caso anterior, haciendo las operaciones y tomando de una tabla de valores críticos de distribución f para un 1% de área de rechazo, se ubica la relación entre 3 grados de libertad para el factor y 27 grados de libertad para el error, se obtiene un valor crítico de 4,77. Los resultados para la estadística de prueba fueron para la usabilidad baja es 0,12, para media es 0,34 y para alta es 0,78. Esto indica que la hipótesis no se descarta, es decir, en promedio las valoraciones son similares. Con ello, se deduce que la metodología propuesta, tiene equivalencia con dos metodologías tradicionales, la inspección de un experto y la indagación a los usuarios en un 99%, con la ventaja de ser completamente automatizada. Las tablas de Anova, [tabla 6.8](#), [tabla 6.9](#) y [tabla 6.10](#), muestran los resultados de los cálculos del factor obtenidos para los datos de la evaluación de usabilidad baja, media y alta de las interfaces.

Tabla 6.8. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,23	3	0,08	0,12
Error	17,12	27	0,63	

Tabla 6.9. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,35	3	0,12	0,34
Error	9,35	27	0,35	

Tabla 6.10. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,18	3	0,39	0,78
Error	13,67	27	0,51	

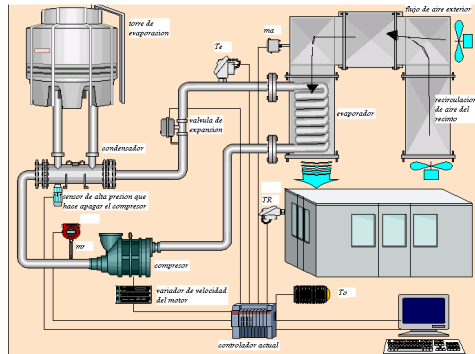
Es importante aclarar, que esta metodología está en función de la interacción con el operador, pero el comportamiento del operador puede obedecer a otras variables no tenidas en cuenta en la metodología. Por ejemplo, los operadores pueden manifestar diversos comportamientos o realizar varias actividades que no están ligadas directamente con el proceso, incluso, la actividad de interacción con las pantallas de una interfaz puede generar aburrimiento entre los operadores. Estos elementos aunque importantes no son considerados dentro de esta metodología.

El desempeño del operador durante la interacción a través de la interfaz, tiene una relación directa con el conocimiento que tenga del proceso, haciéndolo más eficaz o menos productivo a la hora de realizar una tarea y/o tomar decisiones. Varias de las tareas asignadas a los operadores se rigen bajo ciertos patrones de secuencias a seguir, luego, depende del operador y su habilidad para memorizar y realizar n veces la misma acción, la cantidad de veces que se siga la misma secuencia en determinado tiempo.

6.3 RESULTADOS CON INTERFACES DE PRUEBA

Para establecer una confiabilidad de la metodología, se realizaron pruebas con varias interfaces de varios procesos, que se relacionan a continuación. Por cada una, se presenta una pantalla de la interfaz y la tabla correspondiente a la comparación de la evaluación de usabilidad con las otras dos técnicas.

Figura 6.1. Interfaz humano-máquina para control óptimo de sistemas de refrigeración y aire acondicionado.



Fuente: Hurtado, 2005

Tabla 6.11. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para un sistema de refrigeración y aire acondicionado

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,0	4,0	4,0	6,5	6,5	7,8	8,0	8,5	8,0
O2	4,6	5,0	5,0	6,6	7,0	7,0	8,6	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	5,0	6,9	6,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O4	4,0	5,0	4,0	6,8	7,0	6,0	8,5	9,0	8,0
O5	5,0	4,0	4,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O6	4,0	4,0	3,9	6,0	6,0	5,8	8,0	8,0	7,9
O7	4,0	5,0	4,0	6,4	7,0	6,0	8,0	8,0	8,0
O8	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O9	4,0	4,0	4,0	6,9	6,0	7,0	8,5	9,0	9,0
O10	5,0	4,0	5,0	7,1	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O11	4,6	5,0	4,1	6,5	7,0	6,0	8,6	9,0	8,0
O12	4,0	4,5	4,8	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	8,0
O13	5,0	4,0	4,0	7,0	7,0	6,0	9,0	9,0	9,0
O14	4,0	4,0	5,0	7,0	6,2	7,0	9,0	8,0	9,0
O15	4,5	4,7	4,0	6,5	6,6	6,0	8,5	8,7	8,0
O16	5,0	4,0	3,8	6,5	6,0	5,7	9,0	9,0	8,0
O17	4,0	4,5	4,0	7,1	6,5	6,8	8,5	8,0	9,0
O18	5,0	5,0	5,0	7,2	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O19	5,0	4,0	4,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	8,0
O20	4,0	5,0	5,0	6,5	7,0	7,0	8,5	9,0	9,0
O21	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0
O22	3,9	5,0	5,0	6,5	7,0	7,0	8,0	9,0	8,0
O23	4,0	4,0	4,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O24	5,0	4,6	4,0	7,0	6,6	6,7	9,0	8,6	9,0
O25	4,5	4,0	4,6	6,5	7,0	6,6	9,0	9,0	8,6
O26	4,0	4,0	4,0	7,0	6,0	5,6	9,0	8,0	8,0
O27	5,0	4,9	5,0	7,0	6,9	7,0	9,0	8,0	9,0
O28	4,0	4,0	4,0	6,0	7,0	6,0	8,0	8,0	8,0
O29	4,8	4,2	4,0	6,7	6,2	6,0	8,8	8,2	8,0
O30	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0

Fuente: propia

Tabla 6.12. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,14	3	0,05	0,06
Error	19,66	27	0,73	

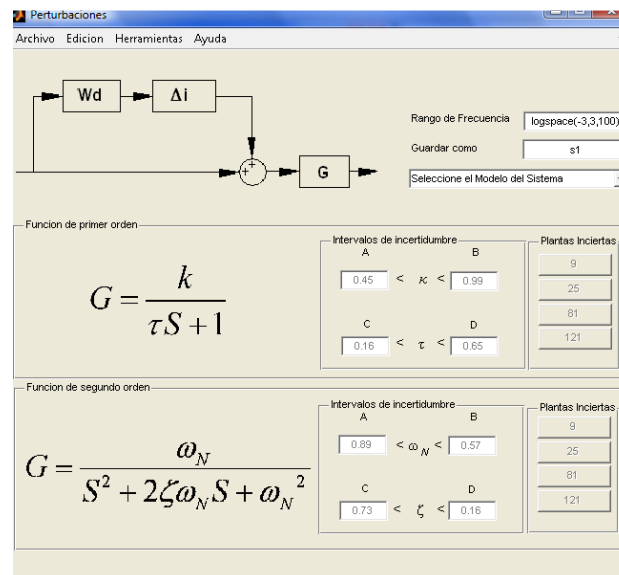
Tabla 6.13. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,58	3	0,19	0,27
Error	19,29	27	0,71	

Tabla 6.14. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,84	3	0,28	0,39
Error	19,34	27	0,72	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.2. Interfaz humano-máquina para manejo de incertidumbres en procesos

Fuente: Blanco y Prieto, 2007.

Tabla 6.15. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para manejo de incertidumbres en procesos

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	7,0	5,0	5,0	6,0	6,5	6,4	9,0	8,5	8,0
O2	4,6	5,0	5,0	6,6	7,0	6,0	8,6	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	5,0	7,0	6,0	5,0	9,0	9,0	9,0
O4	4,0	5,0	4,0	7,0	7,0	4,0	9,0	9,0	8,0
O5	5,0	4,0	5,0	7,0	7,0	5,0	9,0	9,0	8,0
O6	4,0	4,0	3,9	6,0	6,0	5,8	8,0	8,0	7,9
O7	4,0	5,0	4,0	6,5	7,0	6,8	8,0	8,0	8,0
O8	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	6,0	9,0	9,0	8,0
O9	4,0	4,0	4,0	7,0	6,0	5,0	8,5	9,0	9,0
O10	5,0	4,0	5,0	7,0	6,0	4,6	9,0	8,0	9,0
O11	4,6	5,0	4,0	6,6	6,0	5,0	9,0	9,0	8,0
O12	4,0	4,5	5,0	7,0	6,0	5,9	9,0	8,0	8,0
O13	5,0	5,0	4,0	6,0	7,0	6,9	9,0	9,0	9,0
O14	4,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,1	9,0	8,0	9,0
O15	4,5	4,7	4,0	6,5	6,7	6,8	8,5	8,7	8,0
O16	5,0	4,0	5,0	6,5	6,0	6,0	9,0	9,0	8,0
O17	4,0	4,5	4,0	7,0	6,5	6,3	8,5	8,0	9,0
O18	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	6,7	9,0	9,0	9,0
O19	5,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,3	9,0	8,0	8,0
O20	5,0	5,0	5,0	6,5	6,0	5,9	8,5	9,0	9,0
O21	4,0	4,0	5,0	6,0	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0
O22	4,9	5,0	5,0	6,5	7,0	5,9	8,0	9,0	8,0
O23	4,0	5,0	4,0	7,0	6,0	5,6	9,0	8,0	9,0
O24	5,0	4,6	5,0	6,0	6,6	7,0	9,0	8,6	9,0
O25	4,5	4,0	4,6	6,5	6,0	7,0	9,0	9,0	8,6
O26	4,0	4,0	4,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	8,0
O27	5,0	4,9	5,0	6,0	6,9	7,0	9,0	8,0	9,0
O28	4,0	5,0	4,0	6,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0
O29	4,8	4,2	4,0	6,0	6,2	6,0	8,8	8,2	8,0
O30	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.16. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,10	3	0,03	0,03
Error	25,26	27	0,94	

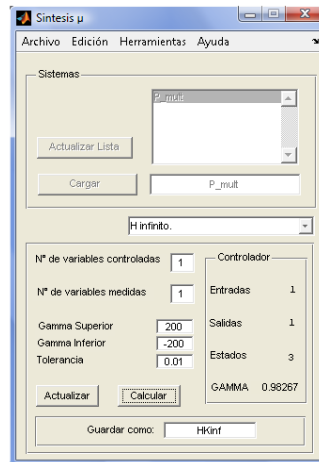
Tabla 6.17. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	3,60	3	1,20	0,92
Error	35,20	27	1,30	

Tabla 6.18. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,40	3	0,47	0,65
Error	19,58	27	0,73	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.3. Interfaz humano-máquina para análisis y síntesis de controladores robustos

Fuente: Marroquín y Rojas, 2008

Tabla 6.19. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para análisis y síntesis de controladores robustos

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	5,0	4,0	4,0	5,6	5,6	5,8	9,0	7,9	7,5
O2	4,6	5,0	5,0	6,6	7,0	7,0	8,6	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O4	4,0	5,0	4,0	7,0	7,0	6,0	9,0	9,0	8,0
O5	5,0	4,0	4,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O6	4,0	4,0	3,9	5,5	6,0	6,0	8,0	7,7	7,9
O7	4,0	5,0	4,0	6,5	5,9	6,0	8,0	8,0	8,0
O8	5,0	5,0	4,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	7,5
O9	4,0	4,0	4,0	7,0	6,0	6,0	8,5	9,0	9,0
O10	5,0	4,5	5,0	7,0	6,0	6,6	9,0	8,0	7,5
O11	4,6	5,0	4,0	5,3	6,0	6,0	9,0	9,0	8,0
O12	4,0	4,5	5,0	7,0	6,0	6,0	9,0	8,0	8,0
O13	5,0	5,0	4,0	6,0	5,7	6,0	9,0	7,8	7,8
O14	5,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O15	4,5	4,7	4,0	6,5	6,7	6,0	8,5	8,7	8,0
O16	5,0	4,0	4,0	6,4	6,0	6,9	9,0	9,0	7,0
O17	4,0	4,5	4,0	5,9	6,5	7,0	9,0	8,0	0,6
O18	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	6,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.19. (Continuación)

O19	5,0	4,0	4,0	6,0	5,6	7,0	9,0	7,9	8,0
O20	5,0	5,0	5,0	6,5	6,0	7,0	8,5	9,0	9,0
O21	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	9,0	8,0	8,0
O22	3,9	5,0	5,0	6,5	7,0	6,0	8,0	9,0	8,0
O23	5,0	4,0	4,0	5,8	6,0	7,0	9,0	8,0	7,4
O24	5,0	4,6	5,0	6,0	5,0	6,0	9,0	8,6	9,0
O25	4,5	4,0	4,0	6,5	6,0	6,0	9,0	7,5	8,6
O26	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	5,6	9,0	8,0	8,0
O27	5,0	4,9	5,0	6,0	6,9	6,0	9,0	8,0	7,4
O28	4,0	5,0	4,0	6,0	5,0	6,0	8,0	8,0	8,0
O29	4,8	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	9,0	8,2	8,0
O30	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.20. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,85	3	0,28	0,38
Error	20,29	27	0,75	

Tabla 6.21. Anova para usabilidad media

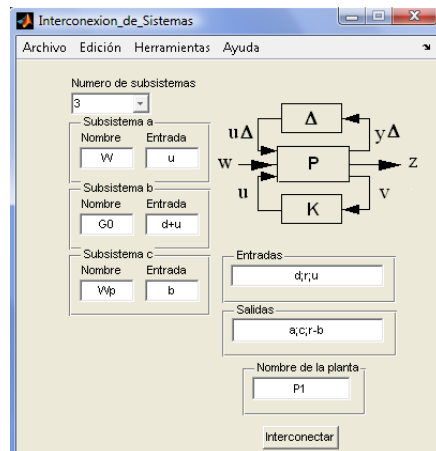
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,64	3	0,21	0,22
Error	26,10	27	0,97	

Tabla 6.22. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	12,12	3	4,04	1,22
Error	89,50	27	3,31	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.4. Interfaz humano-máquina para interconexión de sistemas de procesos



Fuente: Barrera y Gaitán, 2008.

Tabla 6.23. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la interconexión de sistemas de procesos

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,0	4,5	4,0	6,0	5,6	6,3	9,0	8,0	9,0
O2	4,6	5,0	4,5	6,6	7,0	7,0	8,6	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	4,8	7,0	6,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O4	4,0	5,0	4,6	7,0	7,0	6,0	9,0	9,0	8,0
O5	4,0	4,0	3,7	6,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O6	4,0	5,0	3,7	5,6	6,0	6,0	8,0	7,7	9,0
O7	4,0	4,9	3,5	6,5	5,9	6,0	9,0	8,5	8,0
O8	4,0	5,0	4,5	5,0	7,0	6,0	9,0	9,0	7,5
O9	4,0	5,0	4,5	7,0	6,0	6,0	8,5	9,0	9,0
O10	5,0	4,5	4,0	7,0	6,0	6,5	9,0	8,0	9,0
O11	4,0	4,0	4,5	6,0	6,0	6,0	9,0	9,0	9,0
O12	4,0	4,5	3,6	7,0	6,0	6,0	9,0	8,0	9,0
O13	5,0	5,0	4,3	6,0	5,7	6,0	9,0	8,9	7,8
O14	5,0	4,4	4,0	6,0	6,0	6,0	9,0	8,0	9,0
O15	4,5	4,7	4,0	6,5	6,7	6,0	8,5	8,7	8,0
O16	4,0	4,0	4,0	6,4	6,0	6,9	9,0	9,0	9,0
O17	4,0	4,5	5,0	6,0	6,5	6,9	9,0	8,0	0,6
O18	5,0	5,0	3,7	7,0	7,0	6,0	9,0	9,0	9,0
O19	5,0	4,0	4,0	6,0	5,7	7,0	9,0	7,9	8,0
O20	4,0	4,1	4,6	6,0	6,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O21	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	9,0	8,8	9,0
O22	3,9	5,0	4,6	6,6	7,0	6,3	8,0	9,0	9,0
O23	5,0	4,0	4,0	5,9	6,0	7,0	9,0	8,0	7,4
O24	5,0	5,0	5,5	6,0	5,0	6,0	9,0	8,6	9,0
O25	4,5	4,0	4,6	6,5	6,0	6,0	9,0	7,5	8,6
O26	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	5,6	9,0	8,0	8,0
O27	5,0	4,2	3,7	6,0	6,9	5,8	9,0	9,0	7,4
O28	4,0	5,1	3,8	6,0	5,0	6,0	8,0	8,0	8,0
O29	4,4	4,1	4,0	6,0	6,0	6,0	9,0	8,2	9,0
O30	4,0	4,9	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.24. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,58	3	0,53	0,71
Error	19,96	27	0,74	

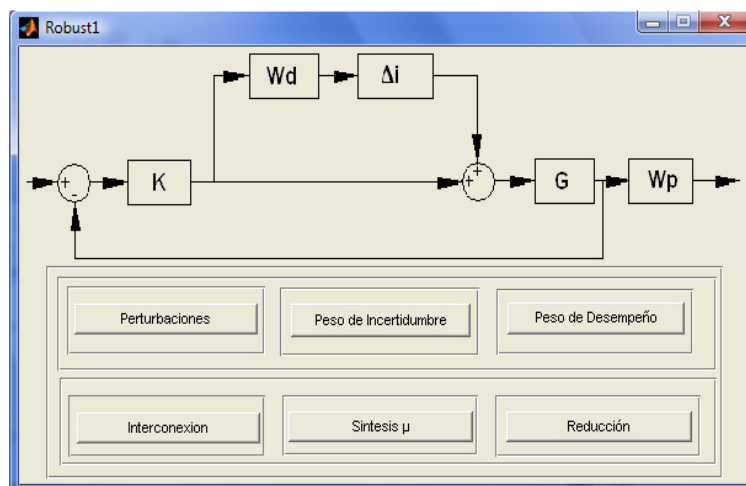
Tabla 6.25. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,20	3	0,07	0,08
Error	23,60	27	0,87	

Tabla 6.26. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	5,02	3	1,67	0,52
Error	86,48	27	3,20	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.5 Interfaz humano-máquina para el diseño de controladores robustos

Fuente: Hurtado y Villarreal, 2008.

Tabla 6.27. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el diseño de controladores robustos

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	5,1	4,0	4,0	7,0	6,0	6,2	8,0	7,5	9,0
O2	4,6	5,0	4,5	6,6	7,0	7,0	7,5	7,5	9,0
O3	5,0	5,0	4,0	7,0	6,0	7,0	7,5	7,5	9,0
O4	4,0	4,0	4,5	7,0	7,0	6,0	7,5	7,5	8,0
O5	5,0	4,0	3,7	6,0	6,0	6,0	7,5	7,5	8,0
O6	4,7	5,0	3,6	5,6	6,0	6,0	7,5	7,5	9,0
O7	4,0	4,0	3,7	6,7	5,9	6,0	7,5	7,5	8,0
O8	5,0	5,0	5,0	6,0	7,2	6,0	7,5	8,0	7,5
O9	4,0	4,0	4,5	7,0	5,8	6,0	9,0	8,0	9,0
O10	5,0	4,5	4,0	7,0	6,0	6,6	8,0	8,0	9,0
O11	5,0	4,0	3,9	6,0	6,0	6,0	8,0	7,5	9,0
O12	4,4	4,0	4,0	7,0	6,0	6,0	7,5	9,0	9,0
O13	5,0	5,0	4,3	6,0	6,0	6,0	7,5	8,0	7,8
O14	5,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	9,0	8,0	9,0
O15	5,0	4,7	3,6	6,5	6,0	6,0	7,5	7,5	8,0
O16	4,0	4,0	4,0	7,0	6,0	6,9	7,5	9,0	9,0
O17	5,0	4,0	5,0	6,0	6,5	6,9	7,5	8,0	0,6
O18	4,0	5,0	3,8	7,0	7,0	5,8	7,5	9,0	9,0
O19	5,0	4,0	4,0	7,0	5,6	7,0	9,0	7,5	8,0
O20	4,0	4,2	5,0	6,0	6,0	7,0	8,0	8,0	9,0
O21	5,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	8,0	7,5	9,0
O22	4,7	4,8	4,0	7,0	7,1	6,3	7,5	9,0	9,0
O23	5,0	4,1	4,0	7,0	6,0	7,0	8,0	7,5	7,4
O24	5,0	4,0	4,1	7,0	5,0	6,0	7,5	8,0	9,0
O25	4,5	4,0	3,7	6,5	6,0	6,0	8,0	8,0	8,6
O26	5,0	4,0	4,0	6,0	6,0	5,7	7,5	7,5	8,0
O27	4,0	4,2	4,0	6,0	6,9	5,8	9,0	9,0	7,4
O28	5,0	5,1	4,0	6,0	6,0	6,0	8,0	7,5	8,0
O29	4,8	4,1	5,0	6,0	6,0	6,0	7,5	8,0	9,0
O30	4,0	5,2	3,7	7,0	7,0	7,0	7,5	7,5	9,0

Tabla 6.28. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	4,39	3	1,46	1,86
Error	21,24	27	0,79	

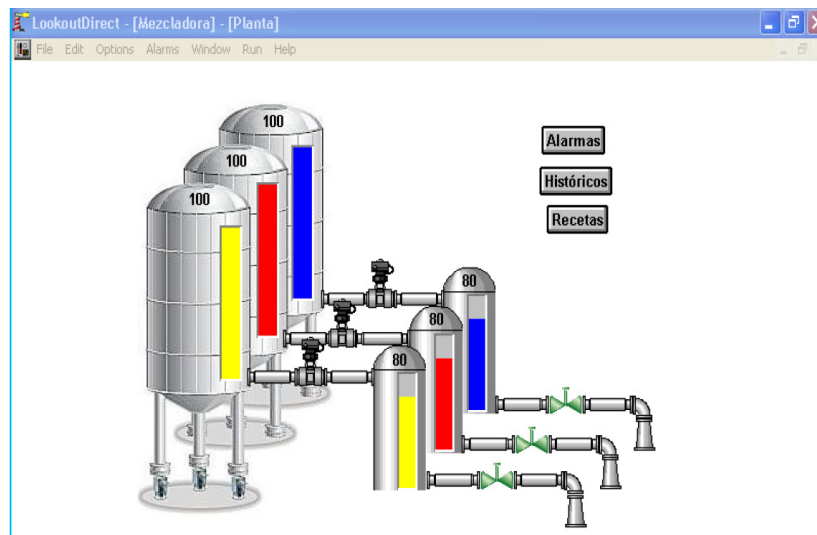
Tabla 6.29. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,43	3	0,48	0,58
Error	22,30	27	0,83	

Tabla 6.30. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	3,33	3	1,11	0,33
Error	90,37	27	3,35	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.6 Interfaz humano-máquina para sistema de control de un proceso híbrido

Fuente: Guevara y Pereira, 2009.

Tabla 6.31. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para sistema de control de un proceso híbrido

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	5,1	4,0	4,0	6,0	6,5	6,7	8,0	8,5	9,0
O2	4,6	5,0	4,5	5,0	7,0	7,0	8,5	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	3,7	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O4	4,0	4,0	4,4	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O5	5,0	4,0	4,0	6,0	7,0	6,0	8,0	9,0	8,0
O6	4,7	5,0	4,0	5,6	6,0	6,9	7,0	8,0	9,0
O7	4,5	4,0	4,0	5,0	6,6	7,0	7,0	8,6	9,0
O8	5,0	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	8,6	9,0	9,0
O9	4,0	4,0	4,5	6,5	7,0	6,0	7,6	9,0	8,0
O10	5,0	4,5	4,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O11	5,0	4,0	3,6	5,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0
O12	4,4	4,0	3,7	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0

Tabla 6.31. (Continuación)

O13	5,0	5,0	4,2	6,0	7,0	6,9	8,0	9,0	9,0
O14	5,0	4,0	4,0	5,8	6,9	6,0	8,0	8,9	8,0
O15	5,0	4,7	3,8	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O16	4,0	4,0	4,4	6,0	6,0	7,0	8,0	8,0	9,0
O17	5,0	4,0	5,0	5,0	7,0	6,0	8,0	9,0	8,0
O18	4,0	5,0	3,8	6,9	7,0	7,0	7,9	9,0	9,0
O19	5,0	4,0	4,0	5,9	7,0	6,5	8,0	9,0	9,0
O20	5,0	4,1	5,0	5,0	6,0	7,0	8,9	8,0	9,0
O21	5,0	4,1	3,6	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O22	4,7	4,9	3,7	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0
O23	4,6	4,1	4,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0	9,0
O24	5,0	4,0	4,0	5,6	7,0	6,5	7,9	9,0	9,0
O25	4,5	4,0	4,0	6,0	6,0	7,0	8,9	8,0	9,0
O26	5,0	4,0	4,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O27	4,0	4,2	3,8	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O28	5,0	5,1	3,7	5,0	6,5	7,0	7,0	8,5	9,0
O29	4,8	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	7,7	8,0	9,0
O30	4,0	5,0	4,6	5,0	7,0	6,0	8,0	9,0	8,0

Tabla 6.32. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	5,37	3	1,79	2,33
Error	20,76	27	0,77	

Tabla 6.33. Anova para usabilidad media

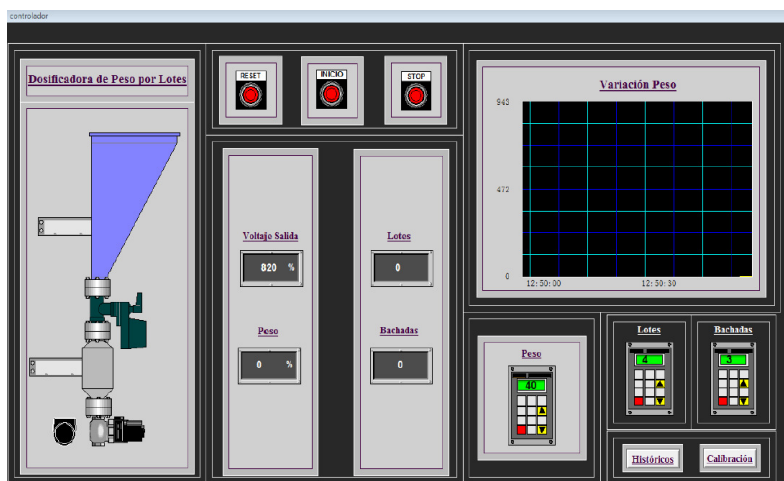
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	32,49	3	10,83	5,62
Error	52,02	27	1,93	

Tabla 6.34. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	25,32	3	8,44	4,85
Error	46,94	27	1,74	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo, pero si con el 5%

Figura 6.7 Interfaz humano-máquina para control de procesos por lotes utilizando redes de Petri difusas



Fuente: Mojica y Suárez, 2009.

Tabla 6.35. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el control de procesos por lotes utilizando redes de Petri difusas

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,5	3,9	4,5	6,5	5,9	6,5	7,9	8,4	8,3
O2	4,1	3,9	4,5	6,1	5,9	6,5	8,4	8,0	8,5
O3	4,1	4,0	4,5	6,1	6,0	6,5	8,9	8,2	8,5
O4	4,1	4,0	4,5	6,0	6,0	6,5	8,3	8,0	8,0
O5	4,4	4,5	4,5	6,4	6,5	6,5	8,3	8,1	8,0
O6	5,0	4,0	4,5	6,7	6,0	6,5	9,1	8,6	8,5
O7	3,7	3,6	4,2	5,6	5,5	6,2	8,8	8,1	8,5
O8	4,0	3,2	4,2	6,0	5,0	6,2	9,0	8,5	8,6
O9	4,5	3,8	4,0	6,5	5,5	6,0	9,0	9,0	8,0
O10	5,0	3,4	4,0	6,5	5,5	6,0	8,5	9,2	8,9
O11	4,7	4,1	4,5	6,7	6,1	6,5	8,3	8,9	8,5
O12	5,0	4,0	4,5	6,3	6,0	6,5	8,5	8,9	8,0
O13	4,0	4,0	4,5	6,0	6,0	6,5	8,5	9,0	8,0
O14	4,9	4,4	4,5	7,0	6,5	6,5	8,5	9,0	9,0
O15	4,8	4,8	4,5	8,8	6,9	6,5	8,1	9,0	8,0
O16	4,9	4,8	4,4	8,9	6,7	6,4	8,4	9,0	8,0
O17	5,0	4,3	4,0	5,5	6,3	6,0	8,4	9,0	9,1
O18	4,8	4,5	4,3	6,8	6,5	6,3	8,9	9,0	8,8
O19	5,0	4,9	4,6	7,0	6,9	6,6	8,7	8,4	9,0
O20	5,0	4,7	4,5	7,0	6,7	6,5	8,4	8,9	8,0
O21	3,5	4,2	4,5	7,0	6,2	6,5	8,3	8,0	8,9
O22	5,0	4,4	4,5	7,0	6,4	6,0	8,9	8,5	9,5
O23	4,5	4,9	4,7	6,4	6,9	6,7	8,1	9,0	9,0
O24	4,3	4,0	4,9	7,0	6,0	6,9	8,6	9,4	8,0
O25	5,0	4,5	5,2	7,0	6,5	6,0	8,1	9,0	9,0
O26	5,0	4,3	3,7	5,2	6,3	5,6	8,2	9,0	9,0
O27	5,0	5,0	4,0	5,6	7,0	6,0	8,5	9,0	9,5
O28	3,5	4,5	4,2	5,5	6,5	6,0	8,1	9,0	8,0
O29	5,0	4,9	4,7	6,9	6,9	6,7	9,0	8,5	8,0
O30	5,0	5,0	4,5	6,9	6,9	6,5	9,0	8,5	8,0

Tabla 6.36. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,29	3	0,43	0,67
Error	17,40	27	0,64	

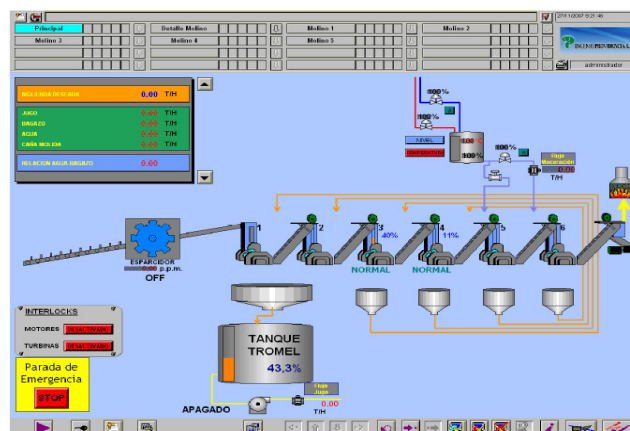
Tabla 6.37. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,39	3	0,46	0,41
Error	30,68	27	1,14	

Tabla 6.38. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,73	3	0,24	0,42
Error	15,78	27	0,58	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.8 Interfaz humano-máquina para el proceso de molinda del ingenio Providencia

Fuente: Acosta, 2008.

Tabla 6.39. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el proceso de molienda del ingenio Providencia

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,7	4,0	4,0	7,0	6,5	5,9	9,0	8,5	8,2
O2	4,3	4,0	5,0	6,6	6,0	6,0	8,5	8,0	9,0
O3	4,0	4,0	5,0	6,8	7,0	7,0	9,0	8,2	7,5
O4	4,0	4,0	5,0	6,5	6,0	7,0	8,4	8,0	7,5
O5	4,6	4,6	5,0	6,9	6,3	7,0	9,0	8,1	7,5
O6	4,8	4,0	5,0	6,7	8,4	7,0	9,1	8,6	9,0
O7	3,6	3,6	3,0	6,4	6,9	7,0	9,0	8,0	8,4
O8	4,0	3,5	3,0	6,2	6,0	7,0	9,0	8,5	8,0
O9	4,8	3,5	3,0	7,0	6,5	7,6	9,5	9,0	7,5
O10	4,5	3,2	3,0	6,5	6,0	7,0	9,0	9,2	8,0
O11	4,7	4,0	4,0	7,0	7,0	6,5	8,0	9,0	9,0
O12	4,3	4,0	5,0	6,6	7,0	6,9	9,0	9,0	8,0
O13	4,0	4,0	5,0	6,8	7,0	6,7	8,4	9,0	8,6
O14	5,0	4,0	4,0	7,0	6,4	6,4	8,9	9,0	7,5
O15	5,0	4,9	4,3	6,4	7,0	6,5	8,0	9,0	7,5
O16	5,0	4,7	4,4	7,0	7,0	6,9	8,3	9,0	9,0
O17	4,0	4,4	4,9	7,0	7,0	6,7	9,0	9,0	8,0
O18	5,0	4,5	4,0	7,0	5,0	6,4	9,0	9,0	8,0
O19	5,0	4,9	4,3	7,0	6,3	6,7	8,7	8,4	9,0
O20	5,0	4,0	4,4	7,0	7,1	6,4	9,0	8,9	7,5
O21	3,1	4,4	4,9	6,0	6,8	6,4	9,0	8,0	7,5
O22	4,7	4,4	5,0	6,7	6,4	7,0	9,0	8,5	9,0
O23	4,0	4,9	5,0	6,4	5,0	6,3	8,0	9,0	9,0
O24	4,3	4,0	5,0	6,0	5,0	7,0	8,5	9,6	8,0
O25	4,0	4,5	5,4	7,0	5,0	6,5	9,0	9,0	9,0
O26	4,0	4,3	4,0	7,0	5,0	6,3	8,0	9,0	7,5
O27	3,2	5,0	4,5	6,0	5,0	7,0	8,5	9,6	7,5
O28	3,2	4,9	4,0	7,0	5,0	6,5	8,0	9,0	8,5
O29	4,0	4,9	4,3	6,5	6,0	7,0	9,0	8,5	8,0
O30	4,0	5,0	5,0	6,5	6,0	7,0	9,0	8,5	8,5

Tabla 6.40. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,35	3	0,12	0,10
Error	31,03	27	1,15	

Tabla 6.41. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	4,04	3	1,35	1,11
Error	32,76	27	1,21	

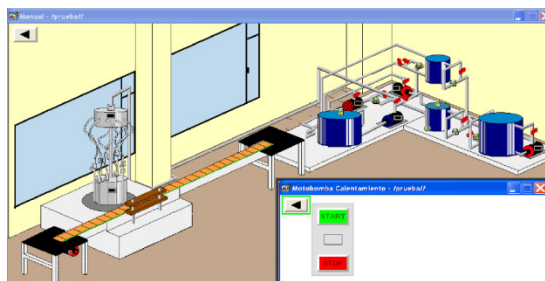
Tabla 6.42. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	6,24	3	2,08	2,01
Error	27,88	27	1,03	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Entonces, para la prueba, se pudo establecer que solo una de las ocho interfaces anteriores no se encontró en el rango de los factores críticos para una distribución del 99%, lo que quiere decir que la metodología tiene una efectividad del 87,5% durante la prueba.

6.4 INTERFACES PARA VALIDACIÓN

Figura 6.9 Interfaz humano-máquina de un sistema de llenado y transporte de botellas

Fuente: Montoya y Álvarez, 2012.

Tabla 6.43. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la planta de pasterización durante el entrenamiento

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,5	4,5	4,3	6,5	6,5	6,5	8,5	8,5	8,3
O2	4,5	4,0	4,0	6,0	6,5	6,4	8,5	8,0	8,0
O3	5,0	4,2	4,5	6,2	6,5	6,4	9,0	8,2	8,5
O4	4,4	4,0	4,0	6,0	6,4	6,0	8,4	8,0	8,0
O5	4,3	4,1	4,0	6,1	6,4	6,0	8,3	8,1	8,0
O6	5,1	4,6	4,9	6,6	6,7	7,0	9,1	8,6	8,9
O7	4,4	4,0	4,7	6,0	6,8	7,0	8,8	8,0	8,7
O8	5,0	4,5	4,9	6,5	7,0	6,4	9,0	8,5	8,9
O9	4,7	5,0	5,0	7,0	6,7	7,0	8,7	9,0	9,0
O10	4,9	5,2	5,0	7,1	6,9	7,0	8,9	9,2	9,0
O11	4,0	5,0	4,4	7,0	6,0	6,4	8,0	9,0	8,4
O12	4,3	5,0	4,3	7,0	6,3	6,4	8,3	9,0	8,3
O13	4,4	5,0	5,1	7,0	6,4	6,4	8,4	9,0	9,1

Tabla 6.43. (Continuación)

O14	4,9	5,0	4,8	7,2	6,9	7,0	8,9	9,0	8,8
O15	4,0	5,0	4,4	7,1	6,0	6,5	8,0	9,0	8,4
O16	4,3	5,0	4,3	7,0	6,3	6,4	8,3	9,0	8,3
O17	4,4	5,0	5,1	7,0	6,4	6,5	8,4	9,0	9,1
O18	4,9	5,0	4,8	7,0	6,9	7,0	8,9	9,0	8,8
O19	4,7	4,4	5,0	6,4	6,7	6,4	8,7	8,4	9,0
O20	4,4	4,9	5,0	6,8	6,4	6,4	8,4	8,9	9,0
O21	4,3	4,0	5,0	6,0	6,4	6,4	8,3	8,0	9,0
O22	4,6	4,5	5,6	6,5	6,6	6,4	8,6	8,5	9,6
O23	4,0	5,0	5,0	7,0	6,0	6,4	8,0	9,0	9,0
O24	4,5	5,4	5,4	7,5	6,0	6,5	8,5	9,6	9,5
O25	4,0	5,0	5,0	7,0	6,0	6,5	8,0	9,0	9,0
O26	4,0	5,0	5,0	7,0	6,0	6,5	8,0	9,0	9,0
O27	4,5	5,6	5,4	7,4	6,5	6,5	8,5	9,6	9,5
O28	4,0	5,0	5,0	7,0	6,0	6,5	8,0	9,0	9,0
O29	5,0	4,5	4,0	6,6	7,0	7,0	9,0	8,5	8,0
O30	5,0	4,5	4,0	6,5	7,0	6,2	9,0	8,5	8,0

Tabla 6.44. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,06	3	0,35	0,58
Error	16,44	27	0,61	

Tabla 6.45. Anova para usabilidad media

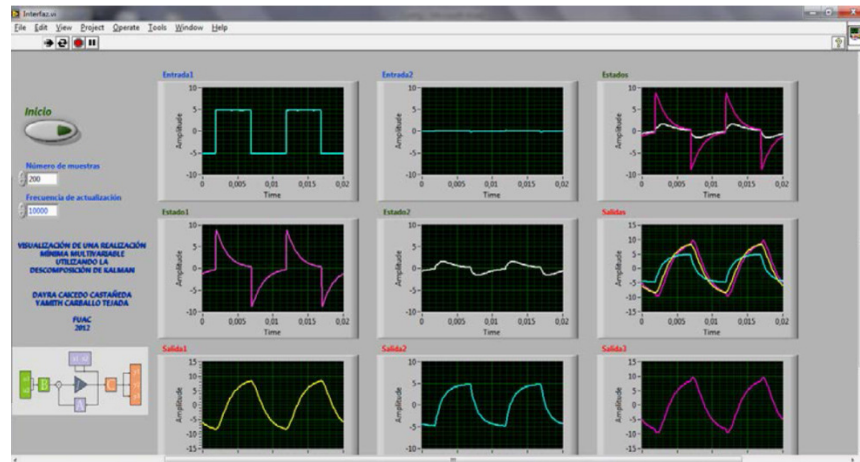
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,11	3	0,37	0,81
Error	12,36	27	0,46	

Tabla 6.46. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,00	3	0,33	0,53
Error	17,05	27	0,63	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.10 Interfaz humano-máquina para realización mínima multivariable



Fuente: Caicedo y Carballo, 2012.

Tabla 6.47. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para realización mínima multivariable

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,9	4,5	4,5	6,7	6,6	6,8	9,0	9,0	8,6
O2	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	4,8	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O4	5,0	4,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O5	5,0	4,0	5,0	7,0	7,0	7,0	8,5	9,0	8,7
O6	4,8	5,0	5,0	6,0	6,0	6,9	9,0	9,0	9,0
O7	5,0	5,0	4,5	6,0	7,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O8	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O9	5,0	4,5	5,0	6,9	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O10	5,0	5,0	5,0	7,0	6,7	7,0	9,0	9,0	8,0
O11	5,0	5,0	5,0	7,0	7,1	6,7	9,0	9,0	8,6
O12	5,0	4,1	5,1	7,0	7,1	7,0	8,9	8,5	9,0
O13	5,0	5,2	5,2	7,0	6,9	7,0	9,0	9,0	9,0
O14	4,0	5,2	5,1	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O15	5,0	5,1	5,3	6,9	6,7	7,0	9,0	9,0	8,0
O16	5,0	5,0	4,9	6,0	7,0	6,6	9,0	9,0	8,8
O17	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	8,5	9,0
O18	4,6	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	8,8	9,0	8,0
O19	5,0	4,6	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,7
O20	5,0	4,1	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O21	5,0	5,0	4,8	6,0	6,6	6,5	9,0	9,0	9,0
O22	5,0	5,2	4,9	5,9	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O23	4,8	4,5	5,0	7,0	6,9	7,0	8,6	9,0	8,8
O24	5,0	4,6	5,0	7,0	6,9	7,0	9,0	8,5	9,0
O25	5,0	5,0	4,0	7,0	7,0	6,6	9,0	9,0	8,0
O26	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	6,5	9,0	9,0	8,9
O27	4,5	4,0	5,0	7,0	6,9	7,0	9,0	9,0	9,0
O28	5,0	4,8	5,0	7,0	7,0	7,0	8,7	8,6	7,9
O29	5,0	5,0	4,3	6,8	7,0	7,0	9,0	9,0	7,9
O30	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.48. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,37	3	0,12	0,42
Error	8,10	27	0,30	

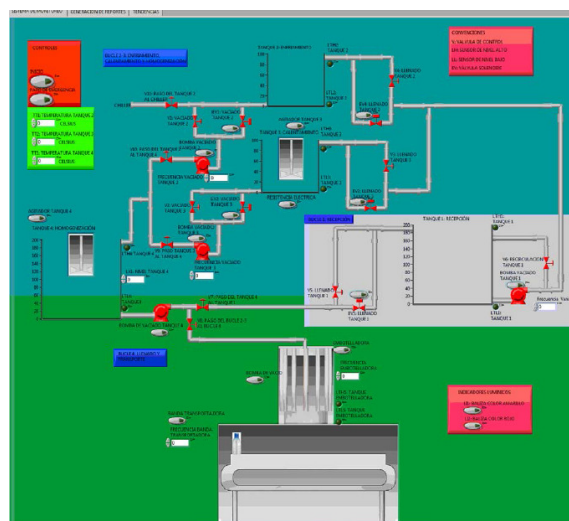
Tabla 6.49. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,24	3	0,08	0,33
Error	6,58	27	0,24	

Tabla 6.50. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,09	3	0,36	1,16
Error	8,44	27	0,31	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.11 Interfaz humano-máquina de monitorización de una planta embotelladora

Fuente: Cabra y Quito, 2012.

Tabla 6.51. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la monitorización de una planta embotelladora

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	3,9	4,8	4,0	6,0	6,0	5,8	8,0	8,5	7,8
O2	5,0	5,0	5,0	6,6	7,0	7,0	8,6	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O4	5,0	5,0	4,0	7,0	7,0	7,1	9,0	9,0	8,0
O5	5,0	4,0	4,7	6,6	7,0	7,2	9,0	9,0	9,0
O6	4,8	4,0	4,0	6,0	7,0	5,9	8,0	8,0	7,9
O7	3,0	4,7	4,5	6,0	7,0	7,1	8,0	9,0	8,0
O8	5,0	5,0	4,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O9	5,0	4,5	4,0	6,8	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O10	5,0	4,0	4,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O11	3,9	5,0	5,0	6,6	7,0	5,9	8,6	9,0	8,0
O12	4,0	4,0	4,0	7,0	7,0	7,0	9,0	8,5	9,0
O13	4,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O14	4,0	5,0	5,0	6,9	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O15	5,0	4,9	4,0	6,5	6,7	7,0	8,5	8,7	8,0
O16	3,7	5,0	4,0	6,0	7,0	5,9	9,0	9,0	7,8
O17	5,0	5,0	5,0	7,1	6,0	7,0	9,0	8,5	9,0
O18	4,6	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O19	4,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O20	5,0	4,8	4,0	6,5	7,0	7,0	8,5	9,0	9,0
O21	3,7	5,0	4,0	6,0	6,0	5,8	8,0	8,0	8,0
O22	4,0	5,0	5,0	5,9	7,0	7,0	7,9	9,0	9,0
O23	4,8	4,9	4,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O24	5,0	4,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	8,6	9,0
O25	5,0	5,0	4,0	6,5	7,0	6,6	8,5	9,0	8,6
O26	4,0	4,9	5,0	7,0	6,0	5,6	9,0	8,0	7,6
O27	3,7	4,0	4,0	7,0	6,9	7,0	9,0	8,9	9,0
O28	5,0	5,0	5,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0	8,0
O29	5,0	4,0	4,3	6,8	7,0	7,0	8,8	8,2	9,0
O30	5,0	4,0	4,0	6,0	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.52. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,64	3	0,21	0,25
Error	23,50	27	0,87	

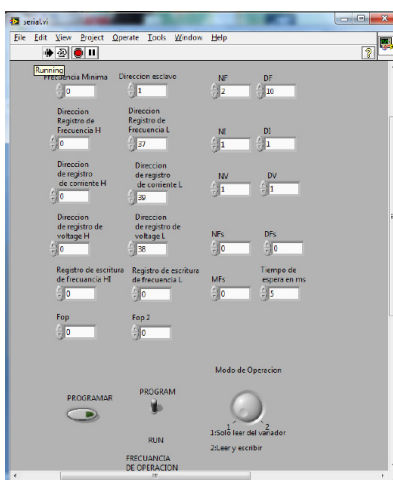
Tabla 6.53. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,29	3	0,10	0,14
Error	18,41	27	0,68	

Tabla 6.54. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,12	3	0,04	0,06
Error	18,18	27	0,67	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.12 Interfaz humano-máquina de comunicación con protocolo MODBUS de variables de un variador de velocidad

Fuente: Sainea, 2011.

Tabla 6.55. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para la la comunicación con protocolo Modbus de variables de un variador de velocidad

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,0	4,8	5,0	6,1	6,0	6,5	8,0	8,8	8,0
O2	4,8	5,0	5,0	6,6	7,0	7,0	8,6	9,0	9,0
O3	4,9	5,0	5,0	7,1	7,1	7,1	9,0	9,0	9,0
O4	5,0	5,0	4,0	6,9	7,1	6,9	9,0	9,0	8,0
O5	5,0	4,0	5,0	6,5	7,1	7,0	9,0	9,0	8,0
O6	4,8	4,1	4,0	6,0	5,9	5,9	8,0	8,7	7,9
O7	4,5	4,7	4,5	6,2	7,0	7,0	8,0	9,0	8,0
O8	4,1	5,1	5,0	7,1	7,0	6,7	8,0	9,0	9,0
O9	5,0	4,6	4,0	6,9	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O10	5,0	4,0	4,0	6,9	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O11	3,9	5,0	5,0	6,6	5,9	5,9	8,6	9,0	8,0
O12	4,0	4,2	5,0	7,0	7,0	7,1	8,0	8,5	9,0
O13	4,0	4,8	5,0	6,9	7,0	7,2	9,0	8,0	8,0
O14	4,0	5,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0

Tabla 6.55. (Continuación)

O15	4,9	4,0	4,0	6,6	6,7	6,6	8,0	8,7	8,0
O16	4,5	5,0	5,0	5,9	6,9	5,9	9,0	9,0	8,0
O17	5,0	5,0	4,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,5	9,0
O18	3,0	4,8	5,1	6,9	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O19	4,5	4,0	4,9	6,8	6,0	7,0	8,0	8,0	8,0
O20	5,0	4,9	5,0	6,5	5,8	7,0	8,5	9,0	8,0
O21	3,8	4,0	4,1	6,8	6,0	5,7	8,0	8,0	8,0
O22	4,0	5,0	4,8	5,9	7,0	6,5	7,9	9,0	8,0
O23	4,5	4,9	4,0	7,0	6,0	6,9	9,0	7,7	9,0
O24	4,0	4,0	5,0	7,0	7,0	6,9	9,0	8,6	8,0
O25	5,0	4,9	4,0	6,5	5,7	6,6	8,0	9,0	8,6
O26	4,0	4,9	5,0	6,9	6,0	5,7	9,0	8,0	8,0
O27	3,6	4,0	4,0	7,0	6,9	7,0	9,0	8,9	8,0
O28	4,5	5,0	5,0	6,0	7,0	6,9	8,0	9,0	8,0
O29	4,0	4,0	4,3	6,8	7,0	7,0	8,8	8,0	9,0
O30	5,0	4,0	4,0	6,0	5,7	7,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.56. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,65	3	0,22	0,27
Error	21,37	27	0,79	

Tabla 6.57. Anova para usabilidad media

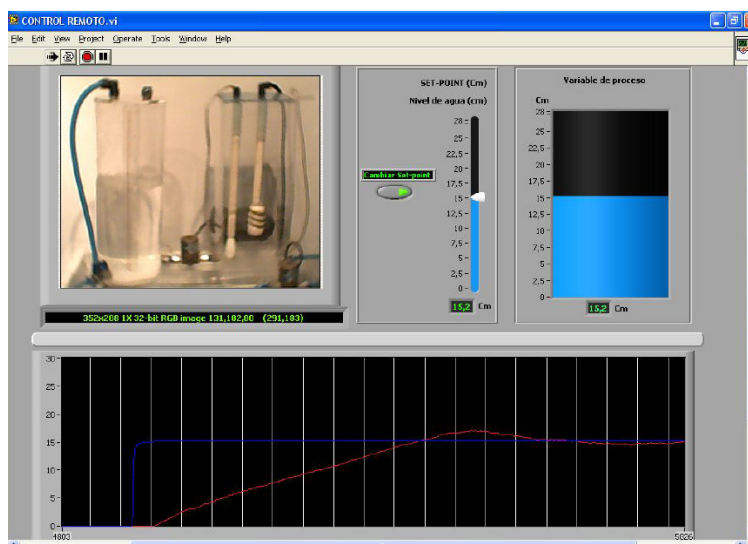
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,65	3	0,22	0,29
Error	19,75	27	0,73	

Tabla 6.58. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,84	3	0,28	0,37
Error	20,36	27	0,75	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.13. Interfaz humano-máquina para el control remoto de nivel de un proceso



Fuente: Rubio y Zipasuuca, 2009.

Tabla 6.59. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el control remoto de nivel de un proceso

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	5,0	4,7	3,9	6,1	6,0	5,8	9,0	8,9	8,0
O2	4,6	4,9	4,9	6,6	7,1	7,0	8,6	9,0	9,0
O3	5,0	4,9	3,9	7,1	7,1	7,0	9,0	9,0	9,0
O4	5,1	4,9	4,1	7,2	6,5	7,0	9,0	9,0	8,0
O5	5,1	5,0	5,1	6,6	6,6	6,6	9,0	9,0	9,0
O6	3,9	4,8	4,0	6,9	6,1	6,0	9,0	8,0	7,9
O7	3,9	5,0	4,0	5,9	6,9	7,0	9,0	8,1	7,8
O8	5,1	5,0	4,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O9	5,2	5,0	5,0	6,0	6,5	7,0	9,0	9,0	9,0
O10	5,0	4,0	4,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O11	4,7	5,0	4,1	6,6	6,4	5,9	8,6	8,5	8,0
O12	5,0	4,6	4,0	7,0	7,0	6,9	9,0	8,5	9,0
O13	5,0	4,9	4,9	7,0	7,0	6,1	9,0	9,0	8,0
O14	5,0	4,0	4,8	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O15	5,0	4,7	4,0	6,5	6,5	7,0	8,5	8,7	7,8
O16	4,9	5,0	4,5	6,0	7,0	5,9	9,0	9,0	7,8
O17	5,0	4,4	5,0	7,0	6,8	7,0	9,0	8,5	9,0
O18	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	6,0	9,0	8,6	9,0
O19	5,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O20	4,9	5,0	4,0	7,0	7,0	7,0	8,5	9,0	9,0
O21	3,9	4,0	4,0	6,0	6,6	6,0	8,0	8,0	7,9
O22	5,1	4,5	4,8	5,9	7,0	7,0	9,0	9,0	9,0
O23	5,0	4,0	5,0	7,1	6,0	6,0	9,0	9,0	9,0
O24	5,0	4,6	4,0	7,1	6,8	6,4	9,0	8,6	9,0
O25	4,5	5,0	4,6	6,5	5,9	6,6	8,5	9,0	8,6
O26	5,0	4,0	3,7	7,0	5,9	5,7	9,0	8,0	7,6
O27	5,0	4,9	4,5	7,0	6,9	7,0	9,0	8,9	9,0
O28	4,1	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	8,0	8,0	7,9
O29	4,8	4,2	5,0	6,8	7,0	7,0	8,8	8,2	9,0
O30	5,0	5,0	5,0	7,1	5,9	6,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.60. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	2,40	3	0,80	1,20
Error	18,02	27	0,67	

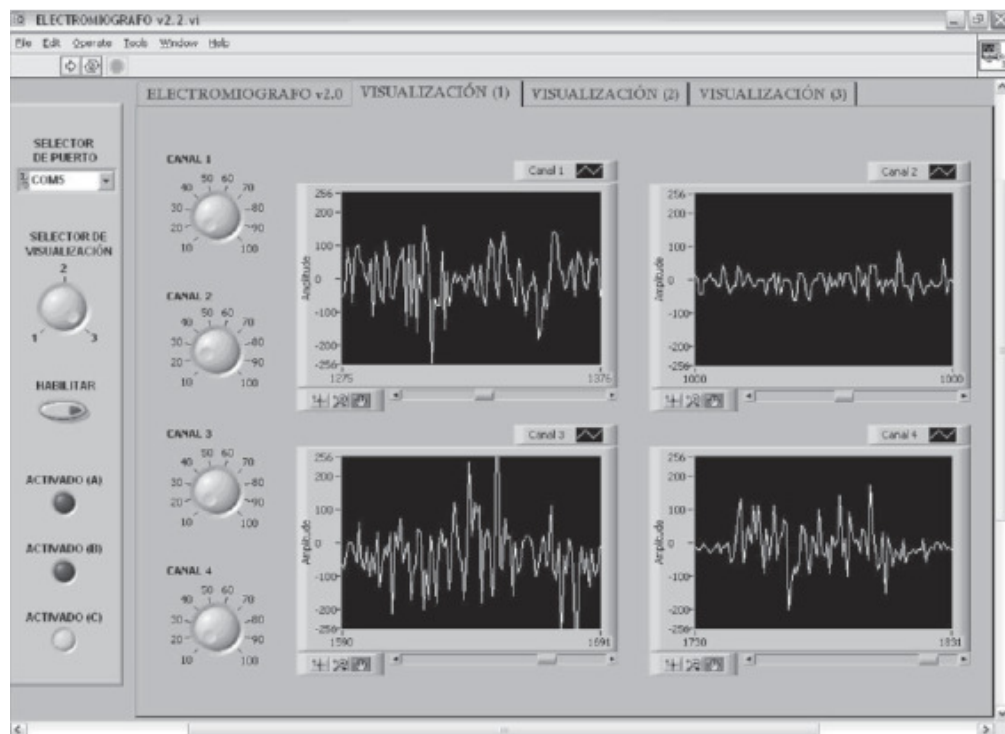
Tabla 6.61. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,41	3	0,14	0,19
Error	19,30	27	0,71	

Tabla 6.62. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	1,54	3	0,51	0,77
Error	18,02	27	0,67	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Figura 6.14 Interfaz humano-máquina para la monitorización de señales electromiográficas

Fuente: Urbina y Martínez, 2011.

Tabla 6.63. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para monitorización de señales electromiográficas.

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	3,5	5,0	5,0	6,0	6,5	6,8	8,0	8,5	8,7
O2	3,5	5,0	5,0	6,3	7,0	6,8	7,0	9,0	9,0
O3	3,5	5,0	5,0	6,0	6,8	6,9	7,0	9,0	9,0
O4	4,0	5,0	5,0	5,9	6,9	7,1	7,0	9,0	9,0
O5	3,6	5,0	4,0	6,0	6,8	6,0	8,0	9,0	8,0
O6	4,5	4,7	5,0	7,0	6,7	7,0	7,6	8,0	8,9
O7	3,6	5,0	5,0	6,9	6,6	7,0	7,0	8,6	9,0
O8	4,0	5,0	5,0	5,2	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O9	3,5	5,0	4,0	5,6	7,0	6,0	7,6	9,0	8,0
O10	3,5	5,0	5,0	5,0	7,1	7,0	7,0	9,0	9,0
O11	3,5	5,0	5,0	5,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0
O12	4,0	4,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0
O13	3,5	5,0	5,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0	8,9
O14	3,5	4,8	4,0	4,9	6,9	6,0	7,8	8,9	8,0
O15	3,5	5,0	5,0	5,0	6,9	7,0	7,0	9,0	9,0
O16	4,0	5,0	5,0	6,0	6,0	7,1	8,0	8,0	9,0
O17	3,6	5,0	4,0	4,9	7,0	6,1	7,0	9,0	8,0
O18	4,4	5,0	5,0	4,9	7,0	6,9	7,9	9,0	9,0
O19	3,6	4,0	5,0	6,1	7,0	7,0	7,9	9,0	8,5
O20	4,0	4,9	5,0	6,7	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0
O21	3,5	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O22	3,5	5,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0
O23	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0	9,0
O24	4,0	5,0	5,0	5,9	7,0	7,0	7,6	9,0	8,5
O25	3,5	5,0	5,0	5,0	6,0	7,0	7,0	8,0	9,0
O26	3,5	4,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O27	3,5	4,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0
O28	4,5	3,8	5,0	5,0	6,6	7,0	7,0	8,5	9,0
O29	3,5	5,0	5,0	5,7	5,9	7,0	7,8	8,0	8,0
O30	3,5	5,0	4,0	5,0	7,1	6,0	7,0	9,0	8,0

Tabla 6.64. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	22,47	3	7,49	5,63
Error	35,91	27	1,33	

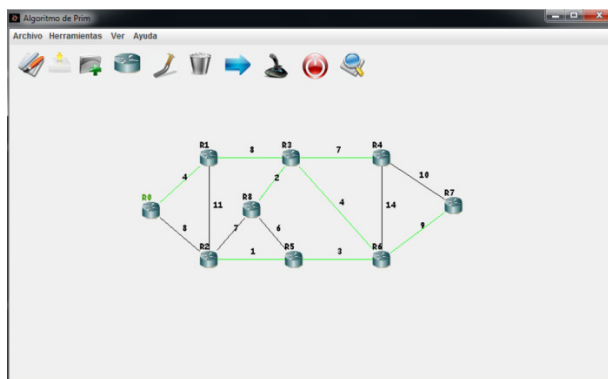
Tabla 6.65. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	28,40	3	9,47	5,10
Error	50,13	27	1,86	

Tabla 6.66. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	37,97	3	12,66	6,34
Error	53,88	27	2,00	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo, pero si con el 5%.

Figura 6.15 Interfaz humano-máquina para diseño de redes con algoritmo de enrutamiento de Prim.

Fuente: Sierra, 2011.

Tabla 6.67. Comparación de la evaluación de usabilidad de la interfaz humano-máquina para el diseño de redes con algoritmo de enrutamiento de Prim

O	Baja usabilidad			Media usabilidad			Alta usabilidad		
	E	U	A	E	U	A	E	U	A
O1	4,0	4,5	3,9	6,0	6,0	5,9	8,0	8,0	8,0
O2	4,6	5,0	5,0	6,5	7,0	6,9	8,6	9,0	9,0
O3	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	6,9	9,0	9,0	9,0
O4	5,0	5,0	4,0	7,0	6,5	6,9	9,0	9,0	8,0
O5	5,0	5,0	5,0	6,6	7,0	6,6	9,0	9,0	9,0
O6	4,0	4,0	3,9	6,0	6,0	5,9	8,0	8,0	7,9
O7	4,0	5,0	4,0	6,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O8	5,0	5,0	4,0	7,1	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O9	5,0	5,0	5,0	6,9	6,5	7,0	9,0	9,0	9,0
O10	5,0	4,0	5,0	6,9	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O11	4,6	5,0	4,0	6,6	7,0	5,9	8,6	9,0	8,0
O12	5,0	4,5	4,0	7,0	7,0	6,9	9,0	8,5	9,0
O13	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0
O14	5,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O15	4,5	4,7	4,0	6,5	6,5	7,0	8,5	8,7	8,0
O16	5,0	5,1	4,0	6,0	7,0	5,8	9,0	9,0	7,8
O17	5,0	4,5	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,5	9,0
O18	5,0	4,9	5,0	7,0	7,0	6,8	9,0	9,0	9,0
O19	5,0	4,0	5,1	7,0	6,0	6,9	9,0	8,0	9,0

Tabla 6.67. (Continuación)

O20	4,5	5,0	4,1	7,0	7,0	6,9	8,5	9,0	9,0
O21	4,0	4,0	4,0	6,0	7,6	5,8	8,0	8,0	8,0
O22	3,9	5,0	4,9	6,9	7,0	7,0	7,9	9,0	9,0
O23	5,0	4,0	5,0	7,0	6,0	7,0	9,0	8,0	9,0
O24	5,0	4,6	4,0	7,0	6,8	6,4	9,0	8,6	9,0
O25	4,5	4,9	4,6	6,5	7,1	6,6	8,5	9,0	8,6
O26	5,0	3,9	3,7	7,1	6,1	5,8	9,0	8,0	7,6
O27	5,0	4,9	5,0	7,1	6,9	7,0	9,0	8,9	9,0
O28	4,0	5,0	4,0	6,1	6,0	7,0	8,0	8,0	8,0
O29	4,8	4,2	5,0	6,8	7,0	7,0	8,8	8,2	9,0
O30	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	6,0	9,0	9,0	9,0

Tabla 6.68. Anova para usabilidad baja

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,68	3	0,23	0,33
Error	18,69	27	0,69	

Tabla 6.69. Anova para usabilidad media

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,06	3	0,02	0,03
Error	17,67	27	0,65	

Tabla 6.70. Anova para usabilidad alta

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,54	3	0,18	0,26
Error	18,90	27	0,70	

Para este caso cumple con el 1% de área de rechazo

Entonces, para los experimentos de validación, se pudo establecer que solo una de las siete interfaces anteriores no se encontró en el rango de los factores críticos para una distribución del 99%, lo que quiere decir que la metodología tiene una efectividad del 85,7% en la validación.

7. DISCUSIÓN

La discusión sobre el diseño, desarrollo y aplicación de la metodología presentada en esta Tesis, tiene consideraciones con los aspectos de la Interacción Humano-Máquina (IHM) en la supervisión de procesos automatizados, dado que los procesos cognitivos durante la interacción han cambiado sustancialmente, por el uso de artefactos altamente tecnológicos, la dependencia del humano paso de ser de interacción manual a interacción mental.

En los sistemas automatizados, se presentan procesos de alta complejidad, por ejemplo, en procesos de seguridad crítica, una acertada utilización del análisis de Factores Humanos (FH), contribuye de forma primordial al desarrollo de diseños de sistemas tecnológicos altamente especializados, como lo son las Salas de Control (SDC) para la supervisión de procesos o sistemas. El buen desempeño de las funciones que realizan los operarios en una SDC, depende de la interacción Humano-Máquina (IHM). La calidad del diseño de una SDC, depende de la exactitud del método adoptado por el tratamiento de los FH con respecto a la automatización, control supervisor e interacciones dinámicas humanas (Hurtado, 2006a). En ese sentido diferentes propuestas y aproximaciones han surgido, para enfrentar el problema de la IHM en sistemas de seguridad crítica, que utilizan sistemas interactivos basados en software, que convergen en interfaces de usuario u operador.

En los sistemas complejos de seguridad crítica como las centrales nucleares, se han puesto de manifiesto el comportamiento humano a través de métodos de evaluación de usabilidad que incluyen teoría de la actividad considerando las diferentes funciones en la sala de control, la evaluación permite la comprensión de la calidad de la sala de control con base en el nivel de resultados que produce, las prácticas de trabajo que consolida y la experiencia que el usuario crea (Savioja y Norros, 2012). Desde el punto de vista de la teoría de la actividad, en una sala de control de planta se tienen tres elementos: los instrumentos, la herramienta psicológica y la herramienta de comunicación.

La necesidad de información del proceso dentro de un entorno operativo en tiempo real, está relacionado con las tareas predefinidas y los eventos emergentes así como las actividades resultantes y los procesos de comunicación. Los operadores humanos tienen que realizar este tipo de tareas y reaccionar a este tipo de eventos que tienen lugar en su entorno. Ellos tienen que interactuar y comunicarse con otros seres humanos y máquinas para cumplir con sus funciones. La

información requerida por el operador para las actividades que regulan el control del proceso, es de un grado creciente que ya no es percibida directamente del medio ambiente a simple vista, sino obtenida a través de sistemas de sensores, enriquecidos con información adicional y comunicada por algún medio (Stein,2008) (Herczeg, 2010,). Las pantallas de la interfaz, están llenas de símbolos (enlazados con el escenario según se necesite). La combinación de la simple visión externa con pantallas convencionales, permitirá al operador obtener un mejor Conocimiento de la Situación (CS) del ambiente y del estado del sistema. La carga de trabajo también se ha optimizado y se lleva a un nivel apropiado. Los objetivos finales son el funcionamiento seguro de los sistemas, así como una mejora de su rendimiento.

Si la complejidad del sistema excede la capacidad cognitiva del operador, éste suele responder con una reducción de las estrategias cognitivas. Esto significa que el operador consciente o inconscientemente elige las partes del sistema complejo que son de menor prioridad para él en comparación con otras partes y se eliminarán las otras de su plan o modelo cognitivo. Esto puede reducir inicialmente el funcionamiento de la carga de memoria. Sin embargo, si se necesitan planes de acción, por ejemplo, para casos de emergencia o también durante las fases de alta carga cognitiva de trabajo, el operador normalmente no puede restaurar y aplicar los planes, lo que puede causar una pérdida de conocimiento de la situación o también una ruptura de la comunicación y de la acción de regulación.

El aumento de la comunicación basada en los medios del sistema y de la información importante para el control, combinado con un alto grado de automatización y complejidad del sistema, crean una gran demanda especialmente de la información y comunicación basada en medios. Estos complejos patrones de comunicación requieren de ergonomía sofisticada de información y, en particular, la importancia del modelado de los procesos cognitivos que controlan el acceso a un sistema de información.

Existen algunos aportes relacionados con la descripción general de cómo los operadores humanos logran estos desafíos físicos y mentales, que presentan y discuten algunos modelos cognitivos básicos de la actividad humana y sus límites, así como constructos psicológicos como la motivación, la emoción, regulación del esfuerzo, la carga de trabajo mental y la fatiga (Herczeg y Stein, 2012).

Igualmente, las fallas en los sistemas complejos controlados por operadores humanos pueden ser

difíciles de anticipar debido a interacciones inesperadas entre los elementos que componen el sistema, incluyendo la Interacción Humano-Automatización (IHA). El análisis de la IHA, podría beneficiarse de las técnicas que apoyan la investigación sobre las condiciones que podrían originar fallas. Algunos aportes, como la técnica de verificación formal (Bolton y otros, 2013), demuestra como un modelo a escala representa matemáticamente propiedades deseables o no y se ha utilizado para evaluar interfaces hombre-automatización para aspectos de usabilidad para encontrar posibles elementos de confusión. También se utiliza para evaluar las propiedades de seguridad del sistema a la luz del modelado analítico formal de tareas del comportamiento humano, el cual es capaz de proporcionar conocimientos sobre los problemas asociados con la IHA. La Verificación formal ofrece posibilidades para evaluarla IHA no ofrecido por otras técnicas de análisis, como la simulación y las pruebas. Por lo tanto, proporciona maneras adicionales de encontrar posibles deficiencias en interfaces humano-automatización y/o para descubrir y diagnosticar fallas en un sistema relacionado con operadores humanos.

Los modelos mentales sobre la operación de procesos automatizados, también juegan un papel importante. En la automatización de máquinas o plantas, los modelos de operación de software orientado a objetos para dispositivos de control, se está convirtiendo en una técnica de programación alternativa. Se han desarrollado experimentos de usabilidad durante la operación de procesos automatizados a través de dispositivos que utilizan el clásico paradigma procedimental comparándolo con el Lenguaje de Modelamiento Unificado (UML), desde tareas básicas hasta las más complejas, con el fin transmitir el esquema UML como proceso mental para ser utilizado durante la interacción con procesos automatizados (Vogel-Heuser y otros, 2012).

Si se superan los problemas de los procesos cognitivos durante la interacción con los procesos altamente automatizados, el tema ahora es cómo valorar o evaluar el grado en que los dispositivos y para el caso de esta Tesis, las interfaces de supervisión, cumplen satisfactoriamente con una adaptación cognitiva al operador. Con el desarrollo del internet, se ha extendido en gran medida la evaluación de la usabilidad de sitios web y varios elementos que allí se plantean, pueden ser de utilidad para otro tipo de aplicaciones, uno de ellos, la IHM.

Diversas técnicas de evaluación de usabilidad en diferentes formatos y métodos se pueden mezclar para evaluar una interfaz de operador de proceso de manera automatizada. Se ha demostrado, que las técnicas de evaluación de usabilidad en diferentes formatos cuando se adaptan al usuario, logran una mayor eficiencia. La utilización de métricas especialmente diseñadas que

incorporan características pedagógicas es beneficiosa para los usuarios y aumentan la eficiencia de la evaluación. Una interfaz rica pedagógicamente que no tenga en cuenta estos parámetros de usabilidad es probable que sea clasificada bajo en términos de satisfacción general. Se hace necesario proponer más herramientas de evaluación de usabilidad para evaluarla eficacia y la experiencia de aprendizaje entregada por el sitio web. Un aporte por ejemplo, analiza los intentos de reunir a diferentes mecanismos de evaluación y propone un marco de evaluación apropiado para otros contextos (Yammiyavar y Deshpande, 2012), por ejemplo, para la supervisión de plantas de procesos, objeto de esta tesis.

Un avance en esta discusión, tiene que ver con la incursión de las consolas de juego, ya que el problema de la interacción se traslada al usuario. Problemas de usabilidad se han encontrado en la mayoría de los procesos de evaluación heurística que normalmente se presentan en función del valor medio de la clasificación de severidad. En algunos casos, el valor promedio del índice de severidad no es exacto para determinar el nivel de los problemas de usabilidad encontrados. Esto es porque un valor promedio ignora los problemas más críticos que se encuentran en una parte específica. Una de las posibles soluciones para superar este problema es mediante el análisis de los números de clasificación de la gravedad de un problema encontrado. Un estudio piloto se llevó a cabo mediante la evaluación heurística para un juego educativo de computador que se está desarrollando basado en la técnica de evaluación heurística PHEG (Mohamed y otros, 2012). Un análisis cuantitativo de la PHEG se usó como base para este análisis. Los valores (%) para cada problema crítico encontrados fueron extraídos sobre la base de las funciones desarrolladas. Este valor debe ser capaz de ayudar a los desarrolladores a conseguir simplemente el resultado de la evaluación para el ECG que todavía está en proceso de desarrollo. La presentación del resultado en forma de porcentaje es uno de los resultados distintivos de este proceso. Esto ayudará a los desarrolladores de juegos para acortar el proceso de análisis de problema de usabilidad encontrado. Este enfoque contribuye al acervo de conocimientos del problema de usabilidad. El resultado del análisis se puede utilizar para indicarla calidad de los juegos de ordenador educativos.

Además de las consolas de videojuegos, la evaluación de usabilidad de las aplicaciones móviles puede ser una tarea que consume demasiado tiempo, sobre todo por el hecho que los estudios de campo son a menudo más adecuados que las evaluaciones de laboratorio. Sin embargo, el diseño de una buena interfaz de usuario puede hacer la diferencia entre la aceptación o el rechazo de un producto en el mercado, y por lo tanto es de gran importancia para el desarrollo de aplicaciones. Aproximaciones innovadoras de evaluación automatizada de la usabilidad de aplicaciones móviles,

sobre la base de observaciones de fondo y análisis del comportamiento de usuarios al utilizar la aplicación en condiciones reales, se han llevado cabo (Lettner y Holzmann, 2011). Los resultados, deben ayudar a los desarrolladores a diseñar aplicaciones móviles más fáciles de aprender, fáciles de usar y estéticamente más agradables, y por lo tanto dar lugar a una mayor facilidad de uso y la aceptación de las solicitudes (Nayebi y otros, 2012).

Finalmente, y con el fin de contribuir al campo del diseño de sistemas interactivos, es importante considerar el desempeño de los futuros diseñadores en cuanto a las especificaciones de la Interacción Humano-Computador (IHC), con el fin de mejorar el rendimiento de los operadores que tienen que enfrentar problemas de productividad, económicos y de seguridad para las personas e instalaciones por grupos interdisciplinarios de expertos.

Esta Tesis, presenta una contribución en ese sentido con la metodología, que al ser utilizada en empresas, mejorará considerablemente los aspectos de interacción incrementando la productividad, calidad y condiciones de trabajo de operadores de proceso.

8. CONCLUSIONES

La usabilidad es reconocida como un factor de calidad importante para sistemas interactivos incluidas las interfaces de usuario de una gran variedad de dispositivos. El diseño de aplicaciones, de modo que logren efectivamente sus propósitos en términos de facilidad de uso, no es una tarea fácil, ante la existencia de varios métodos y técnicas para la evaluación de la usabilidad que no ha sido posible integrarlo en un sencillo marco conceptual que facilite su uso por los desarrolladores. La metodología desarrollada, hace parte de las técnicas automatizadas de acuerdo con la clasificación presentada en esta tesis. Sin embargo, incorpora a los usuarios (operadores) para extraer información durante la interacción en tiempo de ejecución en actividades de supervisión de procesos, lo cual constituye una innovación frente a técnicas tradicionales del mismo tipo.

La literatura tiende a definir la usabilidad en términos excesivamente breves y ambiguos y describen su aplicación en términos informales. Esta es una de las razones principales por las cuales predominan los diferentes enfoques y orientaciones en el estudio de la usabilidad. Aunque no existe una concepción universal sobre criterios reales de evaluación de la usabilidad de sistemas interactivos, con la aproximación presentada por varios autores, se logró establecer una relación entre las acciones del operador sobre la interfaz y los eventos de interacción establecidos en el software de supervisión de procesos.

Para los dos casos de interfaces de entrenamiento del sistema tecnológico (ANFIS) de la metodología de evaluación de usabilidad, la prueba de hipótesis descartó que existan diferencias significativas entre la metodología desarrollada y las otras dos técnicas, la de inspección del experto y la indagación a los usuarios. Los cálculos de las tablas de Anova utilizadas, tuvieron en cuenta dos componentes, el factor y el error de variación. Los resultados de la estadística, indicaron que la hipótesis no se descarta, es decir, en promedio las valoraciones de cada técnica son similares. Con ello, se dedujo que la metodología propuesta, tuvo equivalencia con dos metodologías tradicionales, la inspección de un experto y la indagación a los usuarios con un área de rechazo del 1%.

Para los casos de interfaces de prueba y validación de la metodología, se pudo establecer que la mayoría de las interfaces se encontró en el rango de los factores críticos para una distribución del 99%, a excepción de una interface durante la prueba y una durante la validación del sistema de inferencia neurodifuso adaptativo, lo que quiere decir que la metodología tiene una efectividad superior al 85%.

Con la estadística de prueba, se determinó que la metodología es eficiente para actividades de interacción con interfaces de usuario, porque utiliza elementos que se encuentran incorporados y probados en el software de supervisión y se complementan con una técnica de inteligencia artificial que igualmente ha mostrado sus bondades en otras aplicaciones.

El objeto de la evaluación de usabilidad de interfaces es utilizar los resultados para realizar una retroalimentación, con el fin de mejorar los diseños y por ende la interactividad con el usuario. La metodología desarrollada le permite a un inexperto en usabilidad agilizar la evaluación para proponer las mejoras que den lugar a la optimización de la interacción con los procesos.

Aunque el objetivo de ésta Tesis dese el punto de vista de la ingeniería, está relacionado con la evaluación de la usabilidad de la interfaz de supervisión, es igualmente importante, aspectos relacionados con la psicología que no se tocan aquí. Por ejemplo, cuando no existe un completo conocimiento del uso de la interfaz, los operadores hacen uso intensivo de la ayuda en los primeros minutos de interacción con el proceso a través de las pantallas, a medida que se repiten las tareas, el uso de esta herramienta disminuye considerablemente y se hace solo de manera esporádica, esto se entendería como un proceso de aprendizaje normal. Sin embargo, durante los experimentos de interacción con la interfaz, una vez superado el aprendizaje se observaron diferentes comportamientos de los operadores o realización de actividades que no están ligadas directamente con el proceso. Es decir, que con el paso del tiempo la visualización constante de las pantallas genera aburrimiento entre los operadores.

Con el desarrollo constante de paquetes y aplicaciones de interfaces de supervisión de procesos ha incrementado el uso de la iconografía para la interacción con el operador, que ha conllevado a toda una cultura del simbolismo para el reconocimiento de las tareas que puede realizar una aplicación determinada. Toda aplicación cuenta con un gran número de íconos, entre más íconos, más robusta es la aplicación, pero igualmente se dificulta su manejo, generando sobrecarga mental en el operador. Las aplicaciones de monitorización y supervisión iniciaron con pocos íconos, pero estos han ido aumentando dadas las potencialidades que tienen estas aplicaciones para la interacción con los procesos.

La generación de pantallas emergentes para dar aviso al operador sobre una falla o anomalía en el proceso son una estrategia utilizada por las interfaces, estas pueden acompañarse por cambios de

colores (de acuerdo con estándares internacionales de seguridad industrial) o por sonidos de alerta, pero su desventaja es que generan pánico a los operadores. Podría proponerse que de acuerdo con los niveles de riesgo, se establezca una relación de colores y sonidos en las pantallas emergentes que denotan la aparición de un suceso no deseado en el proceso.

El desempeño del operador durante la interacción a través de la interfaz, tiene una relación directa con el conocimiento que tenga del proceso, haciéndolo más eficaz o menos productivo a la hora de realizar una tarea o tomar decisiones. Varias de las tareas asignadas a los operadores se rigen bajo ciertos patrones de secuencias a seguir, luego, depende del operador y su habilidad para memorizar y realizar n veces la misma acción, la cantidad de veces que se siga la misma secuencia en determinado tiempo.

Los trabajos futuros están orientados a utilizar la metodología aquí presentada en otros contextos, incluso en campos diferentes a la detección de incidentes, dado que actualmente existen en el mercado diversificado de productos con un alto grado de interacción con el usuario. Igualmente, para que el proceso evaluación de usabilidad de interfaces y/o productos interactivos, es importante la incorporación de buenas aplicaciones informáticas para la captura y análisis de registro de datos, por ello, este también es un campo de exploración.

ANEXO 1: productos derivados y/o relacionados con la Tesis

Hurtado, L., Castrillón, O. y Olivar, G. *Una Metodología Automatizada para la Evaluación de Usabilidad de Interfaces de Supervisión Industrial*. Revista Centro de Información Tecnológica, Vol. 24(4), julio-agosto 2013, ISSN 0718-0764, categoría A1.

Hurtado, L., Castrillón, O. y Olivar, G. *Metodología de Evaluación de Usabilidad de Interfaces Humano-Máquina*. Memorias del IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, IV de Ingeniería Mecatrónica y IV Congreso Internacional de Materiales, Energía y Ambiente, CIMM 2013. Barranquilla, mayo 2 al 5 de 2013.

Hurtado, L., Villarreal, L. *Control Robusto de un Sistema Mecánico Simple Mediante una Herramienta Gráfica*. Revista Dyna, Año 77, Nro. 162, pp. 214-223. Medellín, Junio de 2010. ISSN 00127353, categoría A1.

Hurtado, L., Villarreal, L. y Blanco O. *Diseño de un Controlador Robusto Mediante una Herramienta Gráfica*. Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Control Automático. Mérida, Venezuela, noviembre 28 de 2008. Universidad de los Andes ISSN 978-980-11-1224-2.

Hurtado, L. y Villarreal, L. *Una Herramienta para el Diseño de Controladores Robustos*. Revista Scientia et Technica Año XVI, No 38, p. 19-24, Junio de 2008. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, categoría C.

Hurtado, L. *Modelamiento Teórico y Modelamiento Empírico de Procesos, una Síntesis*. Revista Scientia et Technica Año XII, No 31, p. 103-108, Agosto de 2006 Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, categoría C.

Hurtado, L. *Metodología para el diseño de salas de control*. Revista Clepsidra, No 3, p. 87-97. Diciembre de 2006. Universidad Autónoma de Colombia. ISSN 1900-1355, categoría C.

ANEXO 2: código fuente del programa clasificador y entrenador del sistema de adaptación neuro-difusa, para el generador de eventos de seguridad de Microsoft Windows versión 7

%Este codigo debe estar en la misma carpeta del archivo de eventos

```
clc
clear
iniciar=input('¿Iniciar? S/N = ', 's');

if iniciar == 's' |iniciar == 'S'

[codigos] = textread('Archivo.TXT', '%s');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Términos para Recuperación de errores er

cod_er1='4774';
cod_er2='4775';
cod_er3='4776';
cod_er4='4777';
cod_er5='4768';
cod_er6='4771';
cod_er7='4772';
cod_er8='4769';
cod_er9='4770';
cod_er10='4625';
cod_er11='4978';
cod_er12='4979';
cod_er13='4980';
cod_er14='4981';
cod_er15='4982';
cod_er16='4983';
cod_er17='4984';
cod_er18='4646';
cod_er19='4650';
cod_er20='4651';
cod_er21='4652';
cod_er22='4653';
cod_er23='4655';
cod_er24='4976';
cod_er25='5049';
cod_er26='5453';
cod_er27='4654';
cod_er28='4977';
cod_er29='5451';
cod_er30='5452';
cod_er31='4634';
cod_er32='4647';
cod_er33='4624';
cod_er34='4625';
cod_er35='4648';
cod_er36='4675';
cod_er37='6272';
cod_er38='6273';
```

```
cod_er39='6274';  
cod_er40='6275';  
cod_er41='6276';  
cod_er42='6277';  
cod_er43='6278';  
cod_er44='6279';  
cod_er45='6280';  
cod_er46='4649';  
cod_er47='4778';  
cod_er48='4779';  
cod_er49='4800';  
cod_er50='4801';  
cod_er51='4802';  
cod_er52='4803';  
cod_er53='5378';  
cod_er54='5632';  
cod_er55='5633';  
cod_er56='4964';
```

%Términos para Eficacia ef

```
cod_ef1='4720';  
cod_ef2='4722';  
cod_ef3='4723';  
cod_ef4='4724';  
cod_ef5='4725';  
cod_ef6='4726';  
cod_ef7='4738';  
cod_ef8='4740';  
cod_ef9='4765';  
cod_ef10='4766';  
cod_ef11='4767';  
cod_ef12='4780';  
cod_ef13='4781';  
cod_ef14='4798';  
cod_ef15='5376';  
cod_ef16='5377';
```

%Términos para Productividad y multitarea pm

```
cod_pm1='4692';  
cod_pm2='4693';  
cod_pm3='4694';  
cod_pm4='4695';  
cod_pm5='4688';  
cod_pm6='4696';  
cod_pm7='4689';  
cod_pm8='5712';
```

%Términos para Velocidad de respuesta vr

```
cod_vr1='4928';
```

```
cod_vr2='4929';  
cod_vr3='4930';  
cod_vr4='4931';  
cod_vr5='4934';  
cod_vr6='4935';  
cod_vr7='4936';  
cod_vr8='4937';  
cod_vr9='4662';  
cod_vr10='5136';  
cod_vr11='5137';  
cod_vr12='5138';  
cod_vr13='5139';  
cod_vr14='5141';  
cod_vr15='4932';  
cod_vr16='4933';
```

```
%Términos para Accesibilidad o interactividad ai
```

```
cod_ai1='4665';  
cod_ai2='4666';  
cod_ai3='4667';  
cod_ai4='4668';  
cod_ai5='4868';  
cod_ai6='4869';  
cod_ai7='4870';  
cod_ai8='4871';  
cod_ai9='4872';  
cod_ai10='4873';  
cod_ai11='4874';  
cod_ai12='4875';  
cod_ai13='4876';  
cod_ai14='4877';  
cod_ai15='4878';  
cod_ai16='4879';  
cod_ai17='4880';  
cod_ai18='4881';  
cod_ai19='4882';  
cod_ai20='4883';  
cod_ai21='4884';  
cod_ai22='4885';  
cod_ai23='4886';  
cod_ai24='4887';  
cod_ai25='4888';  
cod_ai26='4889';  
cod_ai27='4890';  
cod_ai28='4891';  
cod_ai29='4892';  
cod_ai30='4893';  
cod_ai31='4894';  
cod_ai32='4895';  
cod_ai33='4896';  
cod_ai34='4897';  
cod_ai35='4898';  
cod_ai36='5140';  
cod_ai37='4664';
```

```
cod_ai38='4985';  
cod_ai39='5051';  
cod_ai40='5031';  
cod_ai41='5154';  
cod_ai42='5155';  
cod_ai43='5156';  
cod_ai44='5157';  
cod_ai45='5158';  
cod_ai46='5159';  
cod_ai47='5152';  
cod_ai48='5153';  
cod_ai49='4656';  
cod_ai50='4658';  
cod_ai51='4690';  
cod_ai52='4671';  
cod_ai53='4691';  
cod_ai54='4698';  
cod_ai55='4699';  
cod_ai56='4700';  
cod_ai57='4701';  
cod_ai58='4702';  
cod_ai59='5888';  
cod_ai60='5889';  
cod_ai61='5890';  
cod_ai62='4657';  
cod_ai63='5039';  
cod_ai64='4659';  
cod_ai65='4660';  
cod_ai66='4661';  
cod_ai67='4663';
```

%Términos para Confianza cf

```
cod_cf1='4715';  
cod_cf2='4719';  
cod_cf3='4902';  
cod_cf4='4904';  
cod_cf5='4905';  
cod_cf6='4906';  
cod_cf7='4907';  
cod_cf8='4908';  
cod_cf9='4912';  
cod_cf10='4713';  
cod_cf11='4716';  
cod_cf12='4717';  
cod_cf13='4718';  
cod_cf14='4739';  
cod_cf15='4864';  
cod_cf16='4865';  
cod_cf17='4866';  
cod_cf18='4867';  
cod_cf19='4704';  
cod_cf20='4705';  
cod_cf21='4706';
```

```
cod_cf22='4707';
cod_cf23='4714';
cod_cf24='4709';
cod_cf25='4710';
cod_cf26='4712';
cod_cf27='5040';
cod_cf28='5041';
cod_cf29='5042';
cod_cf30='5043';
cod_cf31='5044';
cod_cf32='5045';
cod_cf33='5046';
cod_cf34='5047';
cod_cf35='5048';
cod_cf36='5440';
cod_cf37='5441';
cod_cf38='5442';
cod_cf39='5443';
cod_cf40='5444';
cod_cf41='5446';
cod_cf42='5448';
cod_cf43='5449';
cod_cf44='5450';
cod_cf45='5456';
cod_cf46='5457';
cod_cf47='5458';
cod_cf48='5459';
cod_cf49='5460';
cod_cf50='5461';
cod_cf51='5462';
cod_cf52='5463';
cod_cf53='5464';
cod_cf54='5465';
cod_cf55='5466';
cod_cf56='5467';
cod_cf57='5468';
cod_cf58='5471';
cod_cf59='5472';
cod_cf60='5473';
cod_cf61='5474';
cod_cf62='5477';
cod_cf63='4944';
cod_cf64='4945';
cod_cf65='4946';
cod_cf66='4947';
cod_cf67='4948';
cod_cf68='4949';
cod_cf69='4950';
cod_cf70='4951';
cod_cf71='4952';
cod_cf72='4953';
cod_cf73='4954';
cod_cf74='4956';
cod_cf75='4957';
cod_cf76='4958';
cod_cf77='4909';
cod_cf78='4910';
```



```
cod_cf79='5063';  
cod_cf80='5064';  
cod_cf81='5065';  
cod_cf82='5066';  
cod_cf83='5067';  
cod_cf84='5068';  
cod_cf85='5069';  
cod_cf86='5070';  
cod_cf87='5447';  
cod_cf88='6144';  
cod_cf89='6145';  
cod_cf90='4670';
```

%Términos para Seguridad o fiabilidad fb

```
cod_fb1='4727';  
cod_fb2='4728';  
cod_fb3='4729';  
cod_fb4='4730';  
cod_fb5='4731';  
cod_fb6='4732';  
cod_fb7='4733';  
cod_fb8='4734';  
cod_fb9='4735';  
cod_fb10='4737';  
cod_fb11='4754';  
cod_fb12='4755';  
cod_fb13='4756';  
cod_fb14='4757';  
cod_fb15='4758';  
cod_fb16='4764';
```

%Términos para Satisfacción o flexibilidad fl

```
cod_fl1='4672';  
cod_fl2='4673';  
cod_fl3='4674';
```

%Términos para Coherencia co

```
cod_co1='4960';  
cod_co2='4961';  
cod_co3='4962';  
cod_co4='4963';  
cod_co5='4965';  
cod_co6='5478';  
cod_co7='5479';  
cod_co8='5480';  
cod_co9='5483';  
cod_co10='5484';  
cod_co11='5485';  
cod_co12='5024';  
cod_co13='5025';
```

```
cod_co14='5027';
cod_co15='5028';
cod_co16='5029';
cod_co17='5030';
cod_co18='5032';
cod_co19='5033';
cod_co20='5034';
cod_co21='5035';
cod_co22='5037';
cod_co23='5058';
cod_co24='5059';
cod_co25='4608';
cod_co26='4609';
cod_co27='4616';
cod_co28='4621';
cod_co29='4610';
cod_co30='4611';
cod_co31='4614';
cod_co32='4622';
cod_co33='4697';
cod_co34='4612';
cod_co35='4615';
cod_co36='4618';
cod_co37='4816';
cod_co38='5038';
cod_co39='5056';
cod_co40='5057';
cod_co41='5060';
cod_co42='5061';
cod_co43='5062';
```

```
%Lectura Inicial
```

```
for i=1:56
bcod_er(i) = strmatch(cod_er(i),codigos);
end
```

```
for i=1:16
bcod_ef(i) = strmatch(cod_ef(i),codigos);
end
```

```
for i=1:8
bcod_pm(i) = strmatch(cod_pm(i),codigos);
end
```

```
for i=1:16
bcod_vr(i) = strmatch(cod_vr(i),codigos);
end
```

```
for i=1:67
bcod_ai(i) = strmatch(cod_ai(i),codigos);
end
```

```
for i=1:90
```

```
bcod_cf(i) = strmatch(cod_cf(i),codigos);
end

for i=1:16
bcod_fb(i) = strmatch(cod_fb(i),codigos);
end

for i=1:3
bcod_fl(i) = strmatch(cod_fl(i),codigos);
end

for i=1:43
bcod_co(i) = strmatch(cod_co(i),codigos);
end

%Frecuencia Inicial

for i=1:56
fcod_er(i) = numel(bcod_er(i));
end

for i=1:16
fcod_ef(i) = numel(bcod_ef(i));
end

for i=1:8
fcod_pm(i) = numel(bcod_pm(i));
end

for i=1:16
fcod_vr(i) = numel(bcod_vr(i));
end

for i=1:67
fcod_ai(i) = numel(bcod_ai(i));
end

for i=1:90
fcod_cf(i) = numel(bcod_cf(i));
end

for i=1:16
fcod_fb(i) = numel(bcod_fb(i));
end

for i=1:3
fcod_fl(i) = numel(bcod_fl(i));
end

for i=1:43
fcod_co(i) = numel(bcod_co(i));
end

%Vector Inicial
```

```

ver1=fcod_er;
vef1=fcod_ef;
vpm1=fcod_pm;
vvr1=fcod_vr;
vail=fcod_ai;
vcf1=fcod_cf;
vfb1=fcod_fb;
vfl1=fcod_fl;
vcol=fcod_co;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5
else
break
end

volver_a_preguntar=1;

while volver_a_preguntar

terminar=input('¿Terminar? S/N = ', 's');
if terminar == 's' |terminar == 'S'

[codigos] = textread('Archivo.TXT', '%s');

%Lectura final

for i=1:56
bcod_er(i) = strmatch(cod_er(i),codigos);
end

for i=1:16
bcod_ef(i) = strmatch(cod_ef(i),codigos);
end

for i=1:8
bcod_pm(i) = strmatch(cod_pm(i),codigos);
end

for i=1:16
bcod_vr(i) = strmatch(cod_vr(i),codigos);
end

for i=1:67
bcod_ai(i) = strmatch(cod_ai(i),codigos);
end

for i=1:90
bcod_cf(i) = strmatch(cod_cf(i),codigos);
end

for i=1:16
bcod_fb(i) = strmatch(cod_fb(i),codigos);
end

```

```

for i=1:3
bcod_fl(i) = strmatch(cod_fl(i),codigos);
end

for i=1:43
bcod_co(i) = strmatch(cod_co(i),codigos);
end

%Frecuencia final

for i=1:56
fcod_er(i) = numel(bcod_er(i));
end

for i=1:16
fcod_ef(i) = numel(bcod_ef(i));
end

for i=1:8
fcod_pm(i) = numel(bcod_pm(i));
end

for i=1:16
fcod_vr(i) = numel(bcod_vr(i));
end

for i=1:67
fcod_ai(i) = numel(bcod_ai(i));
end

for i=1:90
fcod_cf(i) = numel(bcod_cf(i));
end

for i=1:16
fcod_fb(i) = numel(bcod_fb(i));
end

for i=1:3
fcod_fl(i) = numel(bcod_fl(i));
end

for i=1:43
fcod_co(i) = numel(bcod_co(i));
end

%Vector Final
ver2=fcod_er;
vef2=fcod_ef;
vpm2=fcod_pm;
vvr2=fcod_vr;
vai2=fcod_ai;
vcf2=fcod_cf;
vfb2=fcod_fb;

```

```

vf12=fcod_f1;
vco2=fcod_co;

%Vector absoluto
ver3=ver2-ver1;
vef3=vef2-vef1;
vpm3=vpm2-vpm1;
vvr3=vvr2-vvr1;
vai3=vai2-vai1;
vcf3=vcf2-vcf1;
vfb3=vfb2-vfb1;
vf13=vf12-vf11;
vco3=vco2-vco1;

%Datos de entreamiento
x = (1:1:90)';
y=[ver3 vef3 vpm3 vvr3 vai3 vcf3 vfb3 vf13 vco3];

datos=[x,y];

volver_a_preguntar=0;
else
    volver_a_preguntar=1;
end
end

%Vector de chequeo

o=[1 32 32 32 32 32 32;2 12 12 12 12 12 12;3 25 25 25 25 25 25;4 60 60 60
60 60 60;5 1 1 1 1 1 1;6 100 100 100 100 100 100;7 7 7 7 7 7 7;8 80 80 80
80 80 80];

%Generación del sistema de inferencia difusa

numMFs = [3 3 3 3 3 3 3 3];
mfTypm = 'gaussmf';
in_fis = genfis1(datos,numMFs,mfTypm);

%Entrena y genera la red neuronal artificial

[fismat,ecfor1,ss] = anfis(datos,in_fis,[],[],[],0);%El cero indica que
es retropropagación

plot(x,y);
holdon
plot(x,evalfis(y,fismat),'k','LineWidth',2);
holdoff
legend('Recuperación de errores','Eficacia','Productividad y
multitarea','Velocidad de respuesta','Accesibilidad o
interacitividad','Confianza','Seguridad o
fiabilidad','Flexibilidad','Coherencia','Salida de Anfis');

```

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, m. (2008). Diseño de Interfaz Hombre-Máquina para el Proceso de Molienda Ingenio Providencia S.A. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecatrónico, Universidad Autónoma de Occidente.

Adikari, S. y McDonald, C. (2006). User and Usability Modeling for HCI/HMI: A Research Design. *Information and Automation, 2006. ICIA 2006. International Conference on*, vol., no., pp.151, 154, 15-17.

Armfield Limited. (2006). Armfield Process Plant Trainer PCT23, ficha técnica.

Anderson, J. R. (2000). *Learning and Memory*, Second Edition. New York: Wiley.

Ankita, M. y Sanjay, K. *Usability Evaluation Methods: A Literature Review*. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(2), (2012).

Baddeley, A. D. y Hitch, G. J. (1974). Working memory. En G. Bower (Ed), *the Psychology of learning and motivation* (Vol. VIII). Londres: Academic Press.

Baecker, R., Grudin J. Buxton, W. Greenberg, S. (1995). *Toward the year 2000. Reading in human-computer interaction*: Morgan Kaufman Ed.

Bakiotis, C., Raymond, J. y Rault, A. (1979). Parameter and discriminant analysis for jet engine mechanical state diagnosis. In *Proc. Of the 1979 IEEE Conf. on Decision & Control*, Fort Lauderdale, USA.

Barrera, W. y Gaitán, H. (2008). Desarrollo de una Interfaz Gráfica para Interconexión de Sistemas de Procesos. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electromecánico, Universidad Autónoma de Colombia.

Bartek, V. y Cheatham, D. (2003). Experience remote usability testing, Part 1: examine study results on the benefits and downside of remote usability testing.

Beard, R. (1971). Failure accommodation in linear systems through self-reorganization. Technical Report MVT-71-1. Man Vehicle Laboratory, Cambridge, Mass.

Bedny, G., y Karwowski, W. (2007). *A systemic-structural theory of activity: applications to human performance and work design*. Boca Raton, FL, US: CRC Press.

Benyon, D. (2013). *Designing Interactive Systems: A comprehensive guide to HCI, UX and interaction design*. Pearson, 3ra edición.

Blanco, O. y Prieto, F. (2007). Desarrollo de una Interfaz Gráfica para Determinación de Incertidumbres Paramétricas en Modelos de Procesos. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electromecánico, Universidad Autónoma de Colombia.

Blanke, M., Izadi-Zamenabadi, R., Bogh, S. y Lunan, C. (1997). Fault-tolerant control systems. *Control Engineering Practice*, 5(5): 693-702.

Blanke, M. (2000). What is fault-tolerant control? In *Proceedings of IFAC SAFEPROCESS'00*, Budapest.

Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. & Staroswiecki, M. (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*. Springer-Verlag. Second edition. Heidelberg. p. 1-5.

Bolton, M., Bass, E. y Siminiceanu, R. (2013). *Using Formal Verification to Evaluate Human-Automation Interaction: a review*. *Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, IEEE Transactions on, vol.43, no.3, pp. 488, 503.

Boy, G. (2013). *Cognitive Engineering. Orchestrating Human-Centered Design*. Springer-Verlag, London.

Brown, J. (1959). Some test of the delay theory of immediate memory, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 10, 12-21.

Cabra, A. y Quito, R. (2012). Diseño de un Sistema de Monitorización Remoto para la Planta Embotelladora del Laboratorio de Instrumentación y Control de Procesos de la Universidad

Autónoma de Colombia. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electromecánico, Universidad Autónoma de Colombia.

Cacciabue, P. C. y Saad F. (2008). Behavioural adaptations to driver support systems: a modeling and road safety perspective. *Cognition, Technology &Work*, Vol. 10, No. 1. p. 31-39.

Cacciabue, P. C. y Cassani, M. (2012). Modelling motivations, tasks and human errors in a risk-based perspective. *Cognition, Technology &Work*, Vol. 14. p. 229-241.

Caicedo, D. y Carballo, Y. (2012). Aplicación Electrónica y Computacional de una Realización Mínima Multivariable en Forma Canónica Utilizando la Descomposición de Kalman. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Cañas, J., y Waern, Y. (2001). *Ergonomía Cognitiva*. Madrid, editorial Médica Panamericana. Colección Ciencias Cognitivas.

Cañas, J. J. (2004). *Personas y máquinas, del diseño de su interacción desde la ergonomía cognitiva*. Ediciones pirámide. Madrid, España.

Cao, X., Lijue, W. y Shijian, L. (2012). *Research on Contextual Design in Human-Computer Interaction Under the Framework of Activity Theory*. Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering. Lectures Notes in Electrical Engineering, 11, 853-868.

Card, S. K. (1982). User perceptual mechanisms in the search of computer command menus. Proceedings of Human factors in Computer Systems. Gaithersburg, MD: SIGCHI.

Carroll, J. M., Jian, H. y Lee, R. (2010). Extending the task-artifact framework with organizational learning. *En knowledge and process management*, volume 17(1), p. 22-35. Ed. John Wiley & Sons.

Castillo, G. (2005). *Estudio de redes neuronales para detectar y diagnosticar fallas en un motor de combustión interna*. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Piura. p. 38.

Chen, J. y Patton, R. (1999). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer,

Boston.

Chen, P., Han, Q. y Yue, D. (2013). *To Transmit or Not to Transmit: A Discrete Event-Triggered Communication Scheme for Networked Takagi–Sugeno Fuzzy Systems*. IEEE Transactions on fuzzy systems, vol. 21, no. 1.

Clark, R. (1990). A simplified instrument detection scheme. IEEE Transaction on Aerospace Electron. Systems, 14(3): 558-563.

Colomer, J. y Meléndez J. (2003). Introducción a la monitorización y supervisión experta de procesos: métodos y herramientas. Notas de clase, Universidad de Girona, Departamento de electrónica, automática e informática.

Coutaz, J. y Balbo, S. (1994). Evaluation des interfaces. utilisateur: taxonomie et recommandations. IHM'94, Human-Computer Interaction Conference, Lilles, France.

Da Ponte, M. y Da Silveira, A. (2008). *A Methodology for Evaluation the Usability of Software for Industrial Automation Using Artificial Neural Networks: Case Study—Eletrobrás*. 2008 International Conference on Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation. 430-435.

Dix, A., Finlay, J., Abowd, G. y Beale R. (2004). Human-Computer Interaction. Pearson Education Ltd. (3rd edition).

Dray, S. y Siegel, D. (2004). Remote possibilities?: international usability testing at a distance. Interactions, V. 11, issue 2, 2004, p. 10-17. ACM Press.

Endsley, M. R., Hoffman, R., Kaber, D. y Roth, E. (2007). Cognitive Engineering and Decision Making: An Overview and Future Course. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, Volume 1, Number 1, pp. 1–21.

Endsley, Mica R. (2013). *Situation Awareness*. En The Oxford Handbook of cognitive Engineering, Oxford University Press, New York (USA). p. 88-108.

Feng, Z., Liang, M. y Chu, F. (2013). *Recent advances in time–frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 38, Issue 1, 5.

Filbert, D. (1985). Fault diagnosis in nonlinear electromechanical systems by continuous-time parameter estimation. *ISA Trans.*, 24(3): 23-27.

Filbert, D. y Metzger, L. (1982). Quality test of systems by parameter estimation. In Proc. 9th IMEKO-Congress, Berlin, Germany, May.

Filippi, S y Barattin, D. (2012). *Integrating Systematic Innovation, Interaction Design, Usability Evaluation and Trends of Evolution*. Sustainable product development, CIRP Design 2012. Editor Amaresh Chakrabarti. p. 301-311.

Fouzi, H., Mohamed, N., Nounou, H. Nounou, N. y Madakyaru, M. (2013). Statistical fault detection using PCA-based GLR hypothesis testing. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 26, Issue 1*, Pages 129-139.

Frank, P. (1987). Advanced fault detection and isolation schemes using nonlinear and robust observers. In 10th IFAC Congress, volume 3, pages 63-68, München, Germany.

Frank, P. y Wünnenberg, J. (1989). Sensor fault detection via robust observers. In Tzafestas, S., Singh, M. y SciHMdt, G. editors, *System fault diagnostics, reliability & related knowledge-based approaches*, volume 1, pages 147-160. D. Reidel Press, Dordrecht.

Gao, Q., Feng, G. Zeng, X. y Wang, Y. (2012). *Universal Fuzzy Models and Universal Fuzzy Controllers Based on Generalized T-S Fuzzy Models*. WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence June, 10-15, Brisbane, Australia.

Gentner, D. y Stevens, A. L. (1983). *Mental models*. Hillsdale: N. J.: LEA.

Gertler J., Li W., Huang Y. y McAvoy T., (1999). *Isolation Enhanced Principal Component Analysis*. *AIChE Journal*, Vol. 45(2), p. 323-334.

Gertler, J. y Singer, D. (1985). Augmented models for statistical fault isolation in complex dynamic systems. In Proc. American Control Conference (ACC), volume 1, pages 317-322, Boston, MA.

Gertler, J. (1988). A survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. *IEEE Control Systems Magazine*, 8(6): 3-11.

Gertler, J. (1998). *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. Marcel Dekker, New York.

Gertler, J. (2005). Residual generation from principal component models for fault diagnosis in linear systems, Part I: review of static systems. *IEEE Conference on Intelligent Control Systems*, Limassol, Cyprus.

González, Y., Martínez, J. y Guevara, B. (2009). Desarrollo de un sistema de detección de fallas para un proceso didáctico de dosificación de líquidos. Trabajo de grado de ingeniería electromecánica, Universidad Autónoma de Colombia, Bogotá, Colombia.

Goldstein, E. (2013). *Sensation and Perception*, 9th edition. Cengage Learning.

Granollers, T. S. (2004). MPIu+a. Una metodología que integra la ingeniería del software, la interacción persona ordenador y la accesibilidad en el contexto de equipos de desarrollo multidisciplinares. Tesis Doctoral. Departament de Llenguatges i Sistemes Informàtics, Universitat de Lleida.

Granollers, T., Lóres, J. (2005). *Modelo de proceso de ingeniería de la usabilidad y la accesibilidad*. En diseño de sistemas interactivos centrados en el usuario. Ed. UOC. P. 93.

Guevara, A. y Pereira, E. (2009). Implementación de un Sistema de Control para un Proceso Híbrido Utilizando SCADA LookoutDirect y PLC Koyo DL06. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Hancock, P., Jagacinski, R., Parasuraman, R., Wickens, Ch., Wilson, G. & Kaber, D (2013). *Human-Automation Interaction Research: Past, Present, and Future*. Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications.

Hanna, N., Richards, D. y Jacobson, M. (2012). *Automatic Acquisition of User Models of Interaction to Evaluate the Usability of Virtual Environments*. Knowledge Management and Acquisition for Intelligent Systems. Lectures Notes in Computer Science. 7457, 43-57.

Herczeg, M. (2010). *Die Reuckkehr des Analogen: Interaktive Medien in der Digitalen Prozessfeuhrung*. In M. Grandt & A. Bauch (Eds.), *Innovative Interaktionstechnologien fur Mensch-Maschine-Schnittstellen* (pp. 13–28). Bonn: Deutsche Gesellschaft fur Luft- und Raumfahrt.

Herczeg, M. y Stein, M. (2012). *Human Aspects of Information Ergonomics*. Information Ergonomics, Stein, M y Sandl, P, (eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hernández, J. y Vargas, C. (2010). *Desarrollo de un Sistema de Monitorización y Detección de Fallas para un Proceso de Pasterización*. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Himmelblau, D. (1978). *Fault detection and diagnosis in chemical and perochemical processes*. Elsevier, New York.

Hix, D. y Hartson, H. (1993). *Developing user interface: ensuring usability through product & process*. New York, John Wiley and Sons.

Hoffman, R., Johnson, M., Bradshaw, J. y Underbrink, A. (2013). *Trust in Automation, Intelligent Systems, IEEE*, vol.28, no.1, pp.84,88.

Hohmann, H. (1987). *Automatische Überwachung und Fehlerdiagnose an Werkzeug-maschinen*. PhD thesis, Technische Hochschule, Darmstadt.

Hollnagel, E., Woods, D. (2006). *Joint Cognitive Systems: An Introduction to Cognitive Systems Engineering*, Oxford: Taylor & Francis. pp. 17.

Huguenard, B., Lerch, F. J., Junker, B. W, Patz, R. J y Kass, R. E. (1997). *Working memory failure in phone-based interaction*. ACM Transactions on Computer Human Interaction, 4, 67-102.

Hurtado, L. (2005). Diseño, Desarrollo e Implementación de una Herramienta para la Optimización del Funcionamiento de un Sistema de Refrigeración y Aire Acondicionado. Tesis de Maestría para obtener el título de Magister en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.

Hurtado, L. (2006a). *Metodología para el Diseño de Salas de Control*. Clepsidra No. 3. p. 87-97.

Hurtado, L. (2006b). *Modelamiento Teórico y Modelamiento Empírico de Procesos: una Síntesis*. Scientia et Technica Año XII, No 31. p.103.

Hurtado, L. y Villarreal, L. (2008). *Una Herramienta para el Diseño de Controladores Robustos*. Scientia et Technica Año XVI, No 38, p. 19-24.

Hurtado, L. y Villarreal, L. (2010). *Control Robusto de un Sistema Mecánico Simple Mediante una Herramienta Gráfica*. Dyna, Año 77, No. 162. p. 214-223.

Hutchins, E., Hollan, J. D. y Norman, D. A. (1986). Direct Manipulation Interfaces. En D. A. Norman y W. Draper (Eds.), User Centered System Design. Hillsdale, Nj: Lawrence Erlbaum.

Isermann, R. (1980). Methoden zur fehlererkennung für die Überwachung technischer Prozesse. Regelungstechnische Praxis, (9 & 10): 321-325 & 363-368.

Isermann, R. (1982). Parameter-adaptive control algorithms, a tutorial. Automatica 18(5): 513-528.

Isermann, R. (1984). Process fault detection on modeling and estimation methods, a survey. Automatica, 20(4): 387-404.

Isermann, R. (1993). Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. In Proc. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), volume 1, pages 121-133, Bade-Baden, Germany, September.

Isermann, R. (1994). Integration of fault-detection and diagnosis methods. In Proc. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), pages 597-609, Espoo, Finland, June.

Isermann, R. y Ballé, P. (1997). Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis in technical process. *Control Engineering Practice*, 5(5): 638-562.

Isermann, R. (2011). *Fault-Diagnosis Applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*. Springer-Verlag.

Jang, J. (1993). *Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference system*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 23, pp. 665-684.

Jang, J. y Sun, C. (1995). Neuro-Fuzzy Modeling and Control, *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, pp.378-406.

Jang, J. y Mizutani, E. (1996). Levenberg-Marquardt method for ANFIS learning, *Fuzzy Information Processing Society, 1996.NAFIPS., 1996 Biennial Conference of the North American*, vol., no., pp.87,91.

Jander, H. y Alfredson, J. *Human-Machine Interaction (2013). Evaluation Framework. Human Computer Interaction, Human-Centred Design Approaches, Methods, Tools, and Environments. Proceedings of 15th International Conference, HCI International 2013, part I, Vol. 80042013.*

Jones, H. (1973). *Failure detection in linear systems*. Dept.of Aeronautics, M.I.T., Cambridge.

Kaholi, S., Mansouri, M. Selvaraj, J. y Rahim, N. (2013), A Hybrid Adaptive Neural-Fuzzy Tuned P.I. Controller Based Unidirectional Boost P.F.C. Converter Feeds B.L.D.C. Drive. 4th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2013), Feb 13-14, Tehran, Iran.

Kurzynski, M. y Wozniak, M. (2009). *Computer Recognition Systems 3. Advances in Intelligent and Soft Computing*. Springer, Warsaw, Poland.

Leontyev, A. N. (1979). *Activity, Conscience, Personality*. Englewood Cliffs, N. J. Prentice Hall.

Lettner, F. y Holzmann, C. (2011). *Usability Evaluation Framework Automated Interface Analysis for Android Applications*. *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2011, Lectures Notes in Computer Science*, Vol. 6928, 2012, pp. 560-567.

Lin, F. Hung, Y. Hwang, J. y Tsai, M. (2013). *Fault-Tolerant Control of a Six-Phase Motor Drive System Using a Takagi–Sugeno–Kang Type Fuzzy Neural Network With Asymmetric Membership Function*. IEEE Transactions on power electronics, vol. 28, no. 7.

Marroquín, M. y Rojas, H. (2008). Desarrollo de una Interfaz Gráfica para Análisis y Síntesis de Controladores Automáticos Robustos de Procesos. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electromecánico, Universidad Autónoma de Colombia.

Martínez, O. (2007). Introducción a las redes neuronales. Trabajo para la asignatura de doctorado: Aprendizaje Automático, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid.

McCulloch, W. y Walter, P. (1943). A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (4): 115–133.

Mehnen, J., Köppen, M. Saad, A. y Tiwari, A. (2009). Applications of Soft Computing. *Advances in Intelligent and Soft Computing*. Vol. 58. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Mehra, R. y Peschon, J. (1971). An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems. *Automatica*, 7: 637-640.

Merzouli, R., Samantaray, A., Pahak, P. y Boumama, B. (2013). Model-Based Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control. *Intelligent Mechatronic Systems*, Springer-Verlag, London, pp. 577-617.

Minsky, M. y Papert, S. (1969). *An Introduction to Computational Geometry*. MIT Press.

Mohamed, H., Yusoff, R. y Jaafar, A. (2012). *Quantitive analysis in a heuristic evaluation for Usability of Educational Computer Game (UsaECG)*. Information Retrieval & Knowledge Management (CAMP), 2012 International Conference on, vol., no., pp.187, 192, 13-15.

Mojica, I. y Suárez, P. (2009). Redes de Petri Difusas Aplicadas a un Proceso de Dosificación por Lotes de Sustancias Granulares. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Montoya, D. y Álvarez, F. (2012). Diseño de un Sistema de Supervisión para una Planta de Llenado y Transporte de Botellas. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Mor, E., Garreta, M. y Galofré, M. (2007). Diseño Centrado en el Usuario en Entornos Virtuales de Aprendizaje, de la Usabilidad a la Experiencia del Estudiante. IV Simposio Pluridisciplinar sobre Diseño, Evaluación y Desarrollo de Contenidos Educativos Reutilizables (SPDECE).

Moran, T.P. (1981). An applied psychology of the user. *Computing Surveys*, 13, 1-11.

Navas, G. (2000). Diseño y Aplicación de Controladores Neuro-difusos Integrados en Modo Mixto de Alta Complejidad. Tesis Doctoral, Universidad de Málaga, España.

Nayebi, F., Desharnais, J., Abran, A. (2012). *The state of the art of mobile application usability evaluation*. *Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, 2012 25th IEEE Canadian Conference on, vol., no., pp.1,4.

Newell, A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Cambridge, Mass. Harvard University Press.

Nielsen, J. y Molich, R. (1990). *Heuristic evaluation of user interfaces*, Proceedings of the CHI'90. ACM 0-89791-345 0/90/0004-0249. New York, pp.349-256.

Nielsen J. (1993). *Usability engineering*. Academic Press.

Nielsen, J. y Mack, R.L. (1994). *Usability Inspection Methods*. John Wiley & Sons, New York, NY.

Norman, D. A. (1983). Some observations on mental models. En D. Gentner y A. L. Stevens (Eds.) *Mental Models*. Hillsdale: NJ: LEA.

Norman, D. A. (1986). Cognitive engineering. En D. A. Norman & S. W. Draper (Eds.), *User Centred System Design* (pp. 32-65). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Norman, D. A. (1991). *Cognitive Artifacts*. En Carroll, J. M. (Ed.), *Designing Interactions: Psychology at the Human-Computer Interactions*. Nueva York: Cambridge University Press.

Norman, D. A. (1995). *Advanced TV Estandards: Into the Future with Jaunty Air and an Anchor Around our Necks.*

Norman, D. A. (2007). *Cautious Cars and Cantankerous Kitchens: How Machines Take Control. En: The Design of Future Things.* New York: Basic Books. (En prensa).

Paap, Noel, McDonald y Roske-Hofstrand. (1987). *Optimal organization guided by cognitive networks and verified by eye movement analysis.* En H.J Bullinger y B. Shackel (Eds.) *Human Computer Interaction -INTERACT'87.* Elsevier Science B.V.

Patton, R. (1994). *Robust model-based fault diagnosis: the state of the art.* In Proc. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), pages 1-24, Helsinki, Finland.

Patton, R. (1998). *Robust fault detection using eigenstructure assignment.* In Proc. 12th IMACS World Congress on Scientific Computation, volume 2, pages 431-434, Paris, France.

Patton, R., Frank P., y Clark R. (2000). *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems.* Springer, New York (USA). p. 21-24.

Patton, R., Frank, P. y Klark, P. editors. (1989). *Fault diagnosis in dynamic systems, theory and applications.* Prentice Hall, London.

Perlman, G. (1984). *Making the right choices with menus.* Proceedings of INTERACT'84. Londres: IFIP.

Peterson, L. R. y Peterson, M. J. (1959). *Short-term retention of individual verbal items.* Journal of Experimental Psychology, 58, 193-198.

Ponsa, P., Vilanova, R. y Díaz, M. (2007). *Introducción del Operario Humano en el Ciclo de Automatización de Procesos Mediante la Guía GEMMA.* Información Tecnológica, 18(5), 21-38.

Ponsa, P., Amante, B. y Díaz, M. (2009). *Evaluación de la usabilidad para la tarea de supervisión humana en sala de control industrial.* Revista RIAI Revista Iberoamericana de Automática e

Informática Industrial, 6(1), 84-93.

Preece, J. (1993). *A Guide to Usability: Human factors in computing*. Addison Wesley, the Open University.

Preece, J., Rogers, y Sharp, H. (2002). *Interaction Design beyond human-computer interaction*. Wiley

Rios, D., Vasquez, A., Mosqueira, E. y Moret, V. (2010). *Usability: A Critical Analysis and a Taxonomy*. *International Journal of Computer-Interaction* 26(1):53-74.

Rodeiro, J. (2001). *Representación y Análisis de la componente visual de la interfaz de usuario*. Tesis doctoral. Universidad de Vigo.

Roger, S. (1995). *Neuro fuzzy modelling and control*. *Proceedings of IEEE* 83(3):378-406.

Rubio, J. y Zipasuuca, F. (2009). *Diseño e Implementación del Control Remoto a una Planta vía Internet utilizando el PLC koyo dl-06*. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Rukh, H. (2012). *Incorporating Usability Evaluation in Software Development Environments*. *KI-künstliche Intelligenz*. 26(2), 197-200.

Rundus, D. (1971). *Analysis of rehearsal processes in free recall*. *Journal of Experimental Psychology*, 89, 63-77.

Sainea, R. (2011). *Implementación del Protocolo Modbus serial para la Comunicación de Parámetros de un Variador de Velocidad*. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Savioja, P. y Norros, L. (2012). *Systems usability framework for evaluating tools in safety-critical work*. *Cogn Tech Work*.

Scriven, M. (1967). *The Methodology of Evaluation*. In R. Tyler, R. Gagne, & M. Scriven (Eds.),

Perspectives of Curriculum Evaluation. Chicago: Rand McNally, 39-83.

Seffah, A., Donayae, M., Kline, R., Padda, H. *Usability measurement and metrics: A consolidated model*, Software Quality Control, 14(2), (2006).

Siebert, H. e Isermann, R. (1977). Leckerkennung und -lokalisierung bei Pipelines durch Online-Korrelation mit einem Prozeßrechner. *Regelungstechnik*, 25(3): 69-74.

Sierra, L. (2011). Algoritmo Prim para Redes por Medios Guiados. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia.

Simon, H. A. (1996). *The Science of Artificial*. Cambridge, MA. MIT Press, 3^{ra} edición.

Spagnoletti, P. y Tarantino, L. (2013). *User Centered Systems Design: The Bridging Role of Justificatory Knowledge. Designing Organizational Systems*. Lectures Notes in Information Systems and Organization, 1, 105-121.

Stein, M. (2008). *Informationsergonomie. Ergonomische Analyse, Bewertung und Gestaltung von Informationssystemen*. In Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.), Dortmund: Druck der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Takagi, T. y Sugeno, M. (1989). *Derivation of Fuzzy Control Rules from Human Operator's Control Action*. Proc. of the IFAC Symp. of Fuzzy Inf., Knowledge Representation and Decision Analysis, pp. 55-60.

Talebi, H. y K. Khorasani, K. (2013). A Neural Network-Based Multiplicative Actuator Fault Detection and Isolation of Nonlinear Systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol.21, no.3, pp.842, 851.

Urbina, W. y Martínez, F. (2011). Implementación de un Electro-miógrafo con Interfaz USB. *Tecnura*, vol. 16, núm. 33, pp. 117-130.

Vogel-Heuser, B., Braun, S., Obermeier, M., Jobst, F y Schweizer, K. (2012). *Usability Evaluation on Teaching and Applying Model-Driven Object Oriented Approaches for PLC Software*. 2012

American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montréal, Canada.

Vygotsky, L. (1978). *Mind in Society*. Harvard University Press. Londres.

Wandmacher, J., y Müller, U. (1987). On the usability of verbal and iconic command representations. *Zeitschrift für Psychologie*, 9, p. 35-45.

Wang, D., Zeng, X. y Keane, J. (2012). *A Structure Learning Method for Concise Fuzzy Systems*. WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence June, 10-15, 2012, Brisbane, Australia.

Watanabe, U. y Himmelblau, D. (1982). Instrument fault detection in systems with uncertainties. *Int. Journal of Systems Science*, 13: 137-158.

Whitefield, A. Wilson, F. y Dowell, J. (1991). A framework for human factors evaluation, behaviour and Information Technology, Taylor & Francis Ltd, Basingstoke, UK, Vol 10(1), pp. 65-79.

Willsky, A. (1976). A survey of design methods for failure detection systems. *Automatica*, 12: 601-611.

Wixon D. y Wilson C. (1997). The usability-engineering framework for product design and evaluation. *Handbook of HCI*, 2nd edition, Elsevier Science, p653-688.

Yacyreta. (2012). Visita virtual al complejo Yacyrecta. *Revista Binacional* En: http://www.yacyreta.org.ar/revista/02/img/02_06-07salacontrol_800px.jpg

Yammiyavar, P. y Deshpande, Y. (2012). *Usability Evaluation of a Virtual Lab by Adapting Structured & Unstructured Techniques*. *Technology Enhanced Education (ICTEE)*, 2012 IEEE International Conference on, vol., no., pp.1, 10, 3-5.

Zadeh, L. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol SMC-3, no 1, pp. 28-44.

Zapata, G., Cardillo, J. y Chacón, E. (2011). *Aportes Metodológicos para el Diseño de Sistemas de Supervisión de Procesos Continuos*. Información Tecnológica, 22(3), 97-114.

Zhang, Y., Guo, D. y Li, Z. (2013). *Common Nature of Learning Between Back-Propagation and Hopfield-Type Neural Networks for Generalized Matrix Inversion With Simplified Models*. IEEE transactions on neural networks and learning systems, VOL. 24, NO. 4.